



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

PŘESNOST EVROPSKÉHO GNSS PRO CIVILNÍ LETECTVÍ

ACCURACY OF THE EUROPEAN GNSS FOR THE CIVIL AVIATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN BITTNER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL PTÁČEK

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Bittner

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Letecký provoz (3708T011)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Přesnost evropského GNSS pro civilní letectví

v anglickém jazyce:

Accuracy of the European GNSS for the Civil Aviation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro pracovní oblast států ECAC byl certifikován nový evropský prvek GNSS, systém EGNOS.

Student proto provede základní přehled současných prvků GNSS a charakterizuje jejich vliv na výslednou přesnost výpočtu polohy leteckého uživatele systému.

Hlavním úkolem vypracování diplomové práce bude tvorba postupu hodnocení naměřených chyb GNSS-1, systému EGNOS v kombinaci se základním systémem GPS, pro hodnocení požadavků přesnosti, jak je definuje předpis L 10/I. Výpočet parametrů, reprezentujících dosažitelnou úroveň přesnosti na experimentálním vzorku dat statické observace signálu v prostoru GPS/EGNOS, bude provedena výhradně pro oblast polohy s přesahem rámce základních požadavků uvedených předpisem. Závěrem student provede diskuzi, kterou doplní praktickou část o možné příčiny dosažených výsledků.

Cíle diplomové práce:

Student vypracuje postup šetření chyb měření GNSS-1 pro posouzení dostupné úrovně přesnosti (tj. pravdivost, přesnost, preciznost) určení polohy při statické observaci GPS/EGNOS v souladu s předpisem L 10/I. Na jeho základě provede praktické hodnocení na reálném vzorku dat naměřených základní stanicí LÚ a závěrečnou diskuzi.

Seznam odborné literatury:

[1] Úřad pro civilní letectví. Letecký předpis L 10/I : O civilní letecké telekomunikační službě : Svazek I : Radionavigační prostředky [online]. Praha : Ministerstvo dopravy České republiky, 2003, poslední změna 2010-11-18 [cit. 2011-08-31]. Uveřejněno pod č. j. 1285/2003-220-SP/1. Dostupný z WWW: □

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Ptáček

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21.11.2011

L.S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá přesností určení polohy globálním polohovým systémem GPS a jeho satelitním rozšiřujícím systémem EGNOS. V práci je popsán postup šetření chyb uvedených globálních navigačních satelitních systémů dle předpisu L10 a následně podrobněji zpracován nad rámec požadavků tohoto předpisu. V praktické části je provedeno hodnocení chyb na reálném vzorku dat, která jsou naměřena za pomoci statické observace, a později je uskutečněna diskuze nad dosaženými výsledky.

Klíčová slova

GNSS, EGNOS, šetření chyb, elipsa chyb, přesnost

ABSTRACT

This diploma thesis deals with a positioning accuracy of global positioning system GPS and satellite augmentation system EGNOS. My thesis describes the procedure for investigation of the errors in previously mentioned global navigation satellite systems according to L10 regulation and further on an elaboration is worked out in more detail far beyond the requirements of this regulation. In the practical part, an assessment of errors on a real data sample is done, the errors are measured with using a static observation, and later a discussion is carried out on the achieved results.

Key words

GNSS, EGNOS, investigation of errors, error ellipse, accuracy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BITTNER, Jan. *Přesnost evropského GNSS pro civilní letectví*. Brno, 2012. 74 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Ptáček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Přesnost evropského GNSS pro civilní letectví** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25. 5. 2012

Datum

Bc. Jan Bittner

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Ptáčkovi za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce a všestrannou pomoc. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vojtěchu Lamberskému za odborné konzultace v souvislosti s aplikací programu MATLAB.

OBSAH

ÚVOD	8
1 GNSS (Global Navigation Satellite System)	9
1.1 GPS (Global Positioning System)	11
1.1.1 Struktura GPS	11
1.1.2 Struktura signálu družic	13
1.1.3 Zdroje chyb GPS a parametry charakterizující chyby	15
1.2 Evropská rozšiřující služba EGNOS	21
1.2.1 Kosmický segment.....	22
1.2.2 Pozemní segment	22
1.2.3 Služby poskytované systémem EGNOS	23
1.2.4 Výkonnost systému EGNOS	23
1.3 Parametry kvality radionavigačních zařízení	26
2 NAVIGACE ZALOŽENÁ NA VÝKONNOSTI (PBN)	29
2.1 RNAV	30
2.2 RNP	30
2.3 Požadavky na výkonnost GNSS	30
2.3.1 Přesnost.....	31
2.3.2 Další požadavky na výkonnost GNSS	33
3 POSTUP ŠETŘENÍ CHYB GNSS	35
3.1 Zjednodušený popis jednotlivých činností postupu.....	36
3.2 Šetření chyb dle předpisu L10	37
3.3 Výpočet určení polohy GNSS	38
3.4 Šetření přesnosti navigačního měření	40
3.4.1 Chyby radionavigačních měření	41
3.4.2 Zpracování náhodných chyb	42
3.4.3 Testy normálního rozdělení	45
3.4.4 Elipsa chyb.....	46
4 OVĚŘENÍ POSTUPU.....	50
4.1 Výpočet charakteristik chyb	50
4.2 Komentář k dosaženým výsledkům.....	57
ZÁVĚR.....	59
SEZNAM LITERATURY	60
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	64
PŘÍLOHA.....	68

ÚVOD

V současné době neustále dochází ke zvyšující se poptávce po přepravě prostřednictvím letecké dopravy, jejichž důsledkem je zvýšená hustota provozu ve vzdušném prostoru. Tato skutečnost vyžaduje stále více letových cest a snížení rozestupů mezi letadly. Aby bylo možno splnit náročné požadavky na letový provoz, je zapotřebí neustále zvyšovat a hodnotit přesnost navigačních systémů.

Jednou z cest, jak zajistit dostatečnou přesnost určení polohy letadla, kdykoliv a kdekoli na Zemi, jsou globální polohové satelitní systémy (GNSS). Hlavním představitelem a základním prvkem uváděných satelitních systémů je americký globální polohový systém (GPS). Tento systém byl původně vyvinut pro vojenské účely, přičemž pro potřeby civilního letectví má určité nedostatky. Za účelem snížení či eliminování těchto nedostatků vznikly tzv. rozšiřující systémy. Na evropském kontinentě byl certifikován nový rozšiřující prvek GNSS, který je nazýván EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service). Evropský rozšiřující systém pracuje jako podpora systému GPS a je vytvořen pro účely civilního letectví.

Úkolem diplomové práce je zpracovat přehled současných prvků GNSS a charakterizovat jejich vliv na výslednou přesnost polohy. Následně vypracovat postup pro hodnocení naměřených chyb systému EGNOS v kombinaci se základním prvkem GPS, pro hodnocení požadavků přesnosti v souladu s předpisem L10/I. Dalším cílem práce je výpočet parametrů reprezentujících přesnost na naměřených vzorcích statickou observací v prostoru systémem GPS/EGNOS. To se uskuteční pro oblast určení polohy s přesahem rámce základních požadavků, které uvádí předpis L10. V závěru práce je zpracováno vyhodnocení dosažených výsledků včetně komentáře.

1 GNSS (Global Navigation Satellite System)

Jedná se o technologii využívající družicový pasivní radiový systém, který slouží k určování polohy, rychlosti a času na kterémkoli místě na Zemi a to v reálném čase. Názvem GNSS se rozumí všechny technologie a systémy, které využívají navigaci pomocí družic. Určování polohy uživatele je na principu dálkoměrné metody. Globální satelitní systémy nacházejí své uplatnění v mnoha odvětvích, jako např. navigace námořnictva, vojenského letectva, v oblasti geodézie, mapování - sběr dat, v oblasti cestování, civilního letectví apod. Diplomová práce se zabývá použitím GNSS v oblasti civilního letectví. Letecký předpis L10 tyto systémy definuje následně:

„GNSS je celosvětový systém sloužící pro určování polohy a času, který zahrnuje konstelaci jedné nebo více družic, letadlových přijímačů a monitorování integrity systému, rozšířený, pokud je to nezbytné, k podpoře požadované navigační výkonnosti pro určitý provoz.“ [35]

V současnosti se využívají GNSS jako jsou americký polohový systém GPS (Global Positioning System) a ruský Glonass. Evropský kontinent reaguje na tyto systémy tak, že buduje svůj vlastní navigační systém Galileo. Dalším plánovaným satelitním systémem je čínský Compass. Do GNSS jsou zahrnuty tzv. rozšiřující systémy známé pod zkratkami ABAS, SBAS a GBAS.

ABAS (Airborne Based Augmentation Systems) - systémy s palubním rozšířením. Jsou určeny k integraci celé informace GNSS a informace z jiných navigačních systémů na palubě letadla. Využívají se dva přístupy pro sledování integrity:

- RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) – využívá informace z GNSS pro autonomní sledování integrity přijímačem. Je založen na použití testerů vnitřních funkcí nebo souběžném monitorování z více jak 4 satelitů,
- AAIM (Aircraft Autonomous Integrity Monitoring) – využívá informace z dalších palubních senzorů (př. barometrický výškoměr) pro sledování integrity letadlem. Vyhledává nepřiměřené odlišnosti a hledá možné způsoby jejich eliminace.

GBAS (Ground Based Augmentation Systems) – systémy s pozemním rozšířením. Jedná se o obecný název pro systém pozemních referenčních stanic, které v reálném čase vyhodnocují aktuální stav kosmického segmentu GNSS (typicky GPS + GLONASS). Vypočítávají korekce vzhledem ke své absolutní poloze a poskytují je uživatelům pomocí mobilních sítí, radiových vysílání nebo až zpětně pro korekce prováděné po skončení měření.

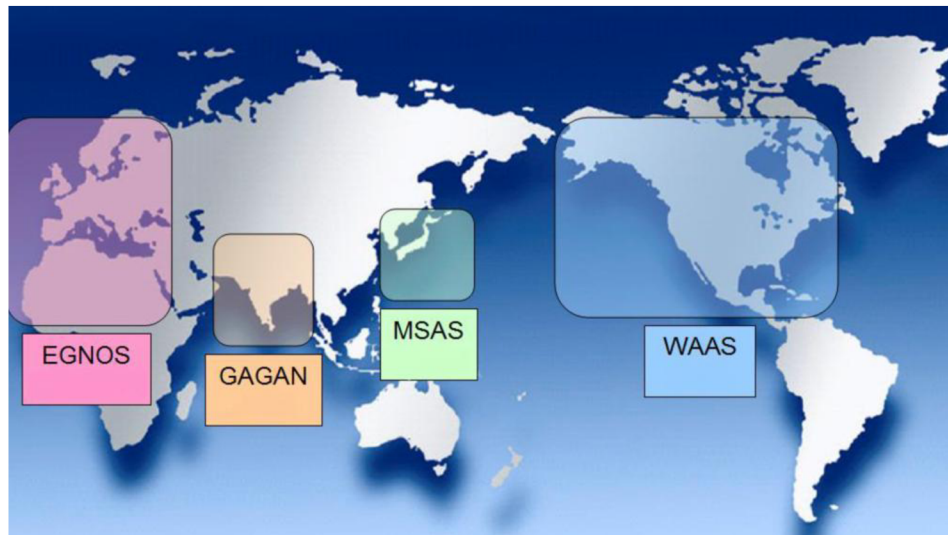
- regionální GBAS: GRAS – Austrálie, DGPS – USA, CZEPOS – Česko a další,
- místní GBAS: označován jako LAAS (Local Area Augmentation System), vyskytuje se jako osamělá referenční stanice u letiště. [11, 19, 35]

SBAS (Satellite Based Augmentation Systems) – systémy se satelitním rozšířením. Jedná se o systém pozemních monitorovacích stanic, které v reálném čase vyhodnotí aktuální stav kosmického segmentu GNSS a stav ionosféry, určí korekce těchto vlivů, jejichž hodnoty jsou vysílány uživatelům pomocí geostacionárních družic. Bez těchto rozšiřujících systémů nelze použít Glonass a GPS pro všechny fáze letu, jelikož samostatně nedosahují dostatečné výkonnosti. SBAS pomáhá zdokonalit tyto systémy tak, že dokáže zvýšit přesnost navigačního systému na daném území a zajišťuje požadavky integrity, spojitosti, dostupnosti a času do výstrahy.

Pokud se podíváme podrobněji na přednosti systému SBAS v civilním letectví, potom můžeme uvést následující výhody:

- pomůže snížit zdržení, potřebu přesměrování a zrušení letu,
- v případě přesného přiblížení umožňuje zálohování,
- zajistí pružnější a bezpečnější přiblížení pro vrtulník,
- umožní přiblížení po křivce a průběžné sestupové trati. Napomáhá snížení hluku a emisí,
- zlepšuje přiblížení vrtulníku v hustě zalidněných a málo dostupných oblastech,
- sníží náklady letecké dopravní infrastruktury – velice cenově efektivní alternativa za původní systémy přesného přístrojového přiblížení, jako jsou ILS, MLS nabízející podobnou výkonnost bez potřeby instalace a údržby. [32]

Systém SBAS je dle mého názoru neustále zdokonalován. Důkazem toho je fakt, že systém je využíván světovými velmocemi, jako jsou Severní Amerika (WAAS), Evropa (EGNOS), Japonsko (MSAS) a Indie (GAGAN). Rozmístění systémů se satelitním rozšířením znázorňuje obr. 1.



Obr. 1 Rozšiřující systémy. [31]

Požadavkem GNSS je celosvětové působení, nepřetržitá činnost, vysoká pohotovost a přesnost měření. Ve všech těchto parametrech již překonávají všechny stávající technologie pro navigaci. [11]

Strukturu většiny GNSS lze rozdělit na tři základní složky, a to na: kosmický, řídicí a uživatelský segment.

Kosmický segment

Obsahuje určitý počet aktivních umělých družic Země, které se pohybují po drahách blížících se elipse. Jsou vybaveny atomovými hodinami, přijímačem a vysílačem. Poloha družice je upravována pomocí raketových motorů a energie zajišťující chod družice je získávána ze solárních panelů.

Řídicí segment

Jeho úkolem je vytvářet a udržovat systémový čas, průběžně monitorovat a koordinovat činnost celého systému, manévrovat satelity, tzn. upravovat dráhy satelitů. Řídicí segment se skládá z hlavní řídicí stanice a z několika monitorovacích stanic, jejichž posláním je nepřetržitě přijímat signály ze všech družic. Naměřená data se zpracují v hlavní řídicí stanici.

V této stanici se počítají korekce drah a hodin družic a upravené hodnoty se vysílají zpět na družice. Poté se tyto údaje vysílají v navigační zprávě uživatelům.

Uživatelský segment

Zahrnuje uživatelské pozemní přijímače, které přijímají a zpracovávají signály družic.

Diplomová práce se bude zabývat systémem GPS, který je nejrozšířenějším na Zemi a nejvíce rozpracovaným systémem určování polohy. Součástí práce bude vysvětlení podstaty evropského rozšiřujícího systému EGNOS, který pomáhá zvýšit výkonnost navigačního systému GPS a je certifikovaným systémem pro civilní letectví v oblasti ECAC.

1.1 GPS (Global Positioning System)

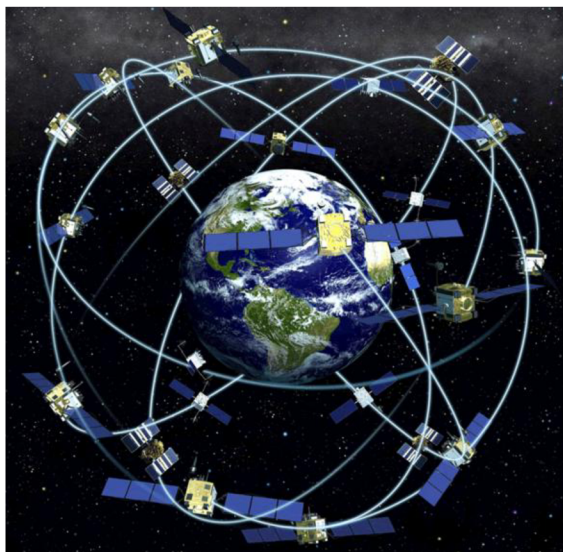
Družicový navigační systém je provozovaný Spojenými státy americkými. Zaměřuje polohu s několikametrovou přesností kdekoliv na Zemi. Systém má velmi široké využití v civilním sektoru, přestože patří ministerstvu obrany USA. GPS tvoří 3 hlavní segmenty:

- kosmický,
- řídicí,
- uživatelský.

1.1.1 Struktura GPS

Kosmický segment

Skládá se z minimálního počtu 24 družic na šesti oběžných drahách, celkový počet operačních družic nacházejících se v kosmickém segmentu je 31 (plus 3 – 4 záložní satelity, které je možné aktivovat v případě potřeby). Počet satelitů se neustále mění z důvodu vypouštění družic nové generace. Družice jsou rozmístěny na šesti téměř kruhových drahách (orbitách), tzn., že na každé orbitě jsou čtyři družice. Dráhy svírají s rovinou rovníku úhel 55° (viz obr. 2) a jsou ve výšce přibližně 20200 km nad Zemí. Oběh trvá 11 hodin a 58 minut. Každá družice je vybavena třemi až čtyřmi atomovými hodinami s přesností 10^{-13} s. Dále se na palubě vyskytují detektory hlídající dodržování zákazu zkoušek nukleárních zbraní. Navigační signál je vysílán v pásmu L (1000 - 2000 MHz). [10, 14, 33]



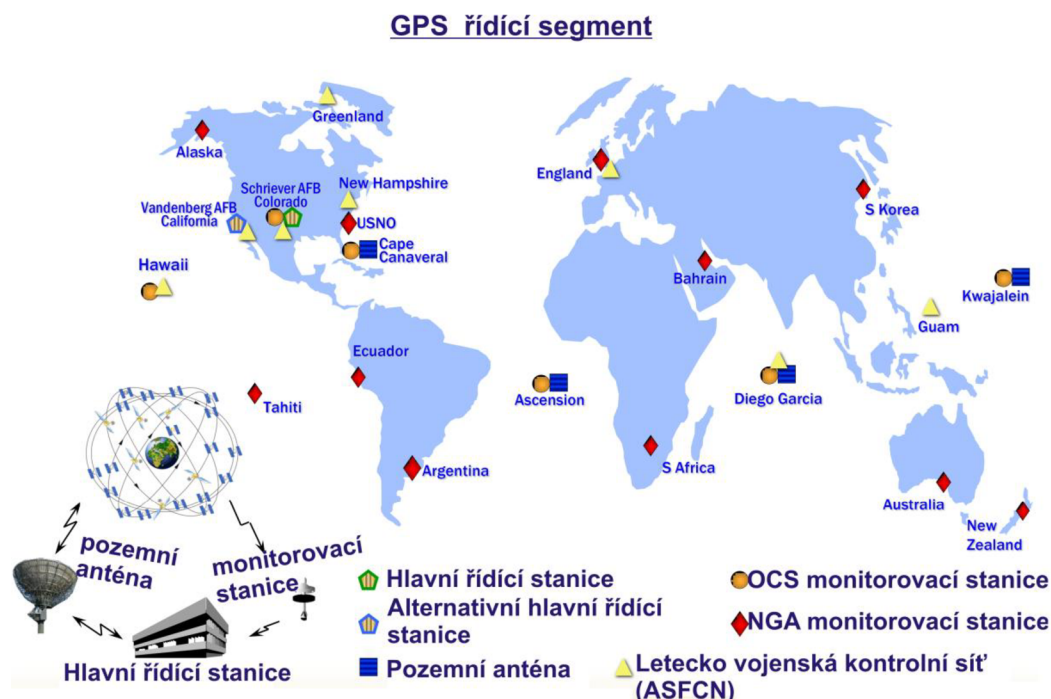
Obr. 2 Rozmístění družic GPS na oběžných drahách. [20]

Všechny družice stávající konstelace nepřetržitě vysílají signál L1 a L2 na dvou frekvencích, a to:

- L1 (1575,42 MHz) je modulován C/A a P/Y kód,
- L2 (1227,60 MHz) je modulován P/Y kód.

Řídící segment

Jedná se o celosvětovou síť pozemního zařízení, která má na starosti sledování GPS satelity a jejich vysílání. Mezi další úkoly patří provádění analýz, posílání příkazů a dat kosmickému segmentu. Skládá se z hlavní řídicí stanice a v případě výpadku je možné využít alternativní řídicí stanice. Nedílnými složkami segmentu jsou pozemní antény a monitorovací stanice. Rozmístění celého systému ukazuje podrobněji obr. 3.



Obr. 3 Rozmístění prvků řídicího segmentu GPS. [23]

V roce 2008 byly dobudovány monitorovací stanice, které vlastní agentura NGA (National Geospatial - Intelligence Agency). Tím se zvýšil jejich počet z původních šesti na celkový počet šestnácti monitorovacích stanic. Rozšíření sítě monitorovacích stanic umožnilo zdvojnásobit množství údajů shromažďovaných družicemi, což mělo pozitivní vliv na zvýšení přesnosti až o 10 - 15 %. [29]

Mezi nejdůležitější úkoly řídicího segmentu patří:

- sledování pohybu družic a výpočet korekcí orbit (efemerid),
- sledování hodin družic a předpovídání jejich chování,
- synchronizování času na palubě satelitu,
- přenášení přesných orbitálních údajů, které byly získané při komunikaci se satelity,
- přenos aproximovaných informací orbit všech satelitů (almanach),
- přenos dalších informací, jako jsou stav družic, chyby atomových hodin apod. [38]

Uživatelský segment

Tvoří jej pasivní GPS přijímače uživatelů.

1.1.2 Struktura signálu družic

Veškeré signály vyslané družicemi GPS se skládají z nosné vlny, dálkoměrného kódu a navigační zprávy. [10] Signály družic jsou vysílány na dvou nosných frekvencích:

- **frekvence L1** - je 1575,42 MHz, má vlnovou délku 19 cm. Je modulována dvěma dálkoměrnými kódy, které se nazývají taktéž pseudonáhodné šumy (PRN). Jedním z nich je P - kód (Precision code), který bývá pro vojenské účely zašifrován. Druhý je C/A kód (Coarse/Acquisition), který není šifrován,
- **frekvence L2** - je 1227,6 MHz, má vlnovou délku 24 cm. Tato frekvence je modulována pouze P - kódem.

Oběma nosnými frekvencemi je přenášěn jak C/A a P kód, tak také navigační zpráva. Binární kód je kódován pomocí fázových posunů nosných vln. Přesnost systému lze snížit provozovatelem tzv. selektivní dostupnosti (SA - Selective Availability), která umožňuje snížit přesnost C/A kódu tak, aby přijímače vypočítaly svoji polohu s chybou až 100 m. Tuto chybu lze snížit pomocí diferenčních korekcí až na 1 m.

Civilní přijímače využívají pro měření pouze C/A kód a P kód, v případě, že není zašifrován. GPS poskytuje v současnosti pouze dvě služby, a to SPS a PPS. SPS služba (Standard Positioning Service - standardní polohová služba) využívá frekvence L1 a je dostupná pro každého majitele uživatelského zařízení. PPS služba (Precise Positioning Service - přesná polohová služba) využívá kmitočtu frekvence L2 a umožňuje měřit zpoždění signálu po průchodu ionosférou. Tato služba je poskytována pouze autorizovaným uživatelům (např. vojenské složky) a je zapotřebí mít speciální přijímače. [10, 11]

Pro účely civilního letectví se používá standardní polohová služba. Předpis L10 uvádí maximálně povolené chyby určení polohy systémem GPS. Pro celosvětový průměr platí, že chyba v horizontální rovině nesmí být větší jak 13 m a ve vertikální rovině 22 m (za 95 % času). V případě, že se vezme v úvahu nejhorší místo s nejhorším příjmem signálu na Zemi, pak chyba určení polohy v horizontální rovině nesmí přesáhnout 36 m a ve vertikální rovině 77 m (za 95 % času). [35] Podrobněji to je popsáno v kapitole 2.

Ve své práci informuji pouze o frekvencích L1 a L2, které se využívají v současnosti k vysílání minimálním potřebným počtem satelitů, kterých je 24. V budoucnu se má ještě využívat signál L5, který pomůže zpřesnit určování polohy. V současnosti starší typy satelitů nejsou schopny vysílat tento signál.

Základní frekvence

Vychází z frekvence atomových hodin. Přesná hodnota této frekvence je definována tak, aby byly vyloučeny relativistické efekty, které vznikají pohybem družic. Základní frekvence má hodnotu $f_0 = 10,23$ MHz. [10]

C/A kód (Clear/Access - volný přístup)

Skládá se z pseudonáhodné posloupnosti 1023 nul a jedniček (PRN kód). Danou posloupnost má přidělena přesně každá družice a vlastní svůj C/A kód. Kód je vysílán na nosné frekvenci L1 a není zašifrován, proto je přijímán i neautorizovanými uživateli v civilním segmentu. C/A kód je základní signál využívaný službou SPS. Kód je vysílán frekvencí 1,023 MHz a má délku 1023 bitů, což znamená, že se délka kódu opakuje každou milisekundu. Horizontální přesnost kódu je několik jednotek metrů. Využívá se u navigace, kde je vyžadována nižší přesnost a časová synchronizace. Dále umožňuje čtení navigační zprávy a rychlou orientaci v P kódu.

P kód (Precision code - přesný)

P kód moduluje obě nosné frekvence L1 a L2, je určen pro autorizované uživatele. Je dlouhý cca 266 dnů a dělí se do sedmidenních sekvencí, kdy jedna sekvence je přiřazena družici. P kód je vytvářen kombinací dvou registrů o frekvenci 10,23 MHz, která je desetinásobná vůči C/A kódu. [14, 10] Dle nové definice je tento kód součástí standardní polohové služby a je možné jej přijímat i v civilní sféře. Zdánlivá vzdálenost mezi přijímačem a družicí je pomocí P kódu měřena s vyšší přesností, a to z následujících důvodů:

- použití delšího a rychlejšího kódu,
- použití dvou nosných frekvencí L1 a L2, díky kterým se podstatně omezí vliv ionosférické refrakce. [10]

Rozdíly mezi kódy C/A a P v přesnosti při určování polohy jsou uvedeny v tab. 1. Z tabulky je patrné, že P kód eliminuje více chybu ionosférické refrakce, šumu a rozlišovací schopnosti přijímače.

Tab. 1 Jednotlivé zdroje chyb zdánlivé vzdálenosti: [4]

Segment	Zdroje chyb	Podíl na UERE (1σ)	
		C/A kód	P kód
Kosmický	Stabilita kmitočtového normálu družice	3,0 m	3,0 m
	Predikce pertubací družice	1,0 m	1,0 m
	Jiný	0,5 m	0,5 m
Řídící	Chyba modelu predikce efemerid	4,2 m	4,2 m
	Jiný	0,9 m	0,9 m
Uživatelský	Ionosferická refrakce	5,0 - 10,0 m	2,3 m
	Troposferická refrakce	2,0 m	2,0 m
	Šum a rozlišovací schopnost přijímače	7,5 m	1,5 m
	Vícecestné šíření signálu	1,2 m	1,2 m
	Jiný	0,5 m	0,5 m
UERE (1σ) celkem		10,8 - 13,9 m	6,6 m

Y kód

Pokud je P kód šifrován, označuje se jako Y kód. V případě dešifrování kódu se využívá speciálního klíče, který mají k dispozici pouze autorizovaní uživatelé, jako je např. armáda. Jakmile je využíván Y kód, civilní uživatelé jej nemohou použít.

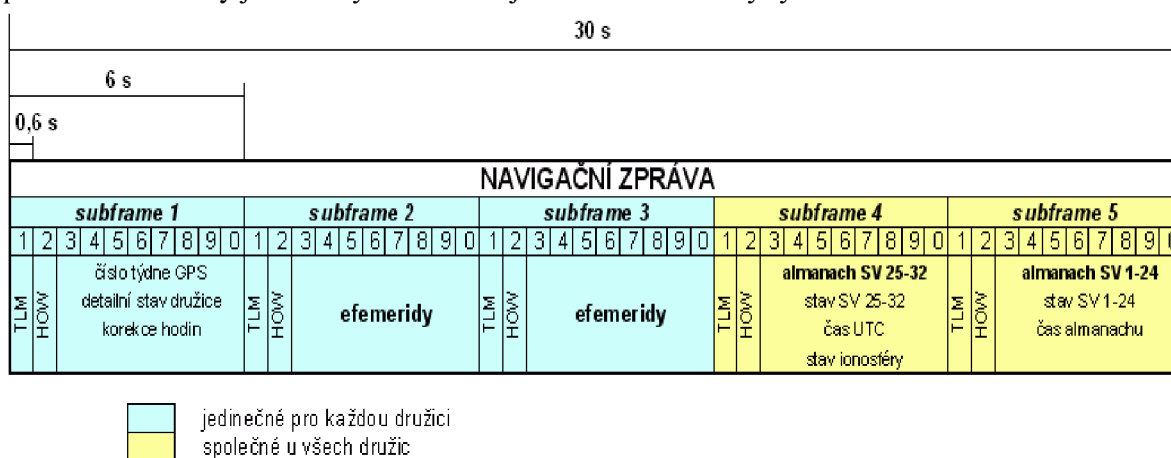
Navigační zpráva

Obsahuje data vysílaná na frekvenci L1, která jsou důležitá pro stanovení přesného času a polohy uživatele. V navigační zprávě není obsažena přímo poloha družice, ale jsou zde uvedeny parametry dráhy s celou řadou dalších údajů, jako jsou:

- systémový čas a časové korekce,
- vysoce přesné Keplerovy efemeridy družice,
- almanach,
- koeficienty ionosférického modelu,
- stav družice.

Díky získaným údajům z navigační zprávy lze vypočítat přesnou polohu družice a určit přesný čas. V případě, že se signál nepřijímá na dvou kmitočtech, pak z přijatých dat je možné vypočítat korekce na ionosférickou refrakci. Stav družice podává uživateli informace, které se týkají závady na družici a to, zda je možné ji využít, či s jakými omezeními. Almanach obsahuje informace o polohách ostatních družic a údaje o jejich stavu. Znalost aktuálního almanachu umožní vyhledávat družice, které jsou viditelné v dané oblasti. Koeficienty ionosférického modelu se využívají k odhadu vlivu ionosféry na signál GPS, a to v případě, že není použito dvoufrekvenčního přijímače.

Navigační zpráva obsahuje 25 stran (rámců). Jeden rámeček má délku 1500 bitů a trvá 30 sekund (obr. 4), skládá se z pěti podrámčů (subframes) po 300 bitech a 6 sekundách. Každé slovo podrámce má 30 bitů, ale využívá se pouze 24 bitů pro přenos dat. Zbývajících 6 bitů slouží k zabezpečení přenosu dat proti chybám za použití tzv. Hammingova kódu, který opraví automaticky jednu chybu a indikuje maximálně 3 chyby.



Obr. 4 Struktura navigační zprávy GPS. [14]

V případě tří prvních podrámčů je vždy obsah stejný, a to:

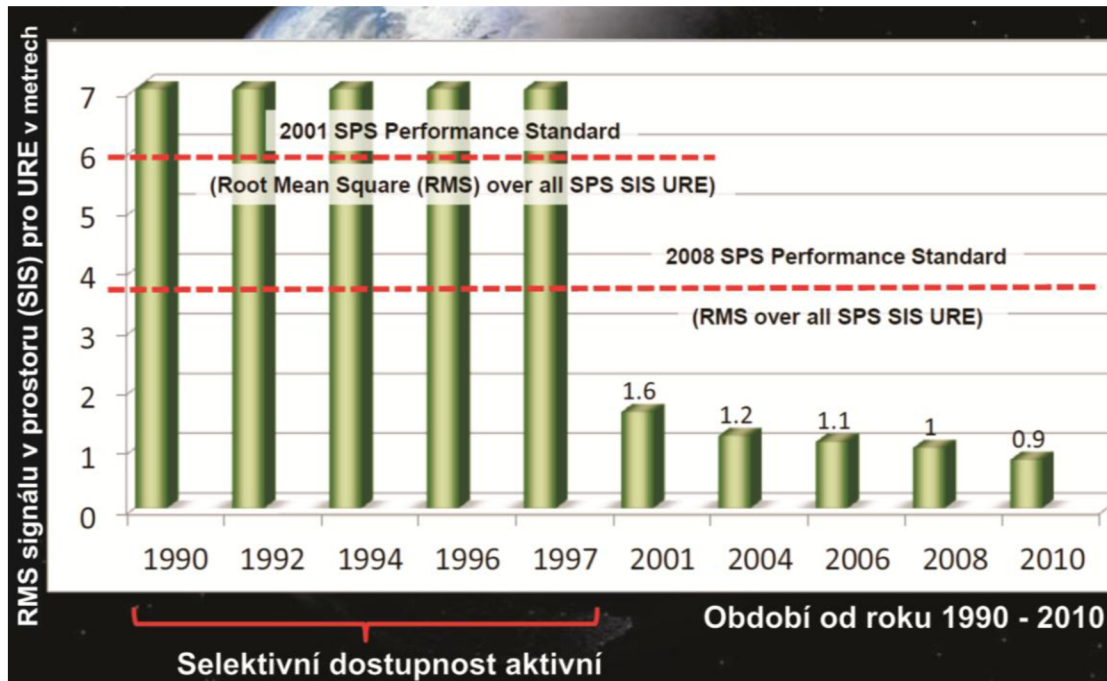
- podrámec 1. - údaje o korekcích hodin,
- podrámec 2. a 3. – přesné efemeridy družic,
- podrámce 4. a 5. jsou využívány pro přenos dalších stránek dat, které obsahují další zbývající údaje. Obsah podrámčů se aktualizuje několikrát v týdnu a všechny podrámce se opakují každých 12,5 minuty. Platnost navigační zprávy je 4 hodiny. [10, 11, 14,]

1.1.3 Zdroje chyb GPS a parametry charakterizující chyby

Na zařízení GPS působí různé chyby, které mají za následek snížení přesnosti určení polohy uživatele. Jedním z příkladů je nevhodné rozstavení satelitů v daném okamžiku nebo zpoždění signálu při průchodu ionosférou či troposférou. Obecně platí, že je zapotřebí tyto zdroje chyb snížit na minimální hodnotu a v ideálním případě eliminovat. Na obr. 5 je dokázána skutečnost, že se přesnost každým rokem neustále zvyšuje a je možné vidět, jak velký vliv měla selektivní dostupnost (SA - Selective Availability) na snížení přesnosti. Již v roce 2001 byla chyba určení vzdálenosti uživatele cca o 60 % nižší, než je požadováno standardem výkonnosti standardní polohové služby (SPS) vydaným v roce 2008. V obr. 5 se objevují nové pojmy, jako je střední kvadratická chyba RMS = rms (směrodatná odchylka) a chyba určení vzdálenosti uživatele (URE), všechny uvedené pojmy budou vysvětleny později.

Selektivní dostupnost (SA)

Jelikož systém GPS je vojenský, byla zpočátku snaha, aby v civilní sféře z bezpečnostních a strategických důvodů nebylo dosahováno takových přesností. Proto americká armáda zavedla v roce 1990 tzv. selektivní dostupnost. Hlavním úkolem SA bylo snížit přesnost měření vzdálenosti, což se uskutečnilo změnou efemerid obsažených v navigační zprávě a hodinového kmitočtu družic. Roku 2000 vynesl prezident USA rozhodnutí o vypnutí SA, které platí do současnosti (rok 2012). Prezidentské usnesení pomohlo zlepšit přesnost určení polohy ze 100 m až na cca. 15 m (obr. 5).



Obr. 5 Průběh snižování chyby určení vzdálenosti uživatele (URE). [21]

Satelitní hodiny

Satelity využívají velmi přesné atomové hodiny, ale i přesto se u nich vyskytuje každé 3 hodiny chyba asi 10^{-9} sekundy, která způsobí ve vzdálenosti od přijímače k satelitu nepřesnost 30 cm. [14]

Hodiny přijímače

Chyby hodin se projevují v měřené délce. Využívají se levné hodiny, ve kterých se chyba odstraňuje výpočtem, a to v případě, že měření probíhá minimálně čtyřmi družicemi ve stejném okamžiku. Pro určení polohy je zapotřebí minimálně čtyř rovnic o čtyřech neznámých (X, Y, Z, T), kde čtvrtou neznámou je chyba hodin přijímače. Platí, že přesnost se zvyšuje s narůstajícím počtem sledovaných družic.

Chyba efemerid družice

Dráhy družic jsou sledovány z několika monitorovacích stanic. Jejich korekce jsou posílány na satelity, kde se dále přeposílají do uživatelských přijímačů GPS. Tyto korekce způsobí chybu v určení polohy několik metrů.

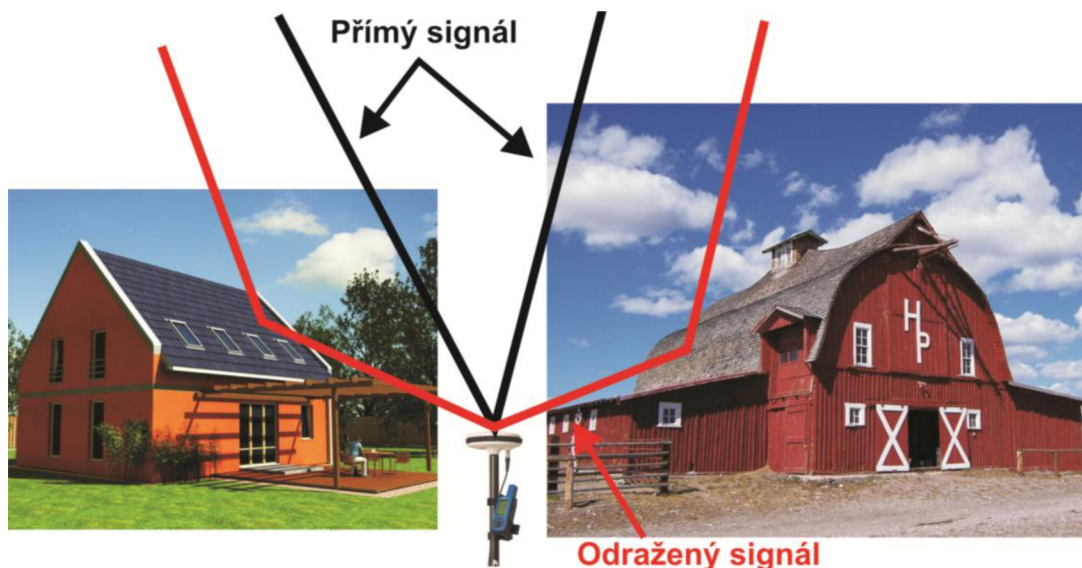
Chyby ionosféry a troposféry

Vlivem proměnlivé sluneční aktivity se rychlost šíření elektromagnetické vlny mění, přičemž dochází ke zpoždění signálu. Příčinou je měnící se index lomu, který ovlivňuje ohyb dráhy a v důsledku jeho změny dochází k prodloužení doby šíření. Tento jev je závislý jak na intenzitě slunečního záření, tak na denní době. Při průchodu rádiového signálu ionosférou dochází ke zpoždění, které je závislé na frekvenci. Chyba určování pseudovzdálenosti způsobená ionosférou dosahuje hodnot 50 - 150 m za předpokladu, že je družice blízko horizontu z pohledu přijímače. Chyba je snižována přenosem parametru ionosféry v navigační zprávě až o cca 50 % a lze ji eliminovat pomocí dvoukmitočtového přijímače. Troposféra může způsobit chybu od 2 do 20 m a závisí na vlhkosti a tlaku vzduchu. Zpoždění v troposféře nezávisí na kmitočtu. Zpravidla se provádí korekce využívající matematického modelu troposféry.

Vícecestné šíření signálu (Multipath)

Nastává v případě, kdy přijímaný signál se odrazí od okolních objektů s vysokým odrazným povrchem (např. kovové povrchy) obr. 6, dochází ke snížení přesnosti, protože anténa přijímače přijímá dva signály, a to:

- signál přímo z družice,
- nepřímý signál vzniklý odrazem.



Obr. 6 Vícecestné šíření (Multipath).

Díky interferenci dvou signálů v přijímači se určí chybná zdánlivá vzdálenost mezi satelitem a přijímačem. Chyba vzniklá intenzí interferencí závisí na schopnosti antény snižovat vliv odražených signálů a na koeficientu odrazu odpovídající danému povrchu, a pohybuje se řádově v metrech. [10, 14]

Jaký je potřebný počet viditelných družic?

Jak už bylo řečeno, do přijímače musí přijít signály minimálně ze čtyř viditelných družic. Pro přesnější měření se používá pět a více satelitů.

Geometrické uspořádání družic

Přesnost určování polohy je závislá na tom, jak jsou družice geometricky uspořádány. V případě, že jsou družice umístěny blízko sebe v malé oblasti, jsou výsledky přesnosti horší. Nejpresnějších výsledků dosáhneme tehdy, pokud družice jsou v postavení nejvzdálenějším od sebe, tzn. jedna v nadhlavníku a zbývající tři cca. 20° nad obzorem, přičemž svírají úhel 120°. K matematickému ohodnocení kvality geometrického uspořádání družic se využívá základního parametru, který se nazývá DOP (Dilution of Precision).

DOP neboli snížení přesnosti je ukazatelem kvality určení polohy nebo času. Parametr určující polohu vychází z relativní polohy jednotlivé družice vzhledem k družicím ostatním. Z hodnoty DOP je možno stanovit přesnost parametru, která vychází z uspořádání družic. Jestliže je hodnota DOP nižší, znamená to, že družice jsou umístěny vůči sobě tak, že určení polohy a času odpovídá vyšší přesnosti. Naopak vyšší hodnota DOP znamená, že družice jsou nevhodně uspořádány a výsledkem je, že dosažená přesnost je horší. [10, 14, 27] Parametry DOP lze rozdělit na:

- vertikální (VDOP) – jednorozměrný faktor snížení přesnosti vertikální polohy:

$$VDOP = \frac{1}{\sigma_d} \sqrt{\sigma_z^2},$$

pak pro přesnost polohy ve vertikálním směru platí: $\sigma_d \cdot VDOP$,

- horizontální (HDOP) – dvourozměrný faktor snížení přesnosti horizontální polohy:

$$HDOP = \frac{1}{\sigma_d} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2},$$

pak pro přesnost polohy v horizontální rovině platí: $\sigma_d \cdot HDOP$,

- polohová (PDOP) – trojrozměrný faktor snížení přesnosti polohy ve směrech x, y, z:

$$PDOP = \frac{1}{\sigma_d} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2},$$

pak pro přesnost polohy v třírozměrném prostoru platí: $\sigma_d \cdot PDOP$,

- časové (TDOP) - faktor snížení přesnosti korekce hodin přijímače uživatele:

$$TDOP = \frac{1}{\sigma_d} \sqrt{\sigma_T^2},$$

pak pro přesnost času určení polohy platí: $\sigma_d \cdot TDOP$,

- geometrický (GDOP) – faktor snížení přesnosti pro určení polohy zařízení uživatele:

$$GDOP = \frac{1}{\sigma_d} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_T^2},$$

pak pro geometrickou přesnost třírozměrné polohy a času platí: $\sigma_d \cdot GDOP$,

kde $\sigma_d = \sigma_{URE}$ – směrodatná odchylka měření pseudovzdálenosti,

σ_x - směrodatná odchylka ve směru sever – jih,

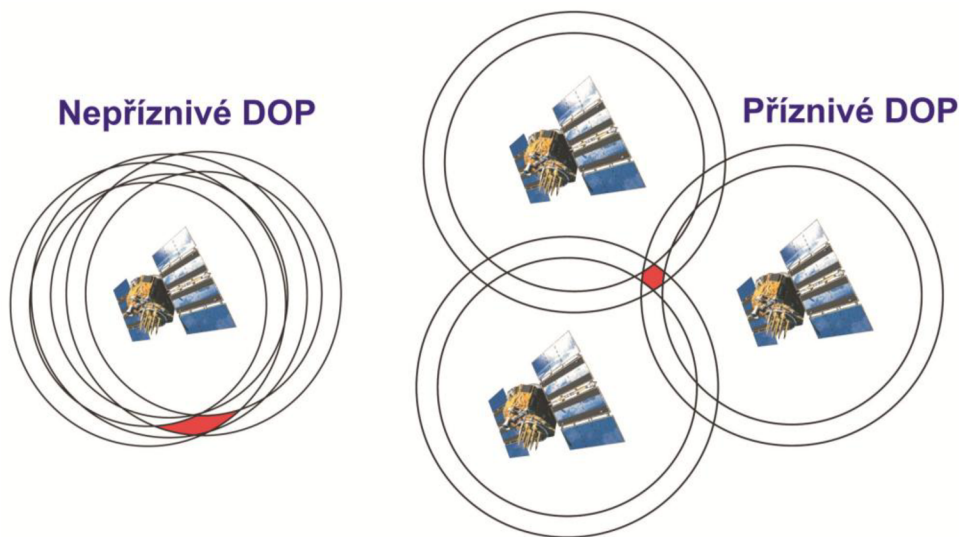
σ_y - směrodatná odchylka ve směru východ – západ,

σ_z – směrodatná odchylka ve vertikálním směru,

σ_T - směrodatná odchylka posunu hodin přijímače. [7, 11]

Parametr PDOP se využívá nejčastěji. Bod, který je určován, se nachází v průsečíku kulových ploch. Kulové plochy mají své středy v družicích, přičemž velikosti poloměrů jsou vzdálenostmi přijímače od příslušných družic. Vzhledem k tomu, že měření vzdáleností není ideálně přesné, nedochází k protnutí kulových ploch v jednom bodě, ale dochází k ohraničení určitého prostoru, přičemž určený bod se bude nacházet v tomto prostoru.

Názorně je to uvedeno ve dvourozměrném zobrazení na obr. 7. Nejvyšších přesností je dosažováno, pokud je objem daného prostoru nejmenší, tzn. pokud se vektory kulových ploch protínají kolmo. Jestliže však družice jsou blízko sebe a vektory kulových ploch se protínají v ostrém úhlu, je objem vymezeného prostoru velký a přesnost určení polohy je malá (obr. 7 vlevo). [14, 10, 27] U praktických měření v civilním letectví platí, že pokud hodnota PDOP je menší nebo rovna 2, je uspořádání družic vhodné a zaručuje přesné určení polohy.



Obr. 7 Ukázka příznivé a nepříznivé chyby DOP. [36]

Shrnutí zdrojů chyb GPS (UERE)

Pokud sečteme všechny vlivy snižující přesnost GPS mimo parametr DOP, dostaneme tzv. UERE (User Equivalent Range Error). Studijní materiály [7] uvádí, že se jedná o odhadovanou standardní odchylku měření pseudovzdálenosti (vzdálenost mezi satelitem a přijímačem) uživatele. Informace o chybách UERE se přenáší pomocí satelitů a lze ji vyjádřit součtem chyby určení vzdálenosti uživatelem URE (User Range Error) a chyby uživatelského zařízení UEE (User Equipment Error). URE se skládá ze zdrojů chyb, které vznikají v kosmickém a řídicím segmentu, přičemž nezahrnuje chyby, jako je multipath a šum přijímače. Mezi takové zdroje chyb lze zařadit například predikce perturbací družice, chyba modelu predikce efemerid a stabilita kmitočtového normálu družice. Jako příklad chyby UEE lze uvést chybu vícecestného šíření signálu a chybu přijímače. Matematicky UERE lze vyjádřit jako odmocninu ze součtu kvadrátů středních kvadratických chyb (směrodatných odchylek – rms) systému GPS: [22]

$$\sigma_{UERE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n rms_i^2} \quad (1.1)$$

Ukázka výpočtu horizontální přesnosti určení polohy

Pro horizontální přesnost určení polohy s pravděpodobností 95 %, se užívá míry přesnosti nazývané dvojnásobná střední kvadratická chyba (2 drms). Z názvu vyplývá, že se jedná o dvojnásobnou hodnotu střední kvadratické chyby σ_{UERE} (rms). Abychom přesnost vypočítali, je zapotřebí znát parametry UERE = σ_{UERE} a parametr snížení přesnosti DOP, které uvádí tab. 2. V našem případě se bude jednat o horizontální snížení přesnosti HDOP. Matematický výpočet je následující:

- výpočet střední kvadratické chyby rms (σ_{UERE}), za použití dat z tab. 2.
Z rovnice 1.1 platí: $\sigma_{UERE} = \sqrt{(3,1^2 + 7,3^2 + 0,2^2 + 0,7^2)} = 7,9 \text{ m}$,
- pro přesnost polohy v horizontální rovině platí $HDOP \cdot \sigma_{UERE}$, avšak pro pravděpodobnost 95 % platí: $HDOP \cdot 2 \text{ drms} = HDOP \cdot 2\sigma_{UERE}$, dosadíme hodnoty z tab. 2 a dostaneme pro horizontální přesnost určení polohy:
- $1,2 \cdot 2 \cdot 7,9 = 19,1 \text{ m}$. Získanou hodnotu porovnejme s daty v tab. 2, přičemž zjistíme, že výpočet chyby pseudovzdálenosti UERE odpovídá uvedené hodnotě.

Tab. 2 Typický model horizontální přesnosti uvedený standardem SPS: [28]

Parametr	Hodnota v metrech
Chyba signálu v prostoru (rms)	3,1
Chyba ionosférické refrakce (rms)	7,3
Selektivní dostupnost (SA) – vypnuta	0
Chyba troposférické refrakce (rms)	0,2
UEE – multipath a chyba přijímače (rms)	0,7
Celková UERE	7,9
Typický HDOP	1,2
Horizontální přesnost určení polohy (95%)	19,1

Parametry používané pro charakterizování chyby GNSS

V terminologii GNSS se užívají následující pojmy pro charakterizování chyby polohy uživatele:

- **střední kvadratická chyba (rms - root mean square)** - je možné ji definovat jako druhou odmocninu z průměru druhých mocnin chyb,
- **dvojnásobná střední kvadratická chyba 2 drms** - lze ji definovat jako dvojnásobnou hodnotu veličiny rms horizontálních chyb,
- **R95%** - je možné ji definovat jako poloměr kružnice, která obsahuje 95 % určených poloh a má střed ve skutečné poloze antény. Tato chyba se nejvíce používá pro vyjádření přesnosti ve spojitosti se systémem GPS. Údaj je zpravidla doplněn označením (95 %). Příklad zápisu označení je 50 m (95 %),
- **SEP (Spherical Error Probable)** - jedná se o prostorovou chybu s pravděpodobností 50 %, že se poloha uživatele nachází v tomto kulovém prostoru. Střed koule je ve skutečné poloze antény,

- **CEP (Circular Error Probable)** - jedná se o chybu v horizontální rovině s pravděpodobností 50 %, že se poloha uživatele nachází v kružnici. Střed kružnice je ve skutečné poloze antény. [4, 7]

Souhrn těchto měř přesností uvádí tab. 3, která obsahuje pravděpodobnosti a to, pro jaké rozměry určování polohy se používají.

Tab. 3 Míry přesnosti, pravděpodobnosti a způsob použití pro všechny tři rozměry určování polohy: [7]

Rozměr	Míra přesnosti	Pravděpodobnost [%]	Použití
1D	rms	68	Ve vertikálním směru
2D	CEP	50	V horizontální rovině
	rms	63 - 68	
	R 95	95	
	2 drms	95 - 98	
3D	rms	61 - 68	V třírozměrném prostoru
	SEP	50	

1.2 Evropská rozšiřující služba EGNOS

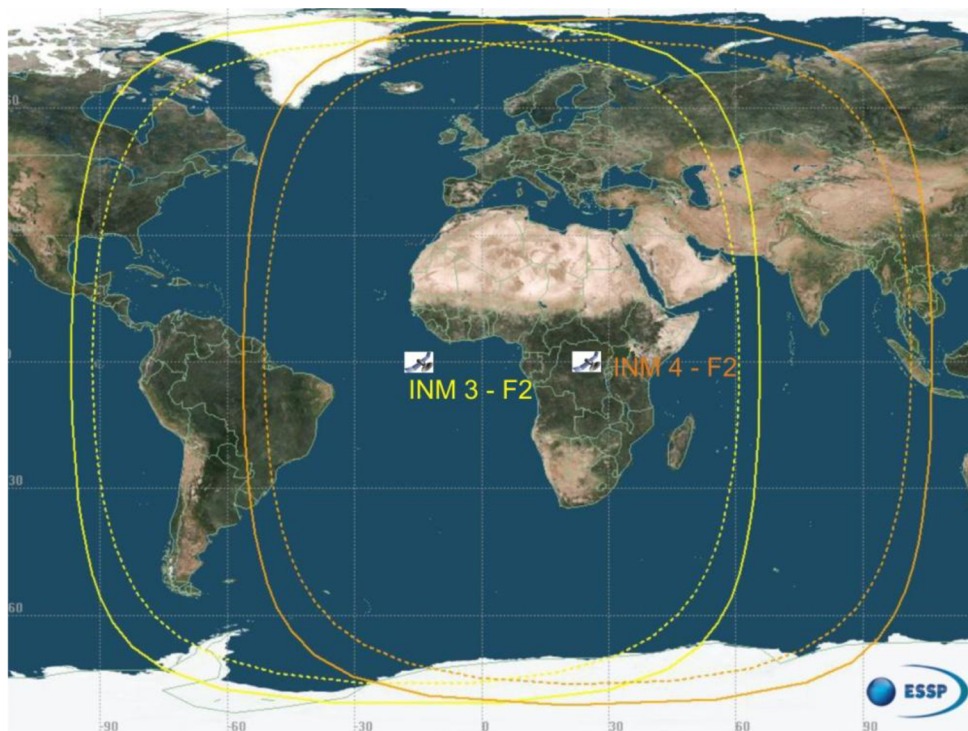
Jedná se o první celoevropský satelitní navigační systém, který začal svoji činnost v roce 2009 pod projektem evropské kosmické agentury ESA (European Space Agency) a pro potřeby civilního letectví je možné jej používat od 1. března 2011. Jeho signály v kombinaci se systémem GPS poskytují uživateli přesnější určení polohy, zajišťují informace o spolehlivosti GPS signálu (integritu dat) a to je důvod jeho užití v civilním letectví. Data integrity poskytovaná službou jsou vhodná zejména pro aplikace vedení letu za přísných bezpečnostních omezení v kritických fázích navigace, jako je přistávání letadla. Výkonnost systému má vyhovovat ve všech fázích letu od navigace po trati až po přesné přístrojové přiblížení kategorie I. ICAO. Splnění požadavků na spolehlivost, přesnost a integritu lze docílit prostřednictvím:

- vysílání dálkoměrného signálu geostacionárními satelity, což umožní doplnit viditelné satelity a zvýší se dostupnost signálu,
- vysílání informací o integritě systému pomocí signálu, což způsobí zvýšení spolehlivosti navigační služby na úroveň, která bude vyhovovat přístrojovému přiblížení,
- použití oblastních korekcí, které zvýší celkovou výkonost navigační služby. To přinese zvýšení přesnosti až na úroveň, která bude vyhovovat přiblížení s vertikálním vedením (APV). [7]

1.2.1 Kosmický segment

Kosmický segment je tvořen geostacionárními družicemi (viz obr. 8):

- INMARSAT - 3F2 (AOR - E), která je umístěna na zeměpisné délce 15,5° W,
- INMARSAT - 4F2 (IND), která je umístěna na zeměpisné délce 25,0°E,
- původně zde byl i satelit ESA Artemis na zeměpisné délce 21,5°E, který není momentálně v operativním stavu. [15]



Obr. 8 Rozmístění geostacionárních satelitů EGNOS. [15]

Údaj o pozici družic je aktuální z 2. března 2012. Satelit Artemis byl stažen z operačního režimu, protože jeho stav se zhoršoval stárnutím. Do konce března 2012 by měl satelit INMARSAT 4F2 nahradit družici Artemis. To umožní zlepšení viditelnosti v severní oblasti ECAC. Všechny uvedené geostacionární družice vysílají oblastní korekce a údaje o integritě a k tomu ještě dálkoměrný signál systému GPS, který lze použít pro určení polohy. Tyto satelity jsou komunikační a šíří signál pouze ze Země. Jejich dálkoměrný signál musí být generovaný a synchronizovaný v příslušném středisku NLES.

1.2.2 Pozemní segment

Skládá se ze sítě 34 referenčních monitorovacích stanic RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations), které jsou napojené na 4 hlavní řídicí centra MCC (Master Control Centres). Referenční stanice přijímají signály vysílané satelity GPS, GLONASS a geostacionárními satelity. Signál je synchronizován pomocí atomových hodin a jsou v něm vylučovány vlivy vícecestného šíření signálu a místních interferencí a detekovány případné anomálie. Přenášené informace zpracovávají řídicí centra, která vytvářejí oblastní korekce a centrálně sledují systém.

Oblastní korekce a informace o integritě jsou posílány na geostacionární družice pozemní navigační stanicí NLES (Navigation Land Earth Stations). Další podpora systému je zajišťována středisky PACF (Performance Access Checkout Facility) a ASQF (Application Specific Qualification Facility). Propojení a přenos dat mezi všemi pozemními středisky zajišťuje vysokorychlostní síť EWAN (EGNOS Wide Area Communication Network). [7]

1.2.3 Služby poskytované systémem EGNOS

EGNOS je navržen k vysílání těchto tří služeb, a to:

Otevřená služba (Open Service)

Služba poskytování komerčních dat (Commercial Data Distribution Service)

Služba kritická z hlediska bezpečnosti (Safety of Life service)

Splňuje specifické požadavky v oblasti letectví. Služba je založena na poskytování integrity dat pomocí signálů satelitů. K dispozici jsou dva druhy služeb, které odpovídají požadavkům mezinárodního civilního letectví (ICAO). Je to služba pro nepřesné přístrojové přiblížení (NPA - Non Precision Approach) a služba pro přístrojové přiblížení s vertikálním vedením (APV - Approach with Vertical). [16]

1.2.4 Výkonnost systému EGNOS

Mezi hlavní parametry výkonnosti systému EGNOS se řadí:

Přesnost

Jedná se o hlavní přednost vůči americkému systému určení polohy GPS. Zvýšení přesnosti rozšiřující systém EGNOS uskutečňuje pomocí zveřejňování diferenciálních korekcí GPS (přenos informací o oběžné dráze družice, korekce GPS hodin a ionosféry). Horizontální přesnost se pohybuje v rozsahu 1 - 3 m (95 %) a vertikální přesnost 2 - 4 m (95 %). Porovnání přesnosti mezi systémy EGNOS a GPS uvádí tab. 4. Kromě toho, rozšiřující evropský systém byl navržen tak, aby v případném aktivování selektivní dostupnosti (SA) byl použitelný pro civilní sféru.

Tab. 4 porovnání horizontální přesnosti GPS a EGNOS: [36]

Druh chyby	GPS	EGNOS
Synchronizace hodin a oběžné dráhy	1 m	0,5 m
Troposferická refrakce	0,25 m	0,25 m
Ionosferická refrakce	2 m	0,3 m
Šum přijímače	0,5 m	0,5 m
Multipath	0,2 m	0,2 m
UERE	2,31 m	0,83 m
HDOP	1,1 m	1,1 m
HDOP x UERE (rms)	2,54 m	0,94 m
Horizontální přesnost (2 drms, 95 %)	5,08 m	1,84 m

Uvedené hodnoty chyb v tab. 4 ukazují na velký přínos systému EGNOS při určení polohy. Horizontální přesnost (2 drms) se zvýšila oproti systému GPS až o 63,8 %. EGNOS poskytuje extrémně dobrou stabilitu v čase. Data uvedená v tabulce představují průměrné hodnoty chyb naměřené vůči minimálnímu počtu satelitů, tj. čtyři. Jsou proměnlivá, protože záleží na místě, ve kterém se uskuteční měření. Jiné hodnoty naměřím v ČR a jiné v Norsku.

Integrita

Poruchy a chyby systému GPS závisí na rozmístění satelitů na hvězdné sféře. Tyto chyby mohou výrazně ohrozit uživatele, pokud není včas varován a uvědomen o možném rozsahu použití daného systému. Integrita je důležitým výkonnostním parametrem, který takové informace poskytuje. Systém EGNOS za pomoci integrity pomáhá uživatelům vypočítat interval spolehlivosti systému a varovat je, zda systém GPS selhává nebo poskytuje správně své služby. Údaje poskytované evropským SBAS zahrnují odhady chyb oběžných drah družic, chyb atomových hodin a chyby způsobené průchodem přes ionosféru. Všechny tyto údaje pomáhají uživateli vyhodnotit maximální možnou chybu (limit chyby) jeho polohy.

Hlavními charakteristikami integrity jsou:

- mez výstrahy (alarm limit),
- úroveň ochrany (protection level),
- riziko integrity (integrity risk),
- doba do výstrahy (time to alarm). [36]

Pokud chyba polohy uživatele překročí limit výstrahy, pak musí být uživatel informován varujícím signálem. Informující signál musí být uživateli vyslán v rámci doby do výstrahy. Pravděpodobnost toho, že signál není poslán uživateli v době do výstrahy, musí být menší než hodnota rizika integrity. Požadavky na integritu pro potřeby civilního letectví je možné najít v kapitole 2.2. Úroveň poskytované výkonnosti integrity systémem EGNOS je uvedena v tab. 5.

Tab. 5 Hodnoty parametrů integrity poskytované EGNOS: [17]

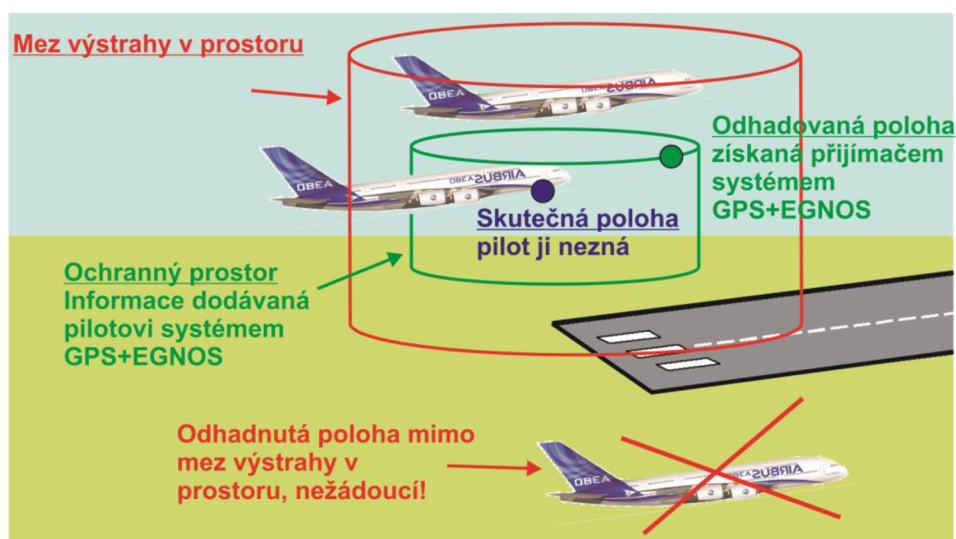
Parametr integrity	Úroveň výkonnosti integrity
Riziko integrity	2×10^{-7} / za 150 s
Doba do výstrahy	Menší než 6 s
Mez výstrahy ve vertikálním směru	50 m
Mez výstrahy v horizontálním směru	40 m

Jak již bylo napsáno, EGNOS mimo jiné poskytuje informace o integritě systému. Každému módu je přiděleno konkrétní požadované riziko integrity (četnost nebezpečné nedetekované poruchy). Pro mód PA (Precision Approach) se uvádí maximální četnost nebezpečné nedetekovatelné poruchy 2×10^{-7} za dobu 150 s a pro mód En Route (let po trati) 1×10^{-7} za 1 hodinu. Tyto hodnoty jsou odvozeny z leteckých požadavků na základě statistických údajů o leteckých nehodách. Systém EGNOS již plní požadavek na integritu pro přiblížení CAT I, avšak nedosahuje dostačující kontinuity. V provozu je tedy nemožné ho použít pro přesné přiblížení CAT I.

Požadovaná doba do výstrahy 6 s je čas potřebný k vyslání varovného signálu od okamžiku, kdy nastane překročení limitu výstrahy u uživatele, do okamžiku, kdy dorazí k uživateli a varuje ho. Jedná se o hlavní parametr z hlediska kritičnosti při návrhu systému

EGNOS. V praxi se aktuální chyby polohy odhadují a tento odhad se nazývá úroveň zabezpečení (XPL, kde X určuje buď horizontální rovinu H, nebo vertikální rovinu V). Úroveň zabezpečení zaručuje, že poloha letounu bude zajištěna za daných podmínek s požadovanou četností poruch. XPL se porovnávají s mezemi výstrahy. V civilním letectví při fázích přiblížení musí být úroveň zabezpečení (XPL) menší než mez výstrahy (XAL).

Vztah mezi úrovní zabezpečení XPL (ochranným prostorem) a mezi výstrahy ukazuje obr. 9. Pilot na palubě nezná svoji skutečnou polohu, dostává pouze odhad ochranného limitu, ve kterém se musí pohybovat. Na systémy GNSS jsou kladeny požadavky na přesnost. Může nastat situace, kdy skutečná poloha překročí požadovanou přesnost danou předpisem L10, ale protože úroveň zabezpečení nepřekročí mez výstrahy, tak se pilot o této skutečnosti nedozví. Aby byl zabezpečený normální provoz, musí platit, že skutečná poloha musí být menší, než odhadovaná úroveň zabezpečení (XPL) a ochranný prostor nesmí překročit mez výstrahy.



Obr. 9 Princip integrity.

Podle předpisu L10 se úroveň zabezpečení XPL hodnotí v horizontálním směru (HPL) jak pro NPA, tak pro APV. HPL lze definovat jako poloměr kruhu v horizontální rovině, ve kterém se nachází skutečná poloha letadla. Výpočet horizontální úrovně zabezpečení provádí přijímač systému EGNOS. Pro výpočet se využije vztahu: [36]

$$HPL = K_{H,NPA} \cdot d_{major} \quad (1.2)$$

Kde $K_{H,NPA}$ je koeficient zohledňující letecké požadavky na četnost poruch, který má pro nepřesné přístrojové přiblížení hodnotu 6,18 a pro přístrojové přiblížení s vertikálním vedením má hodnotu 6. [17, 36] Ve vztahu 1.2 d_{major} představuje přijímačem odhadnutou maximální hodnotu směrodatné odchylky naměřených bodů v horizontální rovině. Vypočtená hodnota HPL obsahuje vlivy hardwarových a softwarových chyb systému GPS/EGNOS, vliv chyb efemerid GPS družic, vliv geometrie družic, vliv ionosférické a troposférické refrakce a chybu časového normálu využívaného ve výpočtu tak, jak vyžaduje předpis L10 k systému rozšíření SBAS.

Dostupnost

EGNOS poskytuje v současnosti pro členské státy ECAC dostupnost služeb po 99 % času v civilním letectví pro přístrojové přiblížení s vertikálním vedením prvního typu APV I [36]. Požadavky pro APV I jsou uvedeny v kapitole 2.

1.3 Parametry kvality radionavigačních zařízení

Výkon navigačního systému je charakterizován kvalitativními parametry. Tyto parametry kvality se vztahují ke všem navigačním prostředkům, jako jsou systémy DME, VOR, ILS, MLS až GNSS atd. Informace využitě pro porovnání systémů jsou čerpány z federálního radionavigačního plánu z roku 2010 (FRP - Federal Radionavigation Plan) [18] a z průvodce systému EGNOS [36]. Pro porovnání uvedeme pouze některé příklady radionavigačních zařízení. Výkonnost navigačních systémů ovlivňují následující parametry:

Přesnost (accuracy)

Stupeň shody mezi odhadovaným (měřeným) parametrem objektu a skutečnou hodnotou tohoto parametru v daném čase. Přesnost navigačních systémů je obvykle prezentována jako statistická měrná jednotka chyby systému a společně se spolehlivostí udávají pravděpodobnost dané hodnoty. V mnoha případech se užívá 95% spolehlivosti. Existují tři typy přesnosti:

Absolutní (předvídatelná) přesnost

Přesnost, kterou získáme řešením polohy pomocí navigačního zařízení s ohledem na skutečnou polohu.

- VOR – chyby pozemní stanice jsou přibližně $\pm 1,4^\circ$. Shrnutí chyb výběru kurzu, přijímače a chyby technického letu (FTE) za použití výpočtu pomocí RSS (Root - Sum - Squared) technik je $\pm 4,5^\circ$,
- DME – chyby pozemní stanice jsou menší než $\pm 185,2$ m. Celková chyba systému (palubní + pozemní chyba systému) nesmí přesáhnout ± 926 m nebo 3 % vzdálenosti.

Opakovatelná přesnost

Přesnost, se kterou se uživatel může vrátit do pozice, jejíž souřadnice byly určeny v předchozí době stejným navigačním systémem.

- VOR – chyba pozemního segmentu se neliší od chyby přijímače v krátkodobém intervalu. Proto opakovatelná chyba se bude skládat převážně z technické chyby letu (schopnost pilota létat podle radionavigačního zařízení) a její hodnota je $\pm 2,3^\circ$,
- DME – chyba pozemního segmentu se neliší od chyby přijímače.

Relativní přesnost

Přesnost, se kterou uživatel může určit pozici vzhledem k jinému uživateli užívajícího stejný navigační systém ve stejném okamžiku.

- VOR - hlavní relativní chyba se skládá z volby kurzu, chyby přijímače a technických komponent letadla. V případě užití RSS techniky je vypočtená hodnota relativní chyby přibližně $\pm 4,3^\circ$ a pro pozemní stanici VOR $\pm 0,35^\circ$,
- DME – hlavní relativní chyba se skládá z chyby přijímače a technické chyby letu.

Dostupnost (availability)

Procento času, během kterého je systém použitelný, je ukazatelem schopnosti systému poskytovat použitelné služby ve stanovené oblasti pokrytí. Tento výkonnostní parametr kvality pro signál je prezentován jako čas v procentech, za který jsou navigační signály vyslané externími zdroji dostupné pro použití. Na dostupnost mají vliv jak fyzikální charakteristiky životního prostředí, tak technické možnosti vysílajícího zařízení.

- **EGNOS** - v současnosti je k dispozici po 99 % doby v oblasti civilního letectví pro službu přístrojového přiblížení s vertikálním vedením APV I v oblasti ECAC,
- **VOR** – typická dostupnost pro systém VOR je 99 – 99,99 %,
- **DME** – dostupnost DME se blíží až k hodnotě 100 %.

Integrita (integrity)

Schopnost daného systému poskytovat uživatelům včasné varování v případě, že systém nesmí být použit pro navigaci.

- **EGNOS** – je snaha, aby hodnota integrity dosahovala co nejnižších hodnot a kombinace systému GPS/EGNOS mohla být použita pro všechny fáze letu. Hodnoty integrity jsou 2×10^{-7} za 150 s pro riziko integrity, 6 s pro čas do výstrahy, 50 m pro limit horizontální výstrahy a 40 m pro limit vertikální výstrahy,
- **VOR** - integrita systému je zajištěna tím, že dochází k informování o nefunkčnosti systému do 10 s,
- **DME** - integrita systému je zajištěna tím, že dochází k informování o nefunkčnosti systému do 10 s.

Spolehlivost (reliability)

Jedná se o pravděpodobnost provedení určité funkce bez poruchy za daných podmínek na určitou dobu. Formálně se zapisuje jako $1 - P(s)$, kde $P(s)$ představuje pravděpodobnost selhání systému.

- **VOR** - spolehlivost systému VOR se v případě pevné konstrukce a monitorování údržby blíží až ke 100 %,
- **DME** – spolehlivost dálkoměrného systému DME se v případě pevné konstrukce a pečlivého monitorování údržby blíží ke 100 %.

Kapacita (capacity)

Udává počet uživatelů, kteří mohou současně užívat navigační zařízení.

- **EGNOS** – kapacita systému je neomezená,
- **VOR** – kapacita stanice VOR je neomezená,
- **DME** – v současnosti má kapacitu pro 110 odpovídačů (letadel). [18, 36]

Pokrytí (coverage)

Plocha nebo prostor poskytovaný radionavigačním systémem, kde je výkon systému dostatečný k určení polohy na určité úrovni přesnosti. Na pokrytí má vliv několik činitelů, jako jsou geometrie systému, úroveň síly signálu, hluk, citlivost přijímače a další faktory ovlivňující dostupnost signálu. Pokrytí systému VOR a dálkoměrného systému je shrnuto v tab. 6.

- EGNOS – kompletní servis pokrývá vzdušný prostor států ECAC.

Tab. 6. Pokrytí VOR/DME/TACAN podle SSV: [18]

Dělení podle SSV (Standardní objemová služba)	Limitující výška a radiální dosah
T (terminál)	1000 – 12000 ft (AGL – nad úroveň terénu), 46, 3 km
L (nízká nadmořská výška)	1000 – 18000 ft(AGL), 74,08 km
H (vysoká nadmořská výška)	1000 – 14500 ft (AGL), 74,08 km 14500 – 60000 ft (AGL), 185,2 km 18000 - 45000 ft (AGL), 240,76 km

Dimenze (dimension)

Určuje, zda navigační systém nabízí jedno -, dvou - nebo třírozměrný prostor. Některé systémy využívají i čtyřrozměrný prostor.

- EGNOS – poskytuje určení polohy ve třírozměrném prostoru a přesnou časovou informaci,
- VOR - ukazuje ve stupních magnetický směr k radiomajáku VOR (QDM) a odchylku od letového kurzu,
- DME – systém měří šikmou vzdálenost ke stanici DME v námořních mílech (nm).

Rychlost aktualizace (update rate)

Definována jako počet nezávislých řešení pozice za jednotku času.

- EGNOS – tento systém umožňuje prakticky nepřetržitou aktualizaci informací o poloze,
- VOR - nepřetržitě aktualizuje odchylky od zvoleného kurzu rychlostí 30 krát za sekundu. Při zapnutí monitoru VOR je informace zobrazena do 1 minuty, tento čas se bude lišit v závislosti na kvalitě přijímače,
- DME – lze tvrdit, že systém v podstatě poskytuje průběžnou informaci o vzdálenosti objektu. Aktualizace informací polohy probíhá 10 krát za sekundu a může se měnit v závislosti na kvalitě palubního vybavení.

Dvojnáčnost (ambiguity)

Nastává, když navigační systém identifikuje dvě nebo více možných pozic objektu pomocí stejných měření a bez ukazatelů, která poloha je správná. Dvojnáčnost systému musí být identifikována a řešena.

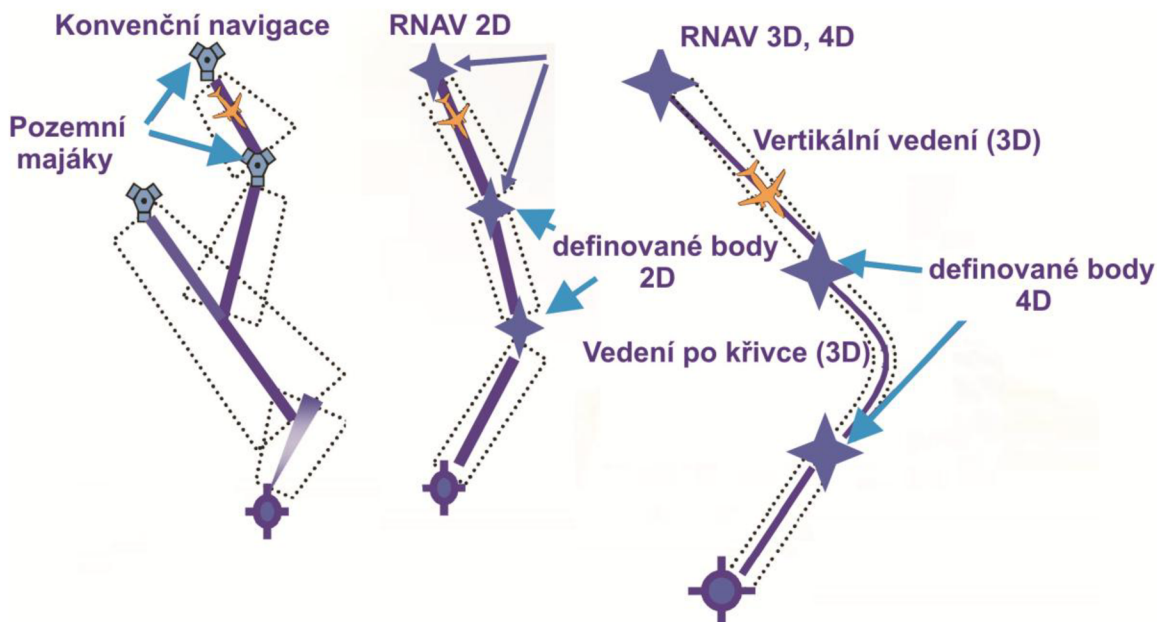
- EGNOS – u systému se nevyskytuje dvojnáčnost,
- VOR – pro stanice VOR neexistuje dvojnáčnost,
- DME – u dálkoměrů se nevyskytuje dvojnáčnost. [18, 36]

2 NAVIGACE ZALOŽENÁ NA VÝKONNOSTI (PBN)

Jeden z nejdůležitějších kvalitativních parametrů GNSS je přesnost, kterou je nutné neustále zlepšovat, aby se dosáhlo požadované výkonnosti předpisem. V této kapitole je popsán nový koncept PBN, jehož cílem je v oblasti civilního letectví přejít od využívání konvenčních navigačních zařízení k satelitní navigaci. V současnosti v manuálu PBN (Performance – Based Navigation) jsou definovány dva způsoby využívání vzdušného prostoru. Patří mezi ně RNAV (Area Navigation) a RNP (Required Navigation Performance), které mají na starosti zvýšení efektivity využití vzdušného prostoru. PBN prezentuje obecné požadavky na navigaci z pohledu civilního uživatele a přináší mnoho výhod oproti konvenčnímu způsobu letecké navigace. Výhody koncepce PBN:

- pomůže snížit počet pozemních stanic navigačních majáků a počet zakřivení letových cest,
- umožní snížit počet používaných druhů systému pro navigaci a plně využít výhody systému GNSS,
- zvýší efektivitu využití vzdušného prostoru a technických vlastností letadel, mezi které patří spotřeba paliva, snížení hluku, zkrácení času provedeného letu atd. [24]

PBN koncepce se satelitními systémy je již využita v civilním letectví pro nepřesné přístrojové přiblížení a přístrojové přiblížení s vertikálním vedením. Rozdíl navigace mezi konvenčními navigačními zařízeními a využitím RNAV a RNP ukazuje obr. 10. Je na něm vidět, že letoun za pomoci konvenční navigace musí letět k pozemním majákům, oproti tomu RNAV již umožní uživateli letět pomocí tzv. definovaných bodů v prostoru (waypoints).



Obr. 10 RNAV versus konvenční navigace. [25]

2.1 RNAV

Jedná se o metodu navigace, která umožní let podle přístrojů (IFR) do všech kurzů v rozsahu sítě definovaných bodů v prostoru, a to takovým způsobem, že uživatel nemusí přeletět pozemní maják. Jeho hlavní výhodou je naplánování libovolné trasy nebo kombinaci tras ve vzdušném prostoru. Může použít libovolnou kombinaci zdrojů, ale musí splňovat požadavky na navigační výkonnost (přesnost, integrita, kontinuita a dostupnost) během celé doby provedeného letu. Podrobněji požadavky na navigační výkonnost pro GNSS popisuje kapitola 2.3.

Obecně se dělí RNAV na LNAV (Lateral Navigation) a VNAV (Vertical Navigation). LNAV slouží k určení polohy letadla na dané trati v kterémkoliv okamžiku a VNAV je určen k optimalizování vertikálního průběhu tratě. [24]

2.2 RNP

RNP slouží k definování výkonu v navigaci, která poskytuje možnost letadlu letět mezi dvěma určenými body v 3D prostoru. Lze konstatovat, že RNP je v podstatě podobná RNAV, u RNP je jen více propracovaný definovaný požadavek na sledování navigačního výkonu a výstrahy před jeho snížením. Typy RNP jsou určeny čtyřmi základními výkonnostními parametry, jako jsou přesnost, kontinuita, integrita a dostupnost. Požadavky na RNAV a RNP se překrývají. Pro každou určitou oblast se požadavky musí jednoznačně stanovit. Přesnost RNP a RNAV se definuje pomocí čísla. Jako příklad lze uvést RNP 4 nebo RNAV 10 atd., kde číslo poskytuje informaci o velikosti maximální horizontální odchylky měřené v námořních mílích mezi skutečnou a vypočtenou polohou letadla po 95 % času.

V letectví může nastat situace, kdy letadlo je schválené do provozu pro RNP 1 a naopak není schváleno pro RNP 4. To naznačuje, že přesnost není jedinou podmínkou pro navigaci v dané kategorii. Proto se zavádí další kategorie RNAV nebo RNP. Jako příklad lze uvést B - RNAV a P - RNAV.

U základního typu B – RNAV (Basic RNAV) je přesnost určení polohy lepší než ± 5 nm po 95 % doby letu. Tento typ navigace byl zaveden v Evropě od počátku devadesátých let a vyhovuje požadavkům pro let po trati. V současné době je zaveden v celém vzdušném prostoru v evropském regionu. P - RNAV představuje přesnou prostorovou navigaci (Precision RNAV), která má určenou přesnost stanovení polohy rovnou nebo lepší než ± 1 nm po 95 % doby letu. Je určen pro navigaci v prostoru TMA a pomáhá zrychlit provoz a snížit rozestupy mezi přilétávajícími letadly. [24]

2.3 Požadavky na výkonnost GNSS

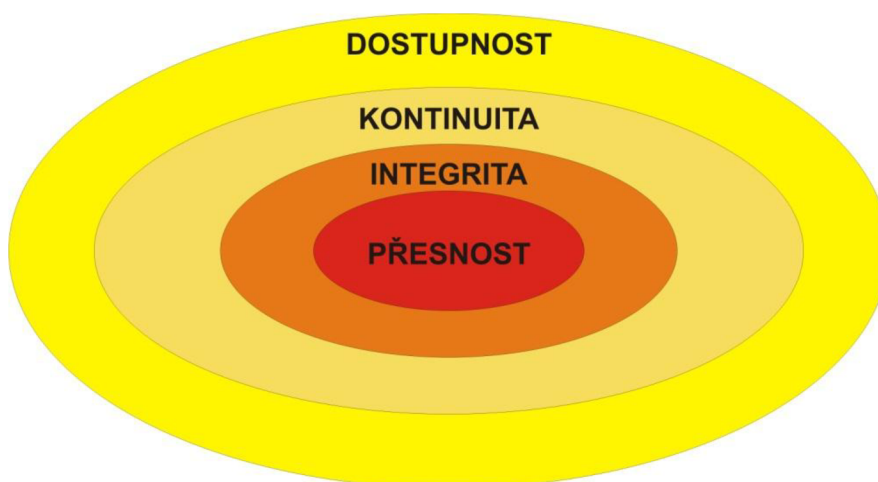
Mezi základní požadavky na výkonnost navigačního systému se řadí přesnost, integrita a doba do výstrahy, kontinuita a dostupnost. Požadavky, které popisuje tab. 7 pro jednotlivé fáze letu, není schopen systém GPS sám o sobě splnit. Proto se využívá rozšiřující systém EGNOS, který pomůže zvýšit všechny tyto výkonnostní parametry. Konkrétní požadavky pro Evropu dokončila v současnosti mezinárodní organizace pro civilní letectví ICAO v podobě standardů a doporučených postupů (SARPs). [3, 35]

Požadavky na výkonnost jsou uvedeny v příručce pro navigaci založenou na výkonnosti (Doc 9631 – Performance – Based Navigation Manual). Z této příručky bylo použito výchozí odvození požadavků na charakteristiky GNSS signálu v prostoru. Tyto požadavky splňují přísnější podmínky pro charakteristiky signálu v prostoru, protože systém GNSS bude využíván větším počtem letadel. Využívají se dva typy nepřesného přiblížení

s vertikálním vedením APV - I a APV - II. Výhodou poskytovanou těmito druhy nepřesného přiblížení je přiblížení na přistání bez radiolokačních prostředků. Služby APV - I, II jsou závislé na provozních požadavcích a infrastruktuře SBAS.

2.3.1 Přesnost

V případě GNSS přesnost lze definovat jako rozdíl mezi vypočítanou a aktuální polohou. Vyjadřuje se jako navigační systémová chyba NSE (Navigation System Error). Musí splňovat s minimální pravděpodobností 95 %, že chyba polohy se nachází v mezích požadavků na přesnost. Je jediným samostatným ukazatelem kvality RNP a zároveň slouží jako základní stavební kámen pro ostatní ukazatele kvality RNP – viz obr. 11. [3, 35]



Obr. 11 Vztah mezi ukazateli kvality signálu GNSS.

U systému jako je VOR nebo ILS jsou relativně reprodukovatelné chybové charakteristiky. Proto jejich výkonnost lze měřit v krátké době (jako příklad lze uvést měření během inspekčního letu) a jedním z předpokladů je, že přesnost systému se po ukončení testu nezmění. U GNSS dochází ke změně chyby v závislosti na čase. Je to způsobené oběhem družic a chybovými charakteristikami GNSS, které jsou proměnlivé s časem. Na samotnou přesnost má vliv rozdílné umístění družic (popsáno v kapitole 1. 1. 3).

Na systémy GNSS jsou kladeny požadavky na vysokou důvěru k analýzám a charakteristikám chyb, jelikož nelze měřit přesnost systému průběžně. Díky filtrování v systémech rozšíření a přijímačích uživatelů se chyba u GNSS mění pomalu. Z toho vznikne výsledek malého počtu nezávislých vzorků za krátký časový úsek v rozmezí několika minut, který je významný pro přesné přiblížení (tzn. 5% pravděpodobnost toho, že chyba polohy přesáhla požadovanou přesnost pro celé přiblížení).

Požadavek na zajištění 95% přesnosti GNSS musí být splněn v případě nejhoršího geometrického uspořádání družic, ve kterém je systém ještě využitelný. Statická nebo pravděpodobnostní důvěryhodnost není určena pro základní pravděpodobnost zvláštní geometrie signálu pro určování vzdálenosti, proto se přesnost popisuje jako pravděpodobnost pro každý ze vzorků spíše než jako procento vzorků v určitém měřicím intervalu. Nejméně 95 % vzorků z rozsáhlé sady by mělo splňovat požadavky na přesnost, které jsou uvedeny v tab. 7. Uvedená data popisují nejhorší případ geometrie, tak aby byla odstraněna proměnlivost v přesnosti systému, která je zapříčiněna geometrií obíhajících družic.

U vertikální přesnosti je rozsah hodnot specifikován pro přesné přiblížení kategorie I. Počet hodnot je odvozen pomocí různých skupin a použitím různých interpretací standardů ILS. Pro konzervativní hodnotu u GNSS byla přijata nejnižší hodnota získaná z těchto odvození (tzn. minimální hodnota daná pro rozsah). Jelikož tato hodnota je konzervativní a charakteristiky chyb GNSS jsou jiné než u ILS, lze dosáhnout kategorie I pro přesné přiblížení tak, že se použijí větší hodnoty přesnosti a limitů výstrahy v tomto rozsahu. Ty umožní zvýšení dostupnosti provozu. Nejvyšší hodnota v rozsahu byla navržena jako vyhovující hodnota podmíněná ověřením. [35]

Tab. 7 Požadavky na výkonnost signálu v prostoru: [35]

Typická operace	Horizontální přesnost 95%	Vertikální přesnost 95%	Integrita	Čas do výstrahy	kontinuita	Dostupnost
Let po trati	3,7 km (2,0 NM)	nepoužito	$1 - 10^{-7}/h$	5 min	$1 - 10^{-4}/$ až $1 - 10^{-8}/h$	0,99 až 0,99999
Let po trati, konečná fáze	0,74 km (0,4 NM)	nepoužito	$1 - 10^{-7}/h$	15 s	$1 - 10^{-4}/$ až $1 - 10^{-8}/h$	0,99 až 0,99999
Počáteční přiblížení, střední přiblížení, nepřesné přístrojové přiblížení (NPA), odlety	220 m (720 ft)	nepoužito	$1 - 10^{-7}/h$	10 s	$1 - 10^{-4}/$ až $1 - 10^{-8}/h$	0,99 až 0,99999
Přístrojové přiblížení s vertikálním vedením (APV - I)	16,0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}/h$ na každé přiblížení	10 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ na 15 s	0,99 až 0,99999
Přístrojové přiblížení s vertikálním vedením (APV - II)	16,0 m (52 ft)	8,0 m (26 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}/h$ na každé přiblížení	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ na 15 s	0,99 až 0,99999
Přesné přiblížení CAT I	16,0 m (52 ft)	6,0 až 4,0 m (20 ft až 13 ft)	$1 - 2 \times 10^{-7}/h$ na každé přiblížení	6 s	$1 - 8 \times 10^{-6}$ na 15 s	0,99 až 0,99999

U standardní polohové služby GPS odpovídá chyba určování polohy pouze za příspěvek řídicího a kosmického segmentu k chybám polohy (to jsou časové chyby a efemeridy družice), přičemž nezahrnuje chyby, jako jsou ionosférická a troposférická refrakce, multipath a chyby přijímače způsobené šumem. U základních přijímačů GNSS vyžadují standardy způsobilosti přijímače, aby byly prokázány přesnosti určování polohy uživatele v přítomnosti interference a modelové selektivní dostupnosti (SA). To znamená, že hodnota přesnosti v horizontální rovině musí být menší než 100 m (95 procent času) a ve vertikální rovině menší než 156m (95 procent času).

Díky nespojitosti SA byla typická přesnost určení polohy uživatele GPS konzervativně odhadnuta. Tyto odhady jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 Přesnost určování polohy uživatele GPS: [35]

	Přesnost určování polohy uživatele GPS při 95% času, globální průměr
Horizontální chyba polohy	33 m (108 ft)
Vertikální chyba polohy	73 m (240 ft)

V tab. 8. jsou uvedeny hodnoty, které předpokládají, že v nejhorším případě dvě družice z celkového počtu 24 družic GPS jsou mimo provoz. Dalším předpokladem je, že model ionosférického zpoždění je 7 m (1σ), model zbytkového troposférického zpoždění je 0,25 m (1σ) a chyba přijímače způsobená šumem je 0,80 m (1σ). [35]

2.3.2 Další požadavky na výkonnost GNSS

Integrita a limit do výstrahy

Integrita je definována jako měřítko důvěry ve správnost informací, které poskytuje celý systém. Zahrnuje schopnost systému, jako je provádění včasného a odůvodněného varování uživatele v okamžiku, kdy se systém nesmí používat pro určité činnosti (nebo fáze letu). Aby byly zajištěny přijatelné chyby polohy, je limit výstrahy definován jako největší chyba polohy, při které je možno uskutečnit bezpečný provoz. V okamžiku, kdy dosáhne chyba polohy limitu výstrahy, musí být oznámena.

Navigační systém má požadavek na integritu pro jedno letadlo 1×10^{-5} za hodinu. To platí pro traťový let, konečné přiblížení, počáteční přiblížení, nepřesné přiblížení a odlet. Avšak u GNSS jsou tyto požadavky náročnější, jelikož bude obsluhovat větší počet letadel na trati. Hodnota integrity se u družicového systému pohybuje kolem $1 - 2 \times 10^{-7}$, jak ukazuje tab. 7. V případě APV a přesného přiblížení se požadavky na integritu GNSS shodují s požadavky pro systém ILS. Pro všechny využívané operace v letectví uvádí tab. 9 hodnoty limitů do výstrahy jak v horizontální, tak ve vertikální rovině.

Tab. 9 Hodnoty limitu do výstrahy pro letecké operace: [35]

Typická operace	Limit horizontální výstrahy	Limit vertikální výstrahy
Let po trati (oceánská/kontinentální s nízkou hustotou)	7,4 km (4 NM)	nepoužito
Let po trati (kontinentální)	3,7 km (2 NM)	nepoužito
Let po trati, konečná fáze	1,85 km (1 NM)	nepoužito
NPA	556 m (0,3 NM)	nepoužito
APV - I	40 m (130 ft)	50 m (164 ft)
APV - II	40,0 m (130 ft)	20 m (66 ft)
Přesné přiblížení CAT I	40,0 m (130 ft)	10 – 35 m (33 – 115 ft)

Výkonnost GNSS závisí na geometrii viditelných družic. V případě, že pozemní systém pracuje v degradovaném módu, se pak mohou projevit výrazné prostorové odchylky výkonnosti systému. Riziko vzniklé z důvodu prostorových odchylek se projeví ve vysílaných korekcích. Způsoby, jak brát odchylky v úvahu, jsou zahrnuté v protokolech SBAS a GBAS ve tvaru rovnic úrovně ochrany (tj. ve tvaru korekcí). Korekce zabraňují použít systém v okamžiku, kdy je riziko příliš vysoké. [35]

Kontinuita

Kontinuita je pojem definující schopnost systému plnit svoji funkci, aniž by došlo k neplánovanému přerušení během daného provozu. Požadavky kontinuity jsou rozdílné pro let po trati, pro přiblížení a přistání.

- Kontinuita při letu po trati

V letovém režimu kontinuita znamená, že navigační systém poskytuje výstupní navigační data s určenou přesností a integritou během daného provozu. Důležitou podmínkou je, aby navigační systém byl použitelný při zahájení provozu. Pokud se vyskytne výstraha navigačního systému, která vznikla poruchou nebo nízkou výkonností, potom taková situace znamená selhání kontinuity. Kontinuitu lze popsat pravděpodobností za hodinu provozu. Pro jedno letadlo se požadavek na kontinuitu navigačního systému rovná pravděpodobnosti 1×10^{-4} za hodinu. GNSS umožňuje šířit signál v prostoru pro více letadel nad rozsáhlou oblastí. Hodnota 1×10^{-4} představuje minimální kontinuitu, při které je navigační systém ještě použitelný. Uvedená hodnota je využitelná pro oblast s nízkou hustotou letového provozu. V oblastech s vysokou hustotou provozu a složitostí se využívá maximální kontinuita, kdy pro jedno letadlo platí 1×10^{-6} za hodinu.

- Kontinuita při přiblížení a přistání

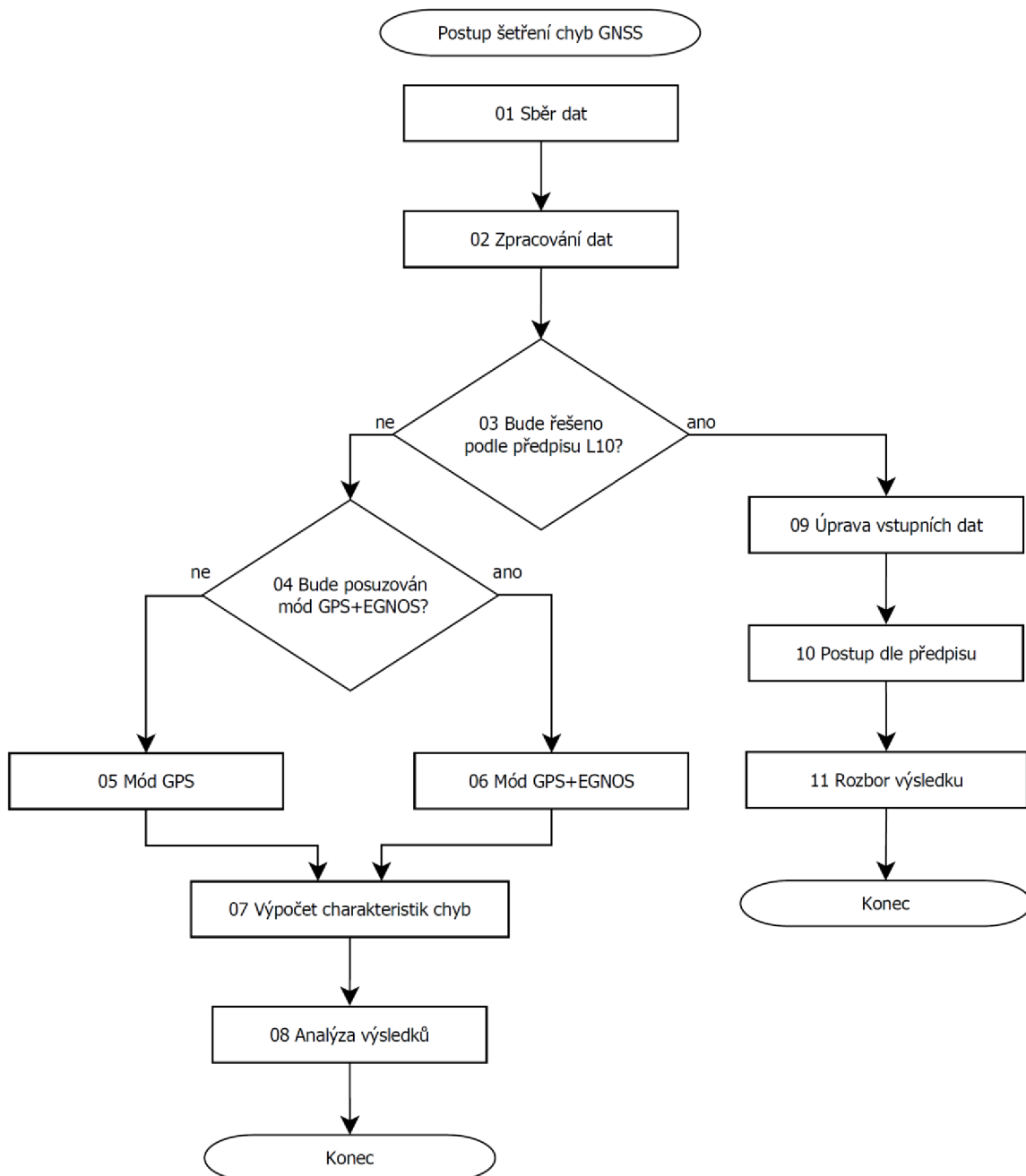
Lze ji definovat podobně jako u kontinuity pro let po trati s tím, že se poskytovaná výstupní data navigačního systému týkají přiblížení a přistání. Ztráty kontinuity se předpovídají a vydávají se pro ně zprávy NOTAM. Selhání kontinuity znamená, že výstrahy navigačního systému vzniknou poruchami nebo nízkou výkonností. V takovém případě se požadavek na kontinuitu uvádí jako pravděpodobnost během krátké doby působení. Požadavky na kontinuitu pro přiblížení a přistání jsou rozvrženy mezi přijímač letadla a další prvky systému, které nejsou součástí letadla. V daném případě není zapotřebí zvyšovat požadavky na systém, který je využíván větším počtem letadel. Pro přiblížení s vertikálním vedením a přiblížení kategorie I využívající GNSS se považuje za nezdařené takové přiblížení, kdy dojde k přerušení v průběhu klesání letadla do výšky rozhodnutí pro přiblížení a pilot nemůže provést vizuální vedení. Požadavky na kontinuitu pro APV a CAT I pro průměrné riziko ztráty služby je normou stanovené na dobu 15 s.

Dostupnost (Pohotovost)

Lze ji definovat jako podíl času, ve kterém je systém využíván k navigaci. Během této navigace musí být posádce, autopilotovi nebo jinému řídicímu letovému systému poskytovány spolehlivé navigační informace. Dostupnost GNSS komplikují pohyby družic, poněvadž na počtu družic nad daným prostorem závisí pokrytí oblastí. Další komplikací je skutečnost, že v případě poruchy může oprava družice trvat dlouhou dobu. Proto se dostupnost odvozuje z konstrukce, analýz a modelování a ne z měření. Model dostupnosti musí zahrnovat chyby troposférické, ionosférické refrakce a chyby přijímače. Hodnoty konstrukční dostupnosti ukazuje tab. 7. Požadavky na dostupnost jsou rozdílné jak pro let po trati, tak pro přiblížení. [35]

3 POSTUP ŠETŘENÍ CHYB GNSS

V diplomové práci si uvedeme dva přístupy na vyhodnocení chyb GNSS. Prvním způsobem řešení je pohled oboru radionavigace na samotný navigační systém, druhým je hodnocení chyb podle požadavků předpisu L10. Pro přehlednost postupu při šetření chyb GNSS se použije vývojový diagram (viz obr. 12) popisující jednotlivé činnosti procesu a jejich návaznosti. Uvedený diagram je výstupem diplomové práce a názorně seznámí čtenáře s postupem šetření chyb. Vzhledem k tomu, že cíle práce se vztahují k šetření chyb globálních navigačních satelitních systémů na evropském území, nebudeme se zabývat konvenčními systémy.



Obr. 12 Vývojový diagram postupu šetření chyb.

3.1 Zjednodušený popis jednotlivých činností postupu

Jednotlivé procesní činnosti uvedené ve vývojovém diagramu (obr. 17) jsou stručně a přehledně následně popsány.

Sběr dat – provede se vhodná volba místa s vyhovujícími podmínkami (v našem případě se jedná o střechu budovy fakulty strojní VUT) a potom je třeba vybrat kvalitní přijímač signálu, který je schopen měřit C/A kód ze systému GPS a GPS + EGNOS. Požadovaná doba měření je pro získání reprezentativního výsledku minimálně 24 hodin (podrobnější informace jsou uvedeny v kapitole 4),

Zpracování dat – ke zpracování je zapotřebí použít počítač s mikroprocesorem s dostatečnou výkonností hardwaru a vhodný software. Výstupem jsou naměřené odchylky polohy od referenčního bodu (v našem případě byla data transformována do excelovského souboru xlsx.)

Bude řešeno dle předpisu L10? - Při řešení hodnocení naměřených chyb polohy je více náhledů na problematiku. V práci jsou popsány dvě varianty, které se liší postupem a zpracováním. První variantou je přístup civilního letectví a druhou zjišťování přesnosti navigačního měření z hlediska radionavigace. V diplomové práci je vybrána cesta šetření chyb podle radionavigace bez zahrnutí požadavků na postup dle předpisu. Problematika je popsána podrobněji v kapitole 3 a následně ověřena v kapitole 4.

Bude posuzován mód GPS + EGNOS? – Je možno použít dvě varianty řešení, a to GPS nebo GPS + EGNOS. V diplomové práci se zabýváme oběma variantami pro účel určení polohy, které jsou zevrubně zpracovány.

Mód GPS – v případě použití módu GPS pro řešení určení polohy se použije pro výpočet odchylek chyb nevážené metody nejmenších čtverců (MNC). Způsob řešení pomocí GPS s použitím MNC je popsáno v kapitole 3.3.

Mód GPS + EGNOS - při výpočtu polohy prostřednictvím módu GPS + EGNOS byla použita vážená metoda nejmenších čtverců (VMNC). Tato metoda je složitější v porovnání s MNC a získané výsledky výpočtů polohy jsou přesnější.

Výpočet charakteristik chyb – po obdržení vypočtených odchylek (chyb) polohy za pomoci uvedených módů, zahajuje autor diplomové práce svoji činnost a analyzuje získaná data a závislosti mezi nimi. Za pomoci teorie statistiky se odhadují vlastnosti pozorovaných naměřených hodnot. Naměřené odchylky polohy je třeba prověřit testem normality dat (např. Chí - kvadrát test). Po provedení testu je zapotřebí určit chybové charakteristiky dat jako jsou např. odhad střední hodnoty, odhad rozptylu, směrodatné odchylky a další. Podrobněji je to zpracováno v kapitole 3.4 a prakticky vypočteno v kapitole 4.1.

Analýza výsledků - výsledkem předchozí operace jsou charakteristiky chyb polohy. Je zjištěna systematická chyba systému GNSS a náhodná chyba pro různé hladiny významnosti. Provede se zhodnocení dosažených výsledků. V našem případě budou porovnávány chyby naměřené polohy vyhodnocené pro autonomní mód GPS a mód GPS + EGNOS. Příklad hodnocení naměřených výsledků je uveden v kapitole 4.2.

Úprava vstupních dat dle předpisu L10 - při šetření chyb civilního letectví se každý měřený vzorek přenásobí tzv. váženým koeficientem, který je zvolen podle letecké operace. V případě módu GPS + EGNOS se volí buď pro nepřesné přiblížení (NPA), nebo pro přesné přiblížení (PA). Tímto způsobem šetření se diplomová práce nezabývá hlouběji, kapitola 3.2 popisuje pro pochopení zjednodušeně uvedený postup dle požadavků předpisu.

Postup dle předpisu – předpis stanovuje postup šetření chyb jiným způsobem, než přístup radionavigace při zjišťování přesnosti navigačního měření. Postupuje se tak, že naměřená data se seřadí od nejmenší hodnoty chyby po největší. Poté se vybere 95 percentil (tzn., vybere se 5 % nejhorších dat).

Rozbor výsledků - při použití 95 percentilu se získá navigační systémová chyba NSE, která se porovnává s požadavky přesnosti GNSS uváděné předpisem. Požadavky na přesnost pro jednotlivé letové operace je možné nalézt v kapitole 2.3. Postup šetření chyb GNSS podle předpisu je v diplomové práci popsán, ale výpočet není proveden na reálném vzorku naměřených dat.

3.2 Šetření chyb dle předpisu L10

ICAO GNSS panel zvolil nepřímý způsob vyjádření chybami určení polohy (tzn. rozdílem mezi hodnotou měřenou a referenční). Definice přesnosti a požadavky na šíření signálu v prostoru jsou uvedeny v kapitole 2.1. Obecně se tvrdí, že chyba je dána s přesností 95 %, avšak navigační přesnost je dle ICAO GNSS manuálu chápána jako 95 percentil chyb (p 95%). Označuje se jako:

- navigační systémová chyba v horizontální rovině (HNSE),
- navigační systémová chyba ve vertikální rovině (VNSE).

Za účelem zjištění navigační systémové chyby je potřeba naměřit dostatečný počet hodnot, čímž je dosaženo dostatečně reprezentativního výsledku. Předpis L10 uvádí, že doba měření musí být nejméně 24 hod. Další podmínkou je zajištění nejhoršího případu geometrie. Při měření se každý naměřený vzorek musí vynásobit tzv. váhovým faktorem (neboli scale faktorem), aby byla zajištěna podmínka nejhoršího případu geometrie. Váhový koeficient je odlišný zpravidla pro každé měření (vzorek) v závislosti na dostupných informacích o integritě. Dále je rozdílný pro měření (hodnocení) horizontální a vertikální navigační přesnosti (HPE, VPE). Váhový koeficient závisí také na letecké operaci pro nepřesné přístrojové přiblížení (NPA) a mód přesného přiblížení (PA), který zahrnuje všechna APV a PA přiblížení a vyjadřuje se vztahy: [9]

$$VK_i^{NPA} = \frac{6}{HDOP_i} \quad (3.1)$$

kde VK_i^{NPA} představuje váhový koeficient pro mód nepřesného přiblížení.

$$VK_i^{PA} = \frac{AL}{PL_i} \quad (3.2)$$

kde VK_i^{PA} představuje váhový koeficient pro módy přesného přiblížení a APV. AL ve vztahu 3.2 reprezentuje mez výstrahy. Hodnotu stanovuje předpis L10 a je závislá na letecké operaci. V diplomové práci je možné ji nalézt v tab. 9. PL_i představuje úroveň zabezpečení odhadovanou rozšiřujícím satelitním systémem.

Po vynásobení každého i – tého vzorku i – tím váhovým koeficientem se dostane tzv. vážená hodnota chyby polohy i - tého vzorku ($sHPE_i$ a $sVPE_i$) a je dána vztahy:

$$sHPE_i^{NPA} = VK_i^{NPA} \cdot HPE_i \quad (3.3)$$

kde $sHPE_i^{NPA}$ je vážená chyba polohy i – tého vzorku pro nepřesné přístrojové přiblížení.

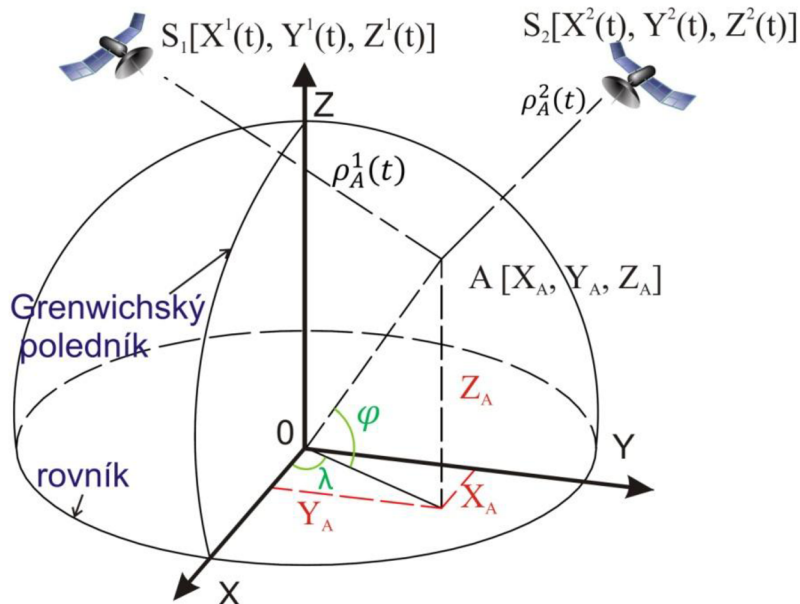
$$sHPE_i^{PA} = \frac{HAL}{HPL_i} \cdot HPE_i \quad (3.4a), \quad sVPE_i^{PA} = \frac{VAL}{VPL_i} \cdot VPE_i \quad (3.4b)$$

Vztahy 3.4a, 3.4b představují váženou chybu polohy i – tého vzorku módu přesného přiblížení jak v horizontální, tak ve vertikální rovině.

Po získání dat obsahující vážené násobené chyby polohy se využije 95 percentilu pro výpočet navigační systémové chyby, kterou je možné porovnávat s požadavky přesnosti uváděnými předpisem. [9]

3.3 Výpočet určení polohy GNSS

Provádíme-li šetření chyb polohy, je nejdříve zapotřebí stanovit jejich umístění. Způsob určování polohy uživatele u GNSS popisuje následující teorie. Zpočátku je zapotřebí definovat souřadný systém, ve kterém se měření polohy provádí. Pro výpočet polohy za pomoci satelitních systémů se využívá pravouhlý souřadný systém, jehož střed je umístěn v centru Země (viz obr. 13). Osa x je průsečnicí roviny rovníku a roviny Greenwichského poledníku. Osa z se shoduje s osou rotace Země. Osa y je kolmá na osu x a prochází rovinou rovníku. Označme geocentrický polohový vektor letadla A jako $X_A = [X_A, Y_A, Z_A]$ a geocentrický vektor j - té družice v okamžiku t jako $Y^j(t) = [X^j(t), Y^j(t), Z^j(t)]$, potom vzdálenost přijímače letadla v bodě A od družice je určena vztahem 3.1. [7, 30] V praktické části se využije obdobný souřadný systém, avšak jeho střed nebude totožný se středem Země, ale bude se nacházet uprostřed fázového centra antény přijímače



Obr. 13 Řešení v pravouhlé soustavě. [7]

$$\rho_A^j(t) = \sqrt{[X^j(t) - X_A]^2 + [Y^j(t) - Y_A]^2 + [Z^j(t) - Z_A]^2} \quad (3.5)$$

V případě zahrnutí korekce na rychlost šíření signálu dostaneme následující rovnici pseudovzdálenosti, kde $\rho_A^j(t)$ je topocentrická vzdálenost: [30]

$$R_A^j(t) = \rho_A^j(t) + c[\delta^j(t) - \delta_A(t)] \quad (3.6)$$

kde c je rychlost světla, $\delta^j(t)$ je časová korekce hodin družice a $\delta_A(t)$ je časová korekce přijímače.

Při zohlednění časové korekce je výpočet pseudovzdálenosti letadla od satelitu následující (spojení rovnic 3.5 a 3.6):

$$R_A^j(t) = \sqrt{[X^j(t) - X_A]^2 + [Y^j(t) - Y_A]^2 + [Z^j(t) - Z_A]^2} + c[\delta^j(t) - \delta_A(t)] \quad (3.7)$$

Rovnici 3.3 upravíme na tvar:

$$R_A^j(t) - c\delta^j(t) = \sqrt{[X^j(t) - X_A]^2 + [Y^j(t) - Y_A]^2 + [Z^j(t) - Z_A]^2} - c\delta_A(t) \quad (3.8)$$

$$\rho_{A0}^j(t) = f(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0}) = \sqrt{[X^j(t) - X_{A0}]^2 + [Y^j(t) - Y_{A0}]^2 + [Z^j(t) - Z_{A0}]^2} \quad (3.9)$$

Linearizace:

použitím Taylorova rozkladu podle bodu X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0} , rovnici 3.5 linearizujeme, přičemž se dále použijí pouze lineární členy řady. Platí:

$$f(X_A, Y_A, Z_A) = f(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0}) + \frac{\partial f(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0})}{\partial X_{A0}} dX_A + \frac{\partial f(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0})}{\partial Y_{A0}} dY_A + \frac{\partial f(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0})}{\partial Z_{A0}} dZ_A \quad (3.10)$$

kde: [30]

$$\frac{\partial f(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0})}{\partial X_{A0}} = -\frac{X^j(t) - X_{A0}}{\rho_A^j(t)} = a_{XA}^j(t) \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial f(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0})}{\partial Y_{A0}} = -\frac{Y^j(t) - Y_{A0}}{\rho_A^j(t)} = a_{YA}^j(t) \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial f(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0})}{\partial Z_{A0}} = -\frac{Z^j(t) - Z_{A0}}{\rho_A^j(t)} = a_{ZA}^j(t) \quad (3.13)$$

Linearizovaná rovnice pro absolutní určování polohy s použitím rovnic 3.8 – 3.13 bude následující:

$$R_A^j(t) - c\delta^j(t) + c\delta_{A0}(t) = a_{XA}^j(t)dX_A + a_{YA}^j(t)dY_A + a_{ZA}^j(t)dZ_A - cd\delta_A(t) + \varepsilon = l_A^j(t) \quad (3.14)$$

Levá strana rovnice představuje naměřenou pseudovzdálenost, která je redukována o vliv korekce hodin satelitu a hodin přijímače. Provedeme substituci levé strany rovnice 3.14:

$$l_A^j(t) = R_A^j(t) - c\delta^j(t) + c\delta_{A0}(t) \quad (3.15)$$

Abychom byli schopni určit polohu, musí být signál přijat z minimálního počtu čtyř družic v určitém čase t . Při označení satelitů indexy $j = 1, 2, 3, 4$ bude matice koeficientů upravených rovnic oprav \mathbf{A} , vektor redukováných měření \mathbf{l} a vektor parametrů \mathbf{x} mít tvar:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{XA}^1 & a_{YA}^1 & a_{ZA}^1 & -1 \\ a_{XA}^2 & a_{YA}^2 & a_{ZA}^2 & -1 \\ a_{XA}^3 & a_{YA}^3 & a_{ZA}^3 & -1 \\ a_{XA}^4 & a_{YA}^4 & a_{ZA}^4 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_A^1(t) \\ l_A^2(t) \\ l_A^3(t) \\ l_A^4(t) \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta X_A \\ \Delta Y_A \\ \Delta Z_A \\ c \cdot \Delta \delta_A(t) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\text{V tomto případě lze rovnice zapsat: } \mathbf{l} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \quad (3.17)$$

Pro zjednodušenou ukázkou, kdy měření probíhá pouze čtyřmi družicemi v dalším časovém intervalu t_2 , se parametry polohy využitá v předchozím měření nebudou měnit, pouze se k nim přidá nový parametr a to oprava pseudovzdálenosti vlivem korekce hodin přijímače $c \cdot \delta_A(t_2)$ v časovém úseku t_2 . Potom budou mít matice \mathbf{A} a vektory \mathbf{l} a \mathbf{x} tvar: [30]

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{XA}^1(t_1) & a_{YA}^1(t_1) & a_{ZA}^1(t_1) & -1 & 0 \\ a_{XA}^2(t_1) & a_{YA}^2(t_1) & a_{ZA}^2(t_1) & -1 & 0 \\ a_{XA}^3(t_1) & a_{YA}^3(t_1) & a_{ZA}^3(t_1) & -1 & 0 \\ a_{XA}^4(t_1) & a_{YA}^4(t_1) & a_{ZA}^4(t_1) & -1 & 0 \\ a_{XA}^1(t_2) & a_{YA}^1(t_2) & a_{ZA}^1(t_2) & 0 & -1 \\ a_{XA}^2(t_2) & a_{YA}^2(t_2) & a_{ZA}^2(t_2) & 0 & -1 \\ a_{XA}^3(t_2) & a_{YA}^3(t_2) & a_{ZA}^3(t_2) & 0 & -1 \\ a_{XA}^4(t_2) & a_{YA}^4(t_2) & a_{ZA}^4(t_2) & 0 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_A^1(t_1) \\ l_A^2(t_1) \\ l_A^3(t_1) \\ l_A^4(t_1) \\ l_A^1(t_2) \\ l_A^2(t_2) \\ l_A^3(t_2) \\ l_A^4(t_2) \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta X_A \\ \Delta Y_A \\ \Delta Z_A \\ c \cdot \Delta \delta_A(t_1) \\ c \cdot \Delta \delta_A(t_2) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Výpočtem se získají opravy přibližných souřadnic dX_A , dY_A , dZ_A a korekce pseudovzdálenosti $c \cdot \delta_A(t)$. Při výpočtu, kdy se měření uskuteční z více jak pěti družic, se zvýší počet řádků matice \mathbf{A} a vektoru \mathbf{l} . Soustavu rovnic pak nelze řešit přímou metodou, ale využije se pro řešení metody nejmenších čtverců (MNC), jejichž odvození je naznačeno v příloze 1.

Výpočet vektoru parametrů \mathbf{x} je určen:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l} \quad (3.19)$$

Řešením rovnice 3.15 se stanoví odchylky souřadnic vůči vstupním hodnotám. Podrobněji metodu nejmenších čtverců lze nastudovat ve zdroji. [2] V ověření postupu kapitoly 4 se použije MNC pro výpočet odchylek systému GPS a vážená metoda nejmenších čtverců pro systém EGNOS.

3.4 Šetření přesnosti navigačního měření

V úvodu kapitoly se seznámíme se dvěma základními hledisky, které se používají pro posuzování možností využití a kvality jednotlivých druhů leteckého navigačního zařízení. Prvním je kvantitativní hledisko, které posuzuje rozsahy měřených veličin a druhým je kvalitativní, posuzující přesnost měřených veličin. Přesnost měření navigačních veličin se definuje:

- přímo - parametrem nazývaným mírou přesnosti,
- nepřímo – prostřednictvím chyb, které zatěžují výsledek měření. Pro šetření chyb v souvislosti s GNSS se využije v diplomové práci nepřímého způsobu.

V radionavigaci se setkáváme se třemi pojmy přesnosti, které se využívají k posuzování leteckého navigačního zařízení, jedná se o absolutní, předvídatelnou a opakovatelnou přesnost. Definice těchto pojmů přesnosti již byly uvedeny v kapitole 1.3, proto si je znovu uvádět nebudeme. V jiných oborech se využívají pro posuzování úrovně přesnosti pojmy, jako jsou přesnost, preciznost, pravdivost a nejistota měření. Dříve se uvedené pojmy

zaměňovaly, proto došlo ke sjednocení terminologie pro všechny vědní obory. Roku 2009 byly preciznost, pravdivost a nejistota měření obecně formulovány Mezinárodním metrologickým slovníkem (VIM 3) následujícími definicemi:

- presnost (accuracy) - vyjadřuje těsnou shodu mezi naměřenou a skutečnou hodnotou měřené veličiny. Je složena z preciznosti a pravdivosti,
- nejistota měření - jedná se o kladný parametr, který charakterizuje rozptýlení hodnot veličin přiřazených k měřené veličině na základě použité informace,
- pravdivost (trueness) - rozdíl mezi aritmetickým průměrem počtu opakovaných naměřených hodnot veličiny a referenční hodnotou veličiny. Vztahuje se nepřímě k systematické chybě měření. Jako míra pravdivosti se obvykle uvádí vychýlení (bias) průměru výsledků od skutečné hodnoty. V radionavigaci lze pravdivost specifikovat jako absolutní (předvídatelnou) přesnost,
- preciznost (precision) - těsná shoda mezi indikovanými nebo naměřenými hodnotami veličiny, která byla získána opakovaným měřením na stejném nebo podobném objektu za daných podmínek. Vyjadřuje se číselně směrodatnou odchylkou, rozptylem nebo variančním koeficientem za specifikovaných podmínek měření. V radionavigaci se pod pojmem preciznost rozumí opakovatelná přesnost. [12, 33]

3.4.1 Chyby radionavigačních měření

Chyby vznikající navigačním měřením v závislosti na různých příčinách lze rozdělit do čtyř skupin:

- metodické chyby – nastávají v případě použití nedokonalé metody měření,
- přístrojové chyby – nastávají nedokonalostí navigačního systému,
- chyby místní – tyto chyby nastávají v závislosti na poloze, ve které se provádí měření,
- chyby zapříčiněné lidským faktorem – vznikají při špatném a nedokonalém počínání operátora, jehož schopnosti závisí na vycvičenosti a zkušenosti.

Dále lze tyto chyby, které vznikají při měření, charakterizovat jako absolutní nebo relativní chyby. Absolutní chyba Δx – jedná se o chybu měření mezi hodnotou veličiny naměřené \tilde{x} a skutečné hodnoty x . Relativní chyba Δ pak lze určit ze vztahu 3.20a.

$$\Delta x = \tilde{x} - x \quad (3.20a), \quad \Delta = \frac{\Delta x}{x} \quad (3.20b)$$

Absolutní a relativní chybu lze použít při charakterizování výsledků radionavigačního měření. Zpravidla se využívají více absolutní chyby, protože nezávisí na použité metodě měření, na směru a na vzdálenosti, kdy relativní chyba naopak v těchto případech závisí a může se měnit. Proto lze tvrdit, že je výhodnější použít absolutní chyby pro charakterizování přesnosti radionavigačních systémů.

Všechny chyby, které nezávisí na jejich původu a metodě měření se dělí na systematické a náhodné chyby. Takto se dělí i chyba každého samostatného měření. Pro absolutní chybu platí tedy: [6]

$$\Delta x = \vartheta + \delta \quad (3.21)$$

Kde: ϑ reprezentuje systematickou chybu a δ náhodnou chybu.

Systematické chyby jsou takové, u kterých dochází ke zkreslení výsledku měření a to pravidelně, což způsobuje odchýlení od správné hodnoty. Mezi systematické chyby u GPS patří chyba v určení dráhy družice, relativistické efekty, chyba hodin družice, chyba hodin přijímače, troposférická a ionosférická refrakce. Snižovat systematické chyby GPS lze používáním přesných drah, modelováním systematických vlivů nezávislými metodami (např. doplňujícími měřeními jako je měření meteorologického parametru), použitím rozšiřujícího systému (v našem případě EGNOS) a vhodnou volbou metody. [6, 30, 37]

Náhodné chyby jsou takové, které vznikají při měření náhodně a jejich velikost a znaménko se mění v závislosti na náhodě, skládají se z náhodných kombinací většího počtu základních (dílkých) chyb. Nejsou předvídatelné a vylučitelné z měření, protože se neřídí žádným zákonem. Náhodné chyby GPS souvisí s vysláním a šířením signálu družice a jeho zpracováním. Všeobecně lze hovořit, že ovlivnění systému GPS náhodnou chybou je malé a lze snížit zvýšením počtu měření. Velikost náhodných chyb se nedá stanovit, jelikož často neznáme jejich příčinu. Proto se k nim musí přistupovat jako k náhodné veličině. K popisu náhodných chyb se používá teorie pravděpodobnosti a pro odhady se využívá statistiky. [4, 30, 6, 37] Pokud je náhodná chyba velká tak, že nepravidelnost výsledků je příliš viditelná, pak se nazývá odlehlá hodnota (outlier). V radionavigaci se mezi odlehlé hodnoty počítají všechny naměřené chyby, které překročí hodnotu 3σ .

3.4.2 Zpracování náhodných chyb

Jak už bylo řečeno, náhodné chyby se nedají předvídat a ani vyloučit. Proto výsledek každého samostatného měření má náhodný charakter. Existují všeobecné zákonitosti, které se týkají náhodných chyb a vedou k následujícímu:

- symetrii rozdělení – chyby vzniklé při měření jsou rozmístěny symetricky k naměřené hodnotě tak, že jejich absolutní hodnota a to i s opačným znaménkem je přesně stejná pro nekonečně mnoho provedených měření,
- nerovnoměrnosti rozdělení – výskyt malých chyb je pravděpodobnější (četnější), než větších chyb,
- ohraničenosti rozdělení – jakmile se vyloučí jasně viditelně chybný malý počet měření, pak ostatní chyby leží uvnitř ohraničené oblasti.

Pro stanovení přesnosti radionavigačních měření se používá teorie pravděpodobnosti. Proto zde uvedu základní charakteristiky využívané pro výpočty. Z těchto základních principů statistiky byl vytvořen výpočet elipsy chyb, který je prezentován v praktické části této zprávy (kapitola 4).

Aritmetický průměr

Vrátíme-li se k zákonu symetrie, který je popsán na začátku kapitoly, pak lze hovořit, že nejdůvěryhodnější hodnota měřené veličiny je aritmetický průměr ze všech měření. Označuje se \bar{x} a je dán vztahem: [6]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.22)$$

kde n udává celkový počet uskutečněných měření a x_i je hodnota i - tého měření.

V některé literatuře [1] se značí aritmetický průměr jako střední hodnota $E(x)$. Čím se uskuteční větší počet měření, tím více se střední hodnota bude blížit ke skutečné hodnotě. V ověření postupu (kapitola 4) je využít konečný počet naměřených dat, proto se musí použít

pro výpočet odhad aritmetického průměru (bude značen \bar{x}). Jelikož GNSS určují polohu ve 3D prostoru, je zapotřebí počítat odhady aritmetických průměrů ve třech směrech (\bar{x} , \bar{y} , \bar{z}).

Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení

Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení je charakterizována Gaussovou křivkou (viz obr. 14), která je symetrická podle střední hodnoty $\bar{x} = E(x)$, ve kterém dosahuje svého maxima. A platí pro ni: [1]

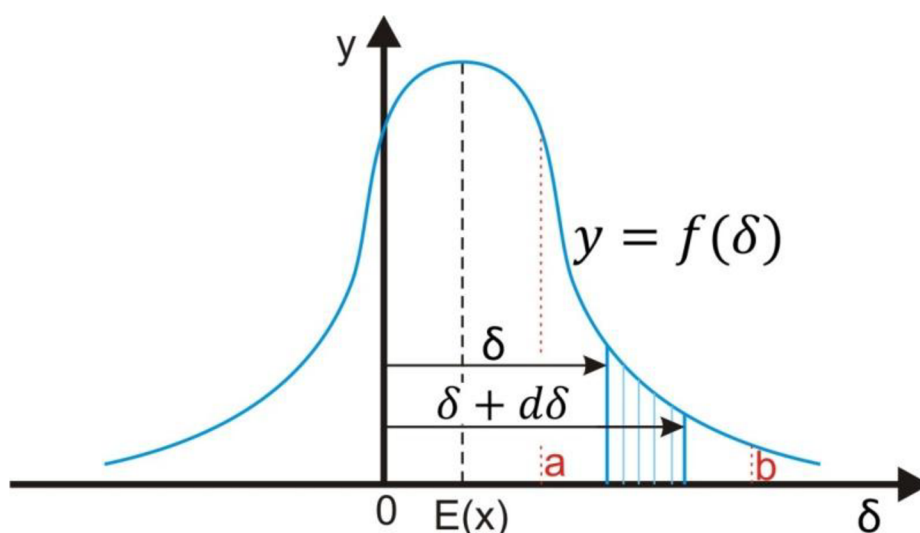
$$y = f(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 \delta^2} = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 \{x - E(x)\}^2} = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 \{x - E(x)\}^2}, -\infty < x < +\infty \quad (3.23)$$

Na základě zákonu rozdělení chyb, pro $y = f(\delta)$, pak chyby měření budou ležet v intervalu $\langle \delta, \delta + d\delta \rangle$. Pravděpodobnost výskytu chyb v intervalu $\langle \delta; \delta + d\delta \rangle$ je učena výrazem:

$$P = y d\delta = f(\delta) d\delta \quad (3.24)$$

To znamená, že pravděpodobnost výskytu chyby ležící v intervalu $\langle a; b \rangle$ je dána integrálem: [6]

$$P = \int_a^b y d\delta = \int_a^b f(\delta) d\delta \quad (3.25)$$



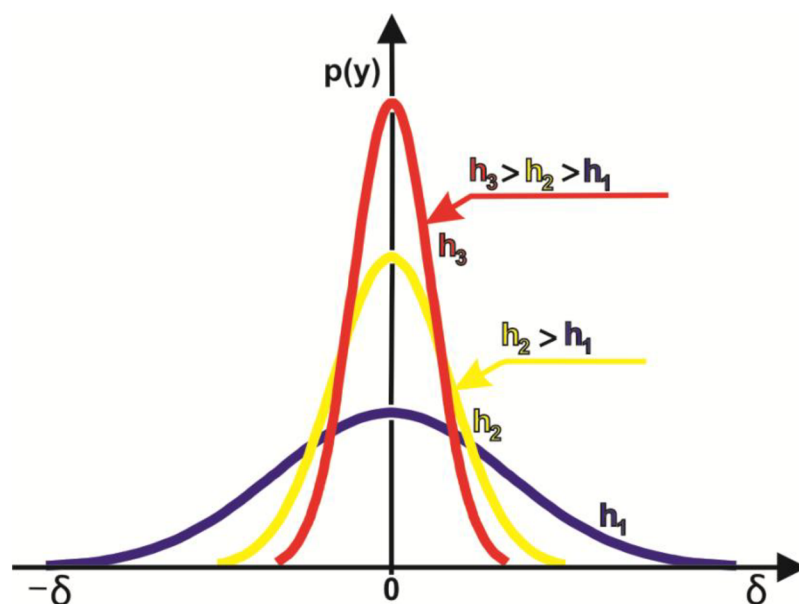
Obr. 14 Gaussova křivka normálního rozdělení.

Míra přesnosti

Charakterizuje hustotu pravděpodobnosti při přesném měření, tzn. že $\delta = 0$ a pak je $f(0) = 0,564 h$. Přičemž platí, že čím je větší hodnota míry přesnosti, tím vyšší je přesnost získaná při měření, jak ukazuje obr. 15.

Míra přesnosti se označuje písmenem h a je nepřímo úměrná střední kvadratické chybě. Je definována vztahem 3.26, ze kterého je patrné, že čím je směrodatná odchylka menší, tím bude míra přesnosti vyšší: [6]

$$h = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \quad (3.26)$$



Obr. 15 Porovnání parametru přesnosti h v závislosti na jeho hodnotě.

V podstatě slouží jen k vyjádření závislosti přesnosti na směrodatné odchylce, avšak pro popsání přesnosti GNSS se zpravidla nepoužívá. Míry přesnosti používané pro určování přesnosti systémů GNSS jsou uvedeny a popsány v kapitole 1.2.3

Rozptyl

využívá se pro popis rozdělení náhodné veličiny a je důležitou charakteristikou variability. Označuje se zpravidla symboly $D(x)$ nebo σ^2 a definuje ho vztah:

$$\sigma_x^2 = E(x - E(x))^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n-1} (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.27)$$

Rozptyl je nepřímým vyjádřením opakovatelné přesnosti. Čím bude jeho hodnota větší, tím se naměřené odchylky polohy budou od sebe navzájem vzdalovat (bude se zvyšovat chyba naměřené polohy), v opačném případě dojde ke snížení náhodné chyby. Pro praktická měření se využívá odhadu rozptylu, který v kapitole 4 je označen jako s_x^2 .

Střední kvadratická chyba σ (směrodatná odchylka)

Jelikož rozptyl popisuje variabilitu náhodné veličiny ve čtvercích jejích jednotek, užívá se obvykle kladná odmocnina z rozptylu. U GNSS se střední kvadratická chyba označuje jako rms (root mean square). Lze ji vypočítat z následujícího vztahu:

$$\sigma_x = \sqrt{E(x - E(x))^2} \rightarrow \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n-1} (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.28)$$

Pro konečný počet naměřených prvků se používá odhad směrodatné odchylky, obecně se značí jako s_x .

Kovariance

Informuje o vztahu mezi náhodnými veličinami. Je označována σ_{xy} a můžeme ji definovat jako střední hodnotu odchylek X , Y od jejich středních hodnot. Kovariance nabývá hodnot v intervalu $(-\infty, \infty)$ a ve většině případů je pomocným nástrojem pro měření intenzity dvou veličin. Lze ji zapsat vztahem:

$$\sigma_{xy} = E\{[x - E(x)][y - E(y)]\} = \rho_{xy} \sigma_x \sigma_y \quad (3.29)$$

Koeficient korelace

Je nejpoužívanější mírou intenzity lineárního vztahu veličin X a Y. Pohybuje se v intervalu $(-1, 1)$. Pokud je jeho hodnota rovna ± 1 , jedná se o funkční přímou (nepřímou) lineární závislost. V případě, že nastane nulová hodnota koeficientu korelace, pak budou veličiny X a Y nezávislé. Definice udává, že koeficient korelace je dán podílem kovariance a součinu směrodatných odchylek obou veličin. Je označován ρ_{xy} a popisuje ho rovnice (3.25): [1, 13] $\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{E(x-E(x))^2 E(y-E(y))^2}}$ → Po dosazení a úpravách dostaneme:

$$\rightarrow \rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.30)$$

3.4.3 Testy normálního rozdělení

Pro zjištění, zda naměřená data mají normální rozdělení, se používají testy normality. Po ověření normality lze k naměřeným odchylkám polohy přistupovat dle výše uvedených statistických veličin (odhad rozptylu, směrodatné odchylky apod.) Existuje několik testů, které se v praxi využívají:

- testy založené na šikmosti a špičatosti,
- Chí - kvadrát test dobré shody
- Kolmogorův test,
- Shapirův – Wilkův test,
- Andersonův – Darlingův test. [34]

Všechny tyto používané testy normálního rozdělení je možné nastudovat ve studijních materiálech [34]. V diplomové práci je použit pro otestování dat Chí – kvadrát test dobré shody, proto si uvedeme teorii, která popisuje blíže tento test. Pokud otestovaná data potvrdí normální rozdělení, je možné pokračovat v šetření chyb polohy GNSS. V opačném případě se musí zvážit, co zapříčinilo, že se nejedná o normální rozdělení. U elipsy chyb se jedná o dvourozměrné normální rozdělení, proto se test normality provádí ve dvou směrech (x, y) souřadného systému naměřených dat. V případě závislosti dat (kovariance) se musí otestovat data v lokálním natočeném souřadném systému elipsy chyb (směry u, v).

Chí – kvadrát test

Tento test se používá pro otestování, zda data naměřená přijímačem GPS (EGNOS) mají normální rozdělení. Testuje se hypotéza H_0 , u které se předpokládá, že náhodná veličina X má distribuční funkci $F(x)$, oproti alternativní hypotéze \bar{H}_0 , která nemá distribuční funkci $F(x)$. Získaný soubor (x_1, \dots, x_n) se rozdělí do m tříd s četnostmi f_i a vypočte se teoretická absolutní četnosti $\tilde{f}_i = (F(x_i^+) - (x_{i-1}^+))$ pro $i = 1, \dots, m$, kde x_i^+ označuje pravý koncový bod i-té třídy, přičemž klademe $x_0^+ = -\infty$ a $x_m^+ = +\infty$. Statistický soubor rozdělíme do tříd, přičemž v každé třídě je zapotřebí mít dostatečně velké teoretické absolutní četnosti. Zpravidla se požaduje, aby bylo $\tilde{f}_i > 5$. Toho je možné dosáhnout při dostatečně velkém rozsahu n správným výběrem třídy nebo sloučením již získaných sousedních tříd. Sledovaná hodnota testového kritéria je

$$t = \sum_{i=1}^m \frac{(f_i - \tilde{f}_i)^2}{\tilde{f}_i} \quad (3.31)$$

$\bar{W}_\alpha = \langle 0; \chi_{1-\alpha}^2 \rangle$, kde $\chi_{1-\alpha}^2$ je $(1 - \alpha)$ – kvantil Pearsonova rozdělení $\chi^2(k)$ s $k = m - q - 1$ stupni volnosti. Kvantily tohoto rozdělení uvádí tabulka T3, kterou je možné nalézt ve studijních materiálech [5]. Číslo q udává počet hypotetického rozdělení náhodné veličiny X , která musí být odhadnuta z rozříděného statistického souboru pro určení hodnot distribuční funkce $F(x)$. Pro normální rozdělení se používá hodnota $q = 2$. [5]

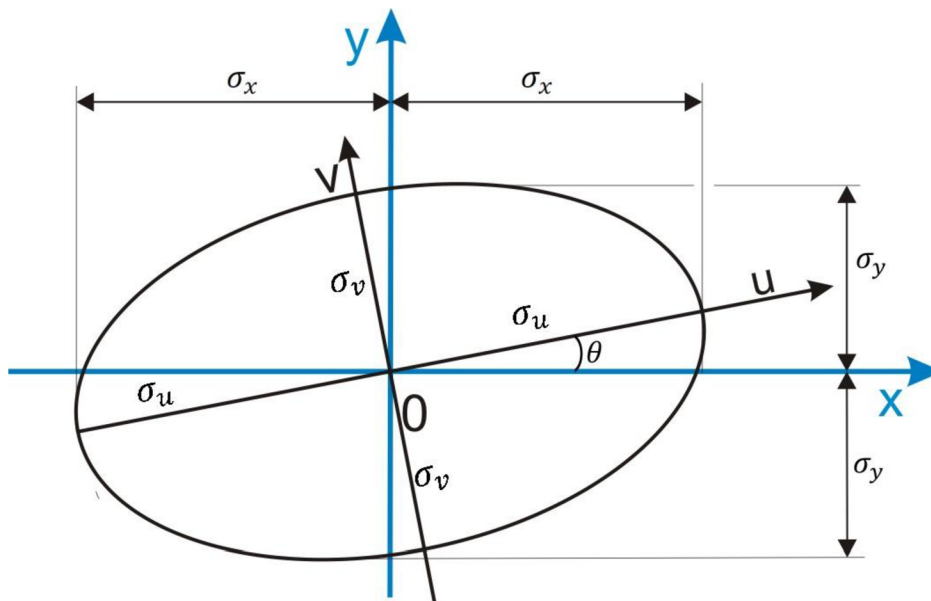
3.4.4 Elipsa chyb

Pro hodnocení chyby polohy v horizontální rovině dvourozměrného normálního rozdělení se používá elipsa chyb. Jedná se o geometrické místo všech bodů, ve kterých s určitou pravděpodobností může být naměřena chyba polohy letadla. Charakterizuje stupeň přesnosti určení polohy letadla a to dvěma způsoby:

- pomocí rozměrů hlavní poloosy (především) a vedlejší poloosy elipsy,
- použitím takové pravděpodobnosti, při které se změřená pozice letadla vyskytuje uvnitř elipsy chyb. [12]

Odvození vztahu pro orientaci elipsy chyb:

Nejdříve provedeme transformaci elipsy z jednoho souřadného systému do druhého, aby hlavní poloosy elipsy byly zároveň novým souřadným systémem podle obr. 16. [26]



Obr. 16 Natočení elipsy chyb.

Natočení elipsy ze souřadnic os x a y do souřadného systému u, v se provede pomocí úhlu θ , je možné popsat následujícími rovnicemi:

$$u = x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta; \quad v = -x \cdot \sin\theta + y \cdot \cos\theta \quad (3.32)$$

maticově lze napsat:
$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Pro hledaný bod, který je určen souřadnicemi (x, y) , pak kovarianční matice bude dána kovariancí veličin x a y a rozptily v těchto směrech a je možné ji napsat ve tvaru:

$$\mathbf{C}_{xy} = \begin{vmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{vmatrix} \quad (3.34)$$

Pro následující postup bylo pro odvození elipsy chyb využito studijních materiálů [13, 26]. Pro náhodné vektory (x, y) a (u, v) platí:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_u^2 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Jestliže (u, v) jsou hlavní a vedlejší osou elipsy a platí pro ně, že jsou nekorelované, pak při aplikování zákona $\sum_{yy} \mathbf{A} = \sum \mathbf{A}_{xx}^T$, lze napsat rovnice:

$$\begin{bmatrix} \sigma_u^2 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Po řešení matic, dostaneme:

$$\sigma_u^2 = \sigma_x^2 \cos^2\theta + 2\sigma_{xy} \sin\theta \cos\theta + \sigma_y^2 \sin^2\theta \quad (3.37)$$

$$\sigma_v^2 = \sigma_x^2 \sin^2\theta + 2\sigma_{xy} \sin\theta \cos\theta + \sigma_y^2 \cos^2\theta \quad (3.38)$$

Jestliže pro θ platí $\langle 0; 360^\circ \rangle$, pak maximální hodnoty σ_u a σ_v budou nalezeny pomocí parciální derivace podle θ a rovnici položíme rovno 0 a vyřešíme:

$$\frac{\partial f(\sigma_u^2)}{\partial \theta} = -2\sigma_x^2 \sin\theta \cos\theta + 2\sigma_y^2 \sin\theta \cos\theta - 2\sigma_{xy} \sin^2\theta + 2\sigma_{xy} \cos^2\theta = 0 \quad (3.39)$$

$$(\sigma_y^2 - \sigma_x^2) \sin\theta \cos\theta + \sigma_{xy} (\cos^2\theta - \sin^2\theta) = 0 \quad (3.40)$$

V analytické geometrii obecně platí vztahy, které užijeme pro úpravu rovnice 3.40:

$$\sin\theta \cos\theta = \frac{\sin 2\theta}{2}; \quad \cos^2\theta - \sin^2\theta = \cos 2\theta \quad (3.41)$$

Po úpravě bude vypadat rovnice 3.40 takto:

$$\frac{1}{2} (\sigma_x^2 - \sigma_y^2) \sin 2\theta + \sigma_{xy} \cos 2\theta = 0 \rightarrow \frac{\sin 2\theta}{\cos 2\theta} = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \quad (3.42)$$

Z rovnice 3.42 pak dostaneme vztah pro určení orientace elipsy chyb: [13]

$$tg 2\theta = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \rightarrow \theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \quad (3.43)$$

kde úhel θ se nazývá orientační úhel elipsy chyb a představuje směr od kladného směru osy x k hlavní poloose u . Pokud se na to podíváme z praktického hlediska měření polohy, lze konstatovat, že tento úhel představuje směr, ve kterém jsou naměřená chyba od referenčního bodu největší (tzn. největší hustota chyby polohy).

Rozměry elipsy chyb:

Pro výpočet velké a malé poloosy se užívají rovnice:

$$u^2 = \left(\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2}{4} + \sigma_{xy}^2 \right)} \right) \quad (3.44)$$

$$v^2 = \left(\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2} - \sqrt{\left(\frac{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2}{4} + \sigma_{xy}^2 \right)} \right) \quad (3.45)$$

kde u je velikost hlavní poloosy a v udává velikost vedlejší poloosy elipsy chyb. Pro určení rozptylu a kovariance se použijí rovnice 3.27, 3.28, 3.29. Odvození rovnic pro velikosti poloos elipsy lze nastudovat ve studijních materiálech. [26]

Uvedený postup výpočtu je popsán pouze pro pochopení problematiky. Tímto postupem lze spočítat elipsu chyb pouze pro pár bodů. V praktickém případě, kdy počet vzorků je v řádu desetitisíc (viz kapitola 4. 86639 vzorků), se musí použít matematického počítačového programu. Kdyby se tak neučinilo, byl by výpočet velice pracný a časově náročný. V praktické části je použit pro výpočet program MATLAB, kterému stačí pro řešení pouze vztahy 3.27, 3.29. Pomocí počítačového programu jsou nejdříve spočítány z kovarianční matice rozptyly a kovariance, která způsobuje natočení elipsy. Následně za využití rovnic 3.44, 3.45 vypočítá velikosti hlavní a vedlejší poloosy elipsy chyb.

Výpočet pravděpodobnosti, že chyba polohy je umístěna uvnitř elipsy:

Pro dvourozměrné normální rozdělení platí po hustotu pravděpodobnosti: [1, 13]

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left\{ \frac{-1}{2(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho \frac{xy}{\sigma_x\sigma_y} + \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2 \right] \right\} \quad (3.46)$$

V případě, že $f(x, y)$ je konstantní, pak pro exponent v rovnici 3.46 lze napsat:

$$\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho \frac{xy}{\sigma_x\sigma_y} + \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2 = t^2 \quad (3.47)$$

kde t^2 představuje kladnou konstantu, která charakterizuje elipsu. Pro různé hodnoty t obdržíme různé elipsy. Uvnitř každé elipsy bude mít polohová chyba jinou pravděpodobnost.

Obecně platí pro rovnici elipsy:
$$\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} = 1 \quad (3.48)$$

U rovnice 3.48 se provede substituce pomocí kladné konstanty t^2 , pak bude platit: [13]

$$\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} = t^2 \quad (3.49)$$

Rovnice 3.48 a 3.49 ukazují, že elipsa polohové chyby odvozená z křivky polohové chyby je speciální případ pro $t = 1$. Pravděpodobnost toho, že určitý bod (nazveme ho P) leží uvnitř elipsy předepsané rovnicí 3.55 pro daný koeficient t je: [13]

$$p = P \left\{ \frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \leq t^2 \right\} = 1 - e^{-\frac{1}{2}t^2} \quad (3.50)$$

Vypočtené parametry pro pravděpodobnosti $p = 0,50; 0,86; 0,95; 0,99; 0,9999999$, ukazuje tab. 10:

P	t
0	0
0,50	1,1774
0,86	2
0,95	2,4477
0,99	3,0349
0,9999999	5,6777

Podělíme rovnici 3.41 kladnou konstantou t^2 a tím dostaneme:

$$\frac{x^2}{t^2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{t^2\sigma_y^2} = 1 \quad (3.51)$$

Poté lze použít tab. 10 tak, že do rovnice 3.45 dosadíme parametr t , který ovlivní velikost hlavní a vedlejší poloosy elipsy. Pro elipsu chyb tedy platí, že velikost hlavní poloosy je $u = t\sigma_x$ a velikost vedlejší poloosy je $v = t\sigma_y$. Pro jednoduchou ukázkou užíjeme $t = 2$ s 86 % pravděpodobností, pak plocha elipsy chyb bude mít dvojnásobný rozměr poloos a naměřená chyba bodu P bude ležet v této elipse [13]. V kapitole 3.3.4 byl vysvětlen výpočet elipsy chyb pro dvourozměrný prostor. V případě třírozměrného prostoru (elipsoid) se bude postupovat obdobným způsobem.

4 OVĚŘENÍ POSTUPU

Nyní se zaměříme na výpočet charakteristik chyb na experimentálním vzorku dat, který byl získán statickým měřením za použití systému GPS a GPS + EGNOS. Pro řešení se aplikuje teorie, která byla uvedena v předchozí části diplomové práce. První podkapitola se zaměřuje na praktický výpočet na naměřeném vzorku dat při použití teorie, která je uvedena v kapitole 3.4. Následně bude provedena analýza a komentář k dosaženým výsledkům, které jsou popsány v kapitole 4.2.

4.1 Výpočet charakteristik chyb

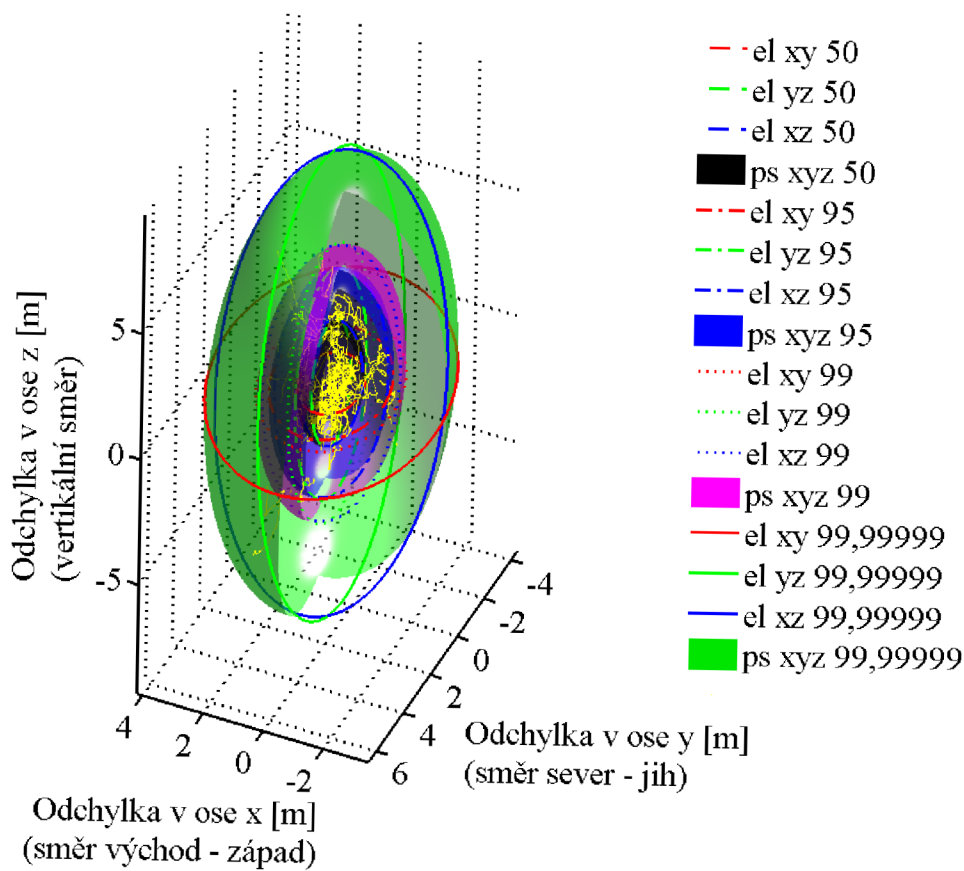
Pro praktický výpočet byly použity vzorky naměřené od referenčního bodu, kterým je fázové centrum antény přijímače základní stanice Leteckého ústavu VUT Brno, umístěné na střeše budovy A1. Naměřené hodnoty vzorků jsou odchylky (chyby) polohy ve směrech od osy x (sever – jih), y (východ – západ) a z (vertikální směr). Průnik těchto os (referenční bod) je středem referenční soustavy. To znamená, že střed antény přijímače má souřadnice [0, 0, 0]. Jedná se o statické měření, které probíhalo po dobu 24 hodin a 4 minuty (86639 sekund, tj. $f = 1,15 \times 10^{-5}$ Hz). Během této doby se počet viditelných satelitů na obloze proměnlivě měnil s časem v rozsahu 5 až 14 satelitů, avšak pro získání dat bylo použito pouze 5 až 11 satelitů.

Použitý přijímač byl schopen přijímat nejen signál ze systému GPS, ale také podporoval příjem signálu z evropského rozšiřujícího systému EGNOS. Měření bylo provedeno a zdokumentováno ve výzkumné zprávě [8]. Výpočet naměřených odchylek polohy se provedl za pomoci dvou následujících metod:

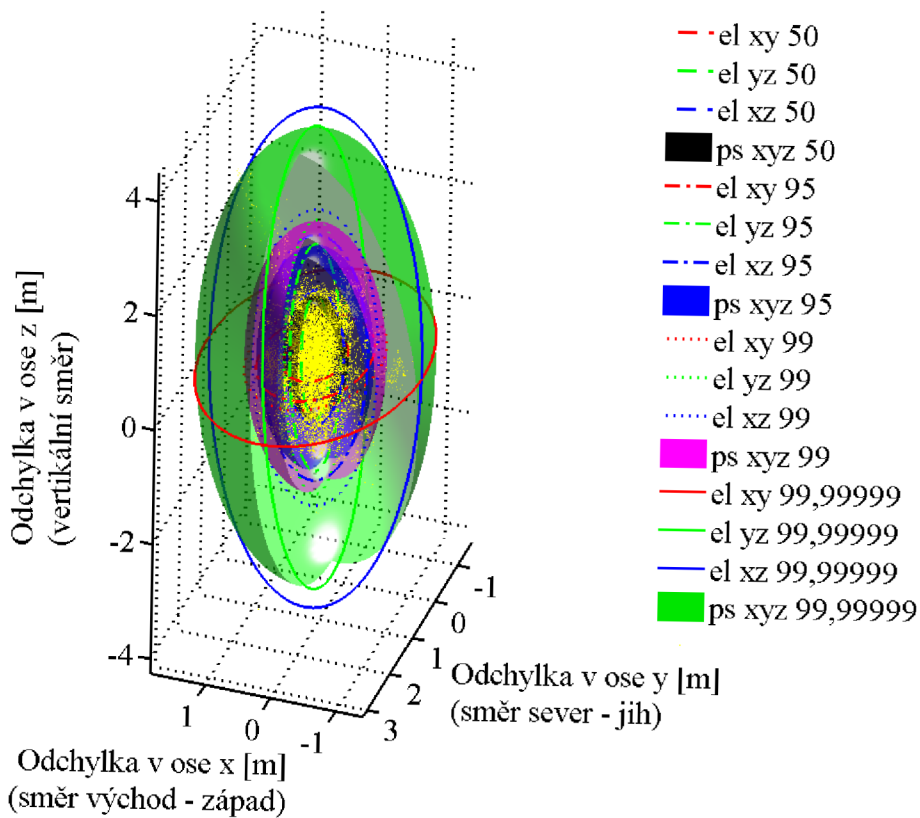
- mód autonomní GPS – MNČ,
- mód přesného přiblížení EGNOS – VMNČ.

Výpočtem se získaly dva druhy dat. První data byla získána pomocí nevážené metody nejmenších čtverců (MNČ = GPS) a druhá za pomoci vážené metody nejmenších čtverců (VMNČ = GPS + EGNOS). Druhá metoda je složitějšího charakteru, a proto určení polohy je přesnější a zároveň realističtější. Autor diplomové práce dostal až výstupy z uvedených metod, kterými byly chyby polohy od referenčního bodu. Následně zahájil výpočet a šetření chyb v prostředí matematického programu MATLAB, ve kterém se naměřené vzorky (odchylky polohy v osách x, y, z) pro názornost prokreslily elipsoidem chyb ve všech směrech (pro použité pravděpodobnosti $p = 0,50; 0,95; 0,99; 0,9999999$).

Pro větší přehlednost a viditelnost naměřených odchylek v elipsoidu chyb, se vykreslil pouze každý pátý bod (tzn. 17238 bodů polohy). Pokud se tak neučiní, vzorky by tvořily nepřehledný „hustý mrak“ bodů. Pro lepší nahlédnutí dovnitř je elipsoid v jednom kvadrátu nařiznut. Uvedená úprava byla provedena jak pro odchylky polohy naměřené pomocí signálu GPS, tak i pro mód EGNOS (GPS + EGNOS). První elipsoid znázorňuje chyby polohy ve třírozměrném prostoru naměřené autonomním módem GPS (obr. 17) a druhý data naměřená za pomoci módu přesného přiblížení EGNOS (obr. 18). Porovnáme-li uvedené obrázky, lze konstatovat, že naměřená data za pomoci módu EGNOS jsou preciznější než data získaná autonomním módem GPS. Podrobnější rozbor je proveden později v komentáři k dosaženým výsledkům (4. 2).



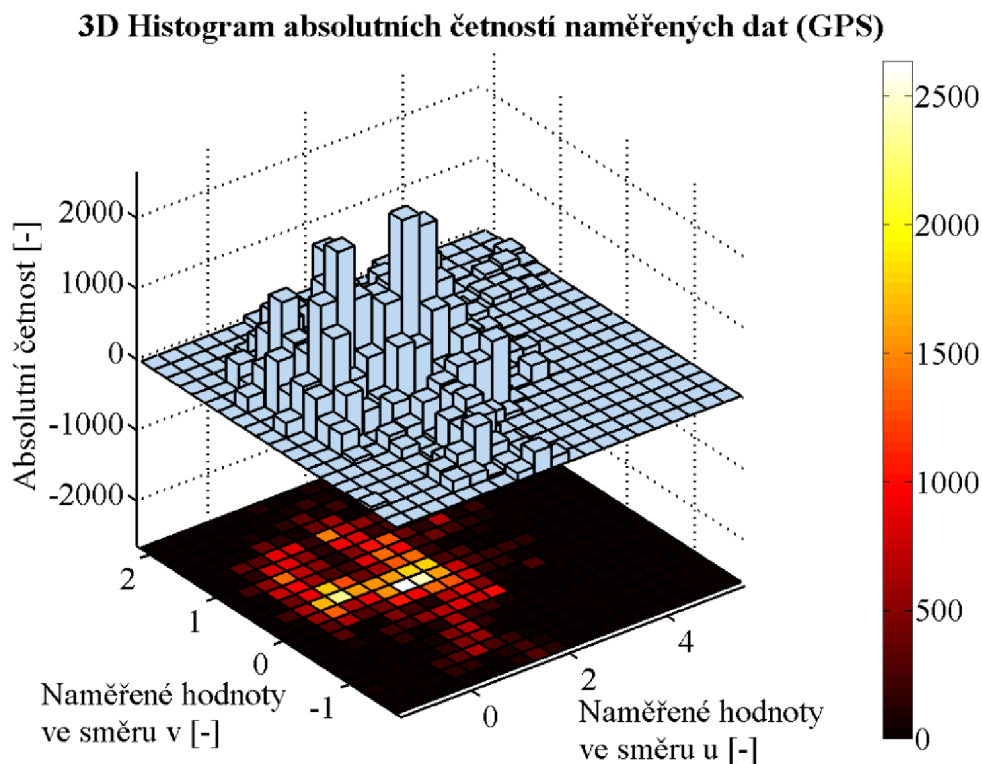
Obr. 17 Vykreslené odchylky polohy ve 3D získané za pomoci GPS.



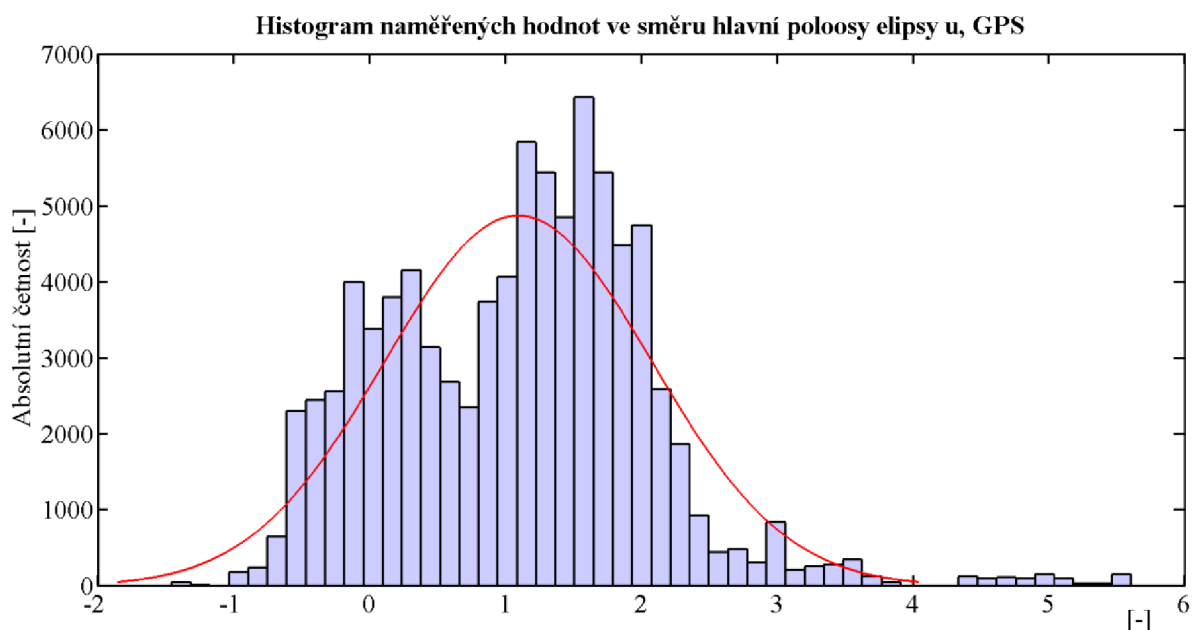
Obr. 18 Vykreslené odchylky polohy ve 3D získané za pomoci EGNOS.

Dalším krokem bylo provedení testu normality, tzv. Chí - kvadrát test. Pro tento test byla zvolena hladina významnosti $\alpha = 5 \%$. Nejdříve se otestovala data naměřená za pomoci GPS. Test se využil pro data jak ve směru x (sever - jih), tak ve směru y (východ – západ). V prvním případě byla hypotéza zamítnuta s hodnotou pravděpodobnosti $p = 0$ (pravděpodobnost 0 %, znamená, že se jedná o normální rozdělení) a v druhém případě byla také pravděpodobnost $p = 0$. V obou případech došlo tedy k zamítnutí, že data GPS mají normální rozdělení. Stejně se postupovalo u šetření normality vzorků získaných módem EGNOS (GPS + EGNOS). Testy nepotvrdily charakter normálního rozdělení. Pro směr x a y vyšla hodnota pravděpodobnosti $p = 0$. Obrázky histogramů dvourozměrného normálního rozdělení ve směrech souřadného systému x a y lze nalézt v příloze 2.

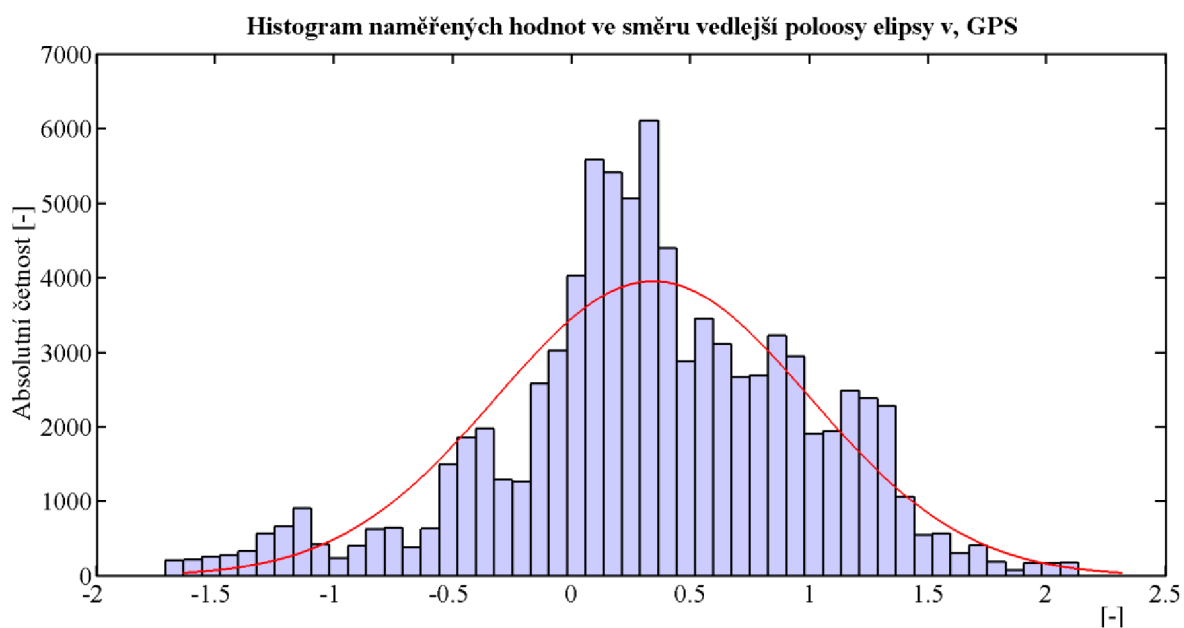
Pro hodnocení přesnosti v horizontální rovině je využito elipsy chyb, která charakterizuje rozložení odchylek polohy. Elipsa chyb je řezem hustoty dvourozměrného normálního rozdělení s velikostí poloos v závislosti na zvolené pravděpodobnosti. Jelikož maximální možná chyba v horizontální rovině je dána velikostí hlavní poloosy elipsy chyb, provedl se test normality ve směrech hlavní a vedlejší poloosy (u, v). Opět byla zvolena hladina významnosti $\alpha = 5 \%$. Pro data GPS byla hypotéza zamítnuta, což vede k předpokladu, že data nemají normální rozdělení s hodnotou pravděpodobnosti $p = 0$ (obr. 19, 20, 21).



Obr. 19 3D histogram absolutních četností pro odchylky ve směrech poloos elipsy chyby podle dat GPS.



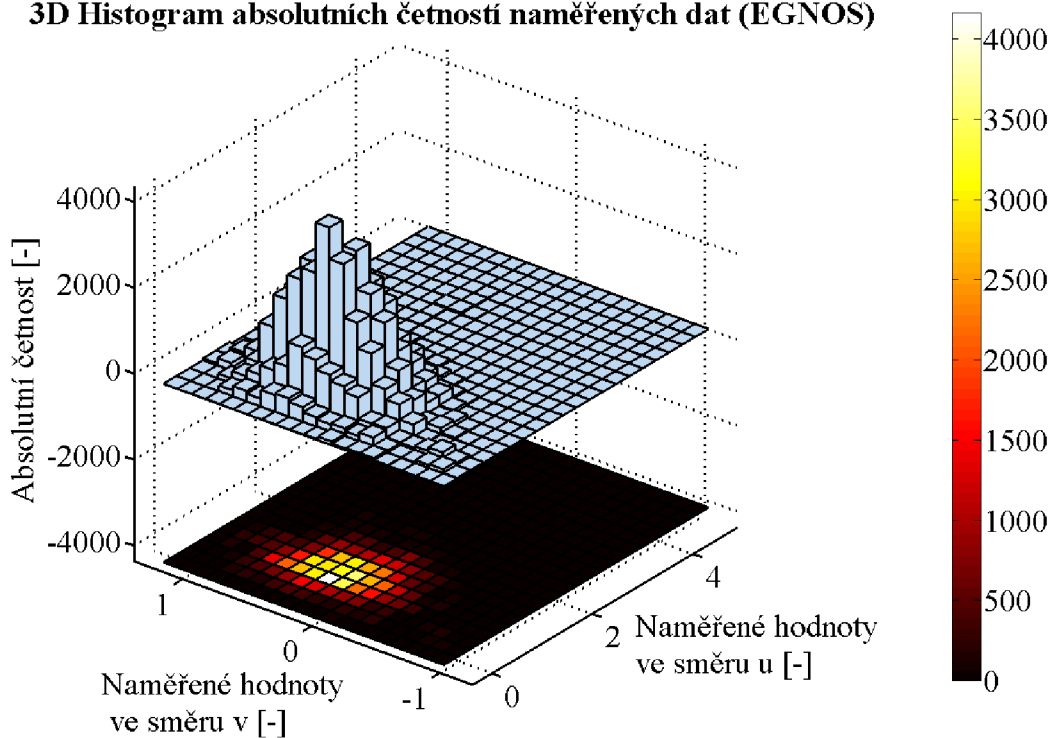
Obr. 20. Histogram absolutních četností chyb ve směru hlavní poloosy elipsy chyb (data GPS)



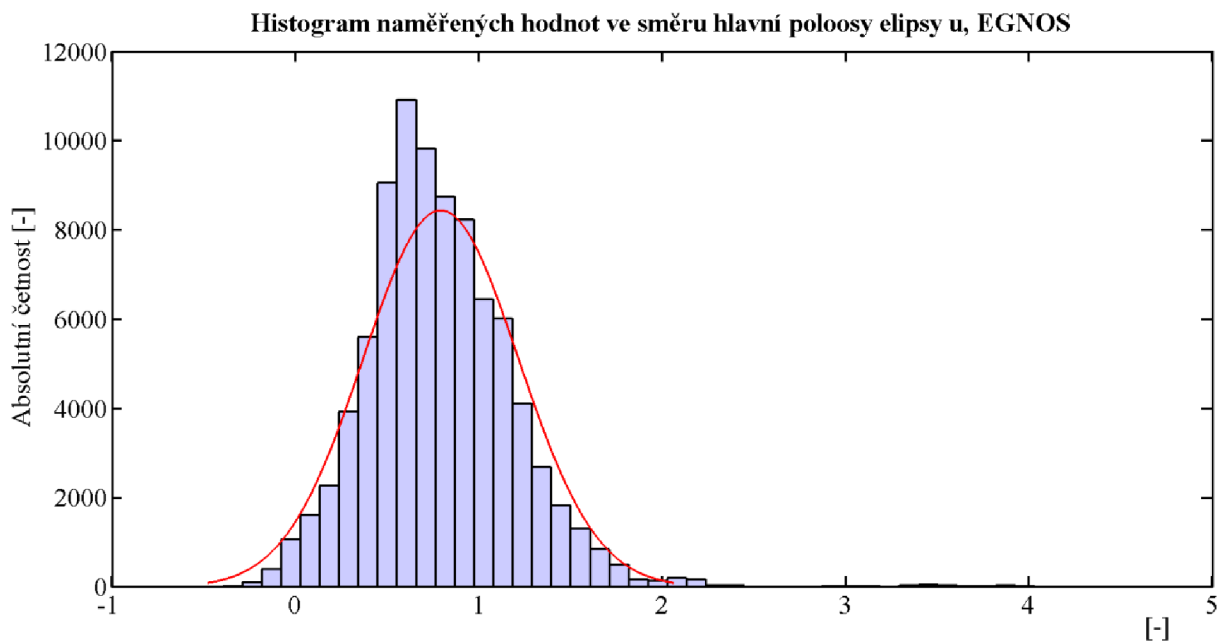
Obr. 21. Histogram absolutních četností chyb ve směru vedlejší poloosy elipsy v (data GPS).

Stejným postupem se testovala data naměřená a vypočtená módem přesného přiblížení EGNOS. Opět i pro tato data byla hypotéza zamítnuta, jak v hlavní, tak ve vedlejší poloose elipsy chyb. Pravděpodobnost toho, že se jedná o normální rozdělení v obou případech je $p = 0$ (obr. 22, 23, 24).

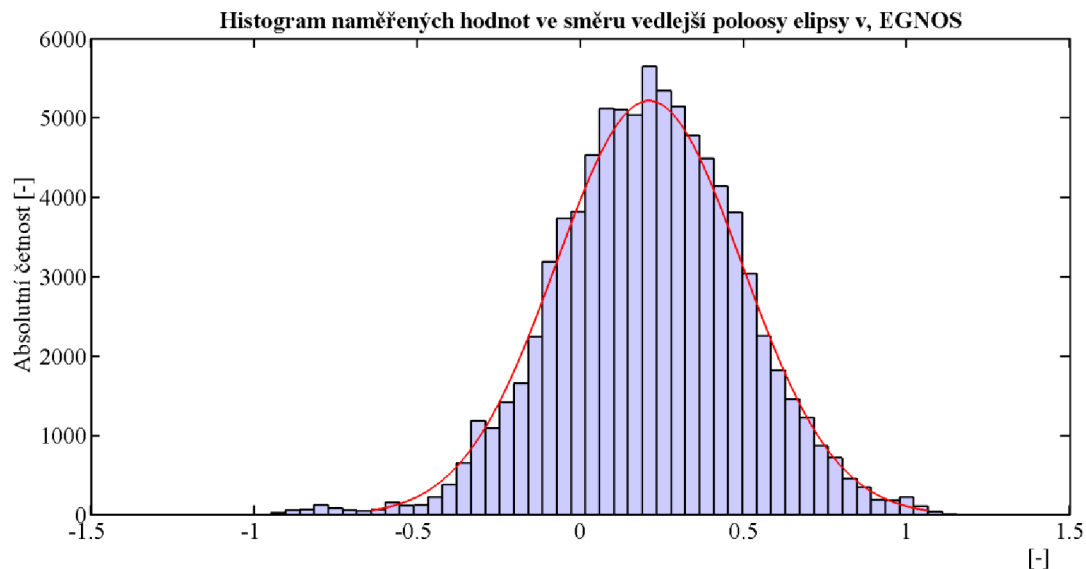
3D Histogram absolutních četností naměřených dat (EGNOS)



Obr. 22 3D histogram absolutních četností pro chyby ve směrech poloos elipsy chyby podle dat EGNOS.



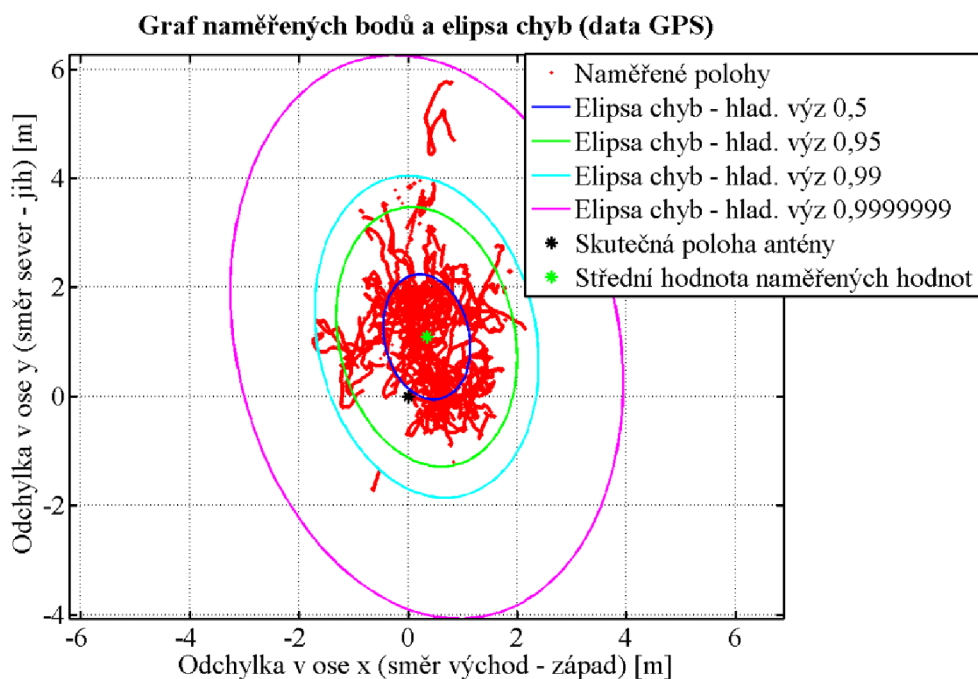
Obr. 23 Histogram absolutních četností chyb ve směru hlavní poloosy elipsy u (data EGNOS).



Obr. 24 Histogram odchylek vedlejší poloosy elipsy v (data EGNOS).

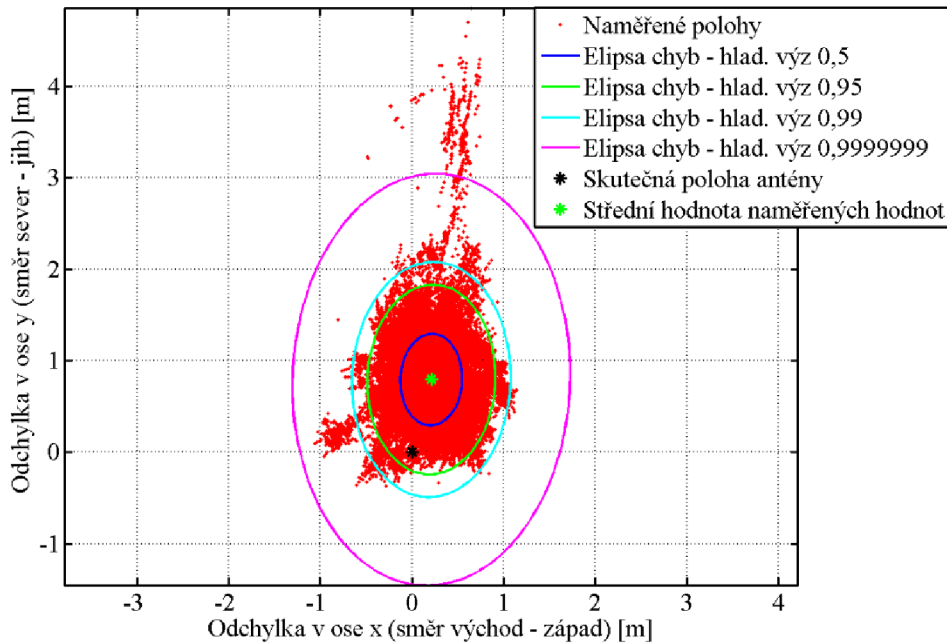
Dále po provedení χ^2 – kvadrát testů, byly odchylky polohy promítnuty do horizontální roviny. Data naměřená jak systémem GPS, tak rozšiřujícím systémem EGNOS se proložila elipsami chyb s hladinami významnosti $p = 0,50$, $p = 0,95$, $p = 0,99$, $p = 0,9999999$. Zvolené hodnoty pravděpodobností nám říkají, s jakou pravděpodobností leží naměřené hodnoty (chyby polohy) uvnitř elipsy chyb. Pravděpodobnost 99, 99999 % byla zvolena jako největší pravděpodobnost pro vykreslení elipsy chyb (5σ). Hladina významnosti $p = 0,95$ reprezentuje dvojnásobnou střední kvadratickou chybu (2σ). Pravděpodobnost $p = 0,50$ se využívá v souvislosti s GPS pod pojmem CEP. Avšak v našem případě se nebude jednat o kružnici, ale o elipsu ohraničující tento interval. Pravděpodobnost 99 % byla vybrána, protože se u normálního rozdělení blíží k hodnotě $3\sigma = 99,8\%$.

Elipsy chyb znázorněné v horizontální rovině pro vzorky naměřené módou autonomního GPS a přesného přiblížení EGNOS ukazují obr. 25 a obr. 26. Poloha referenčního bodu (tzn. střed antény přijímače) je označena pomocí černé hvězdičky. Střed elips je průnikem odhadu středních hodnot naměřených chyb polohy ve směrech x (sever – jih), y (východ – západ) a je znázorněn pomocí zelené hvězdičky.



Obr. 25 Naměřená data pomocí módu GPS proložena elipsami chyb.

Graf naměřených bodů a elipsa chyb (data EGNOS)



Obr. 26 Naměřená data pomocí módu EGNOS proložena elipsami chyb.

Nejdůležitější charakteristiky chyb, které se použily pro výpočet elipsy chyb, jsou uvedeny v tab. 11. V tabulce jsou vypočteny odhady středních hodnot (\bar{x} , \bar{y} , \bar{z}), rozptylů (s_x^2 , s_y^2 , s_z^2) a odhady směrodatných odchylek (s_x , s_y , s_z). Dále velikosti hlavní poloosy elipsy (u), vedlejší poloosy elipsy (v) při daných pravděpodobnostech (50, 95, 99, 99, 999999%), úhel natočení elipsy chyb (Θ), systematická chyba v horizontální rovině ϑ a v prostoru $\bar{\vartheta}$.

Tab. 11. Vypočtené hodnoty charakterizující chyby a elipsu chyb:

Pravděpodobnost [%]	Data GPS				Data GPS + EGNOS			
	50	95	99	99,99999	50	95	99	99,99999
\bar{x} [m]	0,34				0,21			
\bar{y} [m]	1,10				0,79			
s_x^2 [m ²]	0,43				0,08			
s_y^2 [m ²]	0,96				0,18			
s_x [m]	0,66				0,28			
s_y [m]	0,98				0,42			
u [m]	1,16	2,40	2,98	5,23	0,50	1,04	1,28	2,25
v [m]	0,78	1,61	2,00	3,51	0,34	0,70	0,86	1,51
Θ [°]	+ 101,9 od osy x				87,9 od osy x			
\bar{z} [m]	0,18				0,12			
s_z^2 [m ²]	2,81				0,59			
s_z [m]	1,68				0,77			
ϑ (x, y) [m]	1,15				0,82			
$\bar{\vartheta}$ (x, y, z) [m]	1,16				0,83			

4.2 Komentář k dosaženým výsledkům

Šetření chyb se nejdříve uskutečnilo na omezeném počtu vzorků. Byly vybrány tři skupiny dat po 3000 měřeních podle výzkumné zprávy [8]. Zvolené intervaly jsou v mezích 1 - 3000, 3001 - 6000 a 6001 - 9000 naměřených odchylek polohy. Výstupy získané programem MATLAB lze najít v příloze 3. V našem případě se jednalo o časové intervaly, které jdou po sobě. Obecně lze časové intervaly volit libovolně, nemusí být vybrána jejich posloupnost.

Z rozboru výsledků je na první pohled patrné, že každý interval naměřených odchylek vykazuje rozdílné hodnoty charakteristických veličin. V případě tří intervalů, které se pohybují v rámci prvních 9000 vzorků, jsou pozorovány odlišné rozptyly, korelace dat, velikosti hlavních poloos elipsy chyb na dané hladině významnosti a rozdílné horizontální systematické chyby (viz příloha 3.). Důvodem je, že přijímač vidí v určitém čase jistý počet satelitů a zároveň dochází k proměnlivosti jejich geometrie (parametr HDOP). V případě třetího intervalu 6001 - 9001 se jednalo o nejhorší výběr vzorků, což bylo zřejmě způsobeno výskytem nejmenšího počtu satelitů. Oproti tomu druhý interval souboru 3001 - 6000 vzorků vykazuje celkem solidní výsledky ovlivněné dostatečným počtem přijímaných satelitů a jejich rozmístěním na oběžné dráze.

Po odborné konzultaci s panem Ing. Ptáčkem byla stejným způsobem vybrána data a rozdělena do tří skupin po 10000 vzorcích (zvolené intervaly 1 - 10000, 10001 - 20000, 20001 - 30000) s následujícím výsledkem. První dvě skupiny vykázaly podobnou korelaci, horizontální systematickou chybu a rozptyly, avšak třetí výběr byl zcela odlišný. Dosažené výsledky z těchto výběrů (10000 odchylek polohy) byly podstatě lepší než výsledky po 3000 vzorcích, ale přesto nebyly dostatečně reprezentativní. Proto byl výpočet proveden z celého souboru naměřených chyb polohy (86639). Potvrdila se důležitost požadavku předpisu L10, že nezbytná minimální doba měření je pro dosažení reprezentativnosti výsledku 24 hod.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4. 1, nejdříve se provedly testy normality. Avšak všechny provedené χ^2 – kvadrát testy nepotvrdily normalitu dat, jelikož do naměřených bodů chyb polohy se zahrnuly odlehlé hodnoty (tzv. outliers), které je možné pozorovat na obr. 26, 27 v severním směru. Tyto outliers jsou způsobeny tím, že přijímač v době měření mohl vidět nejnižší počet satelitů za celkovou dobu měření a zároveň měla na naměřené hodnoty vliv geometrie satelitů (parametr DOP). Lze konstatovat, že v době naměření outlieru musel být parametr DOP vysoký. Dalším faktorem, který měl vliv na vznik odlehlých hodnot je, že v danou dobu nemusel přijímač přijímat kvalitní korekce. Aby se docílilo normálního rozdělení, musely by se jasně odlehlé hodnoty chyb vyloučit, avšak to je nad rámec diplomové práce. Proto se i nadále k použitým datům přistupuje jako k normálnímu rozdělení.

Při porovnání výsledků celkového počtu naměřených dat systému GPS a EGNOS (obr. 26, 27) lze tvrdit, že naměřená data za pomoci diferenčního systému jsou preciznější a pravdivější. Pravdivost je charakterizována systematickou chybou (ϑ), která určuje vzdálenost od referenčního bodu po střed elipsy chyb. Střed elipsy chyb je dán výběrovými odhady středních hodnot (\bar{x} , \bar{y}) naměřených dat ve směrech sever (x), východ (y). Z výsledků je patrné, že u systému EGNOS bylo dosaženo horizontální systematické chyby 0,821 m oproti chybě dosažené měřením GPS, která je 1,147 m. To znamená, že došlo ke snížení horizontální systematické chyby o 28,4 % (tab. 11). Obdobných výsledků se dosáhlo v případě celkové systematické chyby (ve směrech x , y , z), kdy došlo ke zlepšení systematické chyby z 1,161 m na 0,829 m, tedy o 28,6 %.

Rozšiřující systém EGNOS systematickou chybu zcela neeliminoval, což vedlo k tomu, že střed referenčního bodu není středem elipsy chyb. Pro požadavky civilního letectví je

zbytková systematická chyba nevýznamná. U konvenčních systémů se systematická chyba odstraňuje např. na palubě letounu zavedením korekce, doladěním, popřípadě kompenzací apod. Avšak u systému GNSS je tento proces velice náročný.

Elipsy chyb v horizontální rovině znázorňují nejen systematickou chybu, ale i náhodnou chybu (obr 30, 31). Maximální možná náhodná chyba se hodnotí v závislosti na pravděpodobnosti a dosáhlo se následujících výsledků:

- $p = 0,50$ (CEP) – maximální možná hodnota náhodné chyby určení polohy získaná z dat naměřených módem EGNOS je 0,50 m, oproti chybě dosažené měřením GPS 1,16 m.
- $p = 0,95$ – maximální možná hodnota náhodné chyby polohy získaná z dat naměřených módem EGNOS je 1,04m, oproti chybě dosažené měřením GPS 2,40 m.
- $p = 0,99$ – maximální možná hodnota náhodné chyby polohy získaná z dat naměřených módem EGNOS je 1,28 m, oproti chybě dosažené měřením GPS 2,98 m.
- $p = 0,9999999$ – maximální možná hodnota náhodné chyby polohy získaná z dat naměřených módem EGNOS je 2,25m, oproti chybě dosažené měřením GPS 5,23 m.

Ve všech výše uvedených případech mód EGNOS snížil maximální možnou náhodnou chybu polohy oproti autonomnímu módu GPS až o cca 57 %.

V případě hodnocení maximální možné chyby ve vertikálním směru se využije hodnocení pomocí odhadu střední kvadratické chyby. Hodnotu maximální možné chyby ve vertikálním směru snížil systém EGNOS oproti GPS z 1,677 m na 0,770 m, kdy došlo ke snížení chyby až o 54 %.

V literatuře [36] se udává, že navigační systém EGNOS poskytuje horizontální přesnost v rozsahu 1 - 3 m a vertikální přesnost 2 - 4 m (95 %). Uváděné údaje jsou průměrnými hodnotami chyb polohy, které jsou měřené ve vztahu k minimálnímu počtu satelitů, tj. čtyři družice. V případě praktické části diplomové práce jsou naměřené hodnoty chyb získány od několika satelitů, to znamená, že výsledné chyby polohy jsou objektivnější. Zahrnují v sobě vliv atmosféry, geometrii více družic, odrazy apod, přesto se dosáhlo velice kvalitních výsledků. Při měření systémem EGNOS bylo dosaženo zbytkové horizontální systematické chyby 0,82 m a maximální možné náhodné chyby 1,04m (95 %). Po sečtení těchto hodnot byla obdržena celková chyba o velikosti 1,82 m. Lze konstatovat, že reálně naměřená hodnota se nachází v rozsahu 1 - 3 m uváděným dle literatury.

Systematická chyba ve vertikální rovině je dána vzdáleností odhadu střední hodnoty odchylek chyb \bar{z} od počátku souřadného systému, bylo vypočteno $\bar{z} = 0,12$ m. Maximálně možná náhodná chyba ve vertikální rovině s pravděpodobností 95 % je 1,54 m. Sečtením systematické a náhodné chyby obdržíme celkovou chybu ve vertikálním směru, která je 1,66 m. Výpočtem bylo dosaženo přesnější hodnoty než 2 - 4 m, jak je uváděno v literatuře.

Z výše uvedených výsledků je patrné, že nově zavedený rozšiřující systém EGNOS dosahuje podstatně lepších kvalitativních vlastností v porovnání se systémem GPS.

ZÁVĚR

Hlavní náplní diplomové práce je zjišťování chyb globálního polohového systému GPS a rozšiřujícího systému EGNOS. První kapitola čtenáře nejdříve seznamuje obecně s těmito systémy. Popisuje zdroje chyb, které mají vliv na přesnost a současně charakteristiky chyb využívané v oblasti GNSS. Specifikuje výhody rozšiřujícího evropského systému GPS + EGNOS oproti základnímu globálnímu navigačnímu systému GPS. Jsou zde definované pojmy týkající se přesnosti, které se využívají v radionavigaci. Druhá kapitola popisuje koncepci PBN, která je novou cestou v letecké navigaci a vyjadřuje důležitost využití satelitních systémů v porovnání s konvenčními zařízeními. Jsou zde definovány požadavky kladené na výkonnost signálu v prostoru pro jednotlivé letecké operace globálních navigačních satelitních systémů.

Další kapitola se věnuje samotnému zjišťování chyb evropského GNSS. Popisuje postup definovaný požadavky civilního letectví, který je pro jednoduché pochopení přehledně popsán v kapitole 3.2. Definuje pojmy využívané pro chyby u radionavigačního měření a jejich možný výskyt u GNSS. V práci je zvolen postup šetření chyb navigačního měření z hlediska radionavigace, který je v této kapitole zevrubně zpracován. Jsou zde popsány jednotlivé fáze postupu a matematicky definované důležité veličiny popisující vlastnosti statistického souboru, které jsou nezbytné pro výpočet elipsy chyb.

V poslední kapitole je aplikována teorie a ověření postupu na reálném vzorku naměřených chyb polohy při statické observaci. Je zde popsán krok za krokem proces, který byl využit ke zpracování výsledků. Tato část zahrnuje výstupy zpracované programem MATLAB, kterými jsou histogramy, elipsy chyb a vypočítané charakteristiky chyb reálně naměřených odchylek polohy. Poté se provedlo vyhodnocení dosažených výsledků, o kterých bylo pojednáno v podkapitole 4.1. Výstupem diplomové práce bylo porovnání naměřených chyb polohy pomocí autonomního módu GPS s módem přesného přiblížení GPS + EGNOS. Evropský rozšiřující systém umožnil snížit celkovou systematickou chybu o cca 28 % a maximálně možnou náhodnou chybu zhruba v rozsahu 54 - 57 % vůči základnímu navigačnímu prvku GPS. Dosažené výsledky ukazují, že nově zavedený rozšiřující systém EGNOS dosahuje podstatně lepších kvalitativních vlastností v porovnání se systémem GPS. V příloze na CD je uložen algoritmus v programovém prostředí MATLAB, který byl použit pro zpracování dat.

Globální navigační satelitní systémy jsou příslibem do budoucna. V současnosti již předčily v oblasti přesnosti konvenční systémy a je jen otázkou času, než konvenční systémy budou zcela nahrazeny. Důkazem je vznik nové koncepce PBN, která se již opírá o výkonnost GNSS. Koncepce PBN za pomoci satelitní navigace přináší nové řešení umožňující snížit popřípadě eliminovat počet pozemních navigačních majáků, počet používaných druhů zařízení využívaných pro radionavigaci a zvýšit efektivní využití vzdušného prostoru.

SEZNAM LITERATURY

Tištěné zdroje literatury:

1. BAKYTOVÁ, H., J. HÁTLE, I. NOVÁK a M. UGRON. *Statistická indukce pro ekonomy*. Praha: SNTL a ALFA, 1986. ISBN L31-C3-IV-41/38362.
2. ČERMÁK, Libor a Rudolf HLAVIČKA. VUT. *Numerické metody*. Vyd. 2. VUT Brno: CERM s.r.o Brno, 2008. ISBN 978-80-214-3752-4.
3. FILIP, A. a J. SUCHÁNEK. Certifikace satelitního signálu GALILEO pro železniční aplikace. In: *Vědeckotechnický sborník ČD*. Praha: Generální ředitelství Českých drah, 2006, s. 13.
4. HRDINA, Z., P. PÁNEK a F. VEJRAŽKA. *Rádiové určování polohy: Družicové systémy GPS*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01386-3.
5. KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV: statistika a pravděpodobnost*. 3. dopl. vyd. Brno: CERM, 2007, 170 s. ISBN 978-80-214-3380-9.
6. KEVICKÝ, Dušan. *Navigácia v leteckej doprave*. 4. Bratislava: Alfa, 1969. ISBN 4-618494 - 80.
7. KEVICKÝ, Dušan. *Satelitné navigačné systémy*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 2004, 197 s. ISBN 80-807-0295-0.
8. PTÁČEK P.; *Analýza prostriedkú pro zvyšování kapacity a propustnosti vzdušného prostoru a realizace návrhu sledování a hodnocení služby GNSS*. Výzkumná zpráva č. LU 60-2011-HRC OST. Letecký ústav Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011.
9. PTÁČEK, Pavel. Today's GNSS Navigation Accuracy with Combined GPS/EGNOS. In: *Zvyšovanie kvality a bezpečnosti v civilnom a vojenskom letectve*. Žilina: EDIS, 2012, s. 251-261. ISBN 978-80-554-0519-3.
10. RAPANT, Petr. *Družicové polohové systémy*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002, 197 s. ISBN 80-248-0124-8.
11. VOSECKÝ, Slavomír. *Radionavigace (062 00): [učební texty dle předpisu JAR-FCL 1]*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 236 s. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-720-4448-6.
12. VOSECKÝ, Slavomír a kolektiv: *Základy leteckých navigačních zařízení*, Brno, Vojenská akademie, 1988, 750s.

Elektronické zdroje literatury:

13. BITTERER, Ladislav. Vyrovnávací počet II: Učebný text pre študentov bakalárskeho štúdia odboru geodézia a kartografia. In: *Vyrovnávací počet II: Učebný text pre študentov bakalárskeho štúdia odboru geodézia a kartografia* [online]. 2003 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z: <http://svf.utc.sk/kgd/skripta/vp2/index.html>
14. ČÁBELKA, Miroslav. Úvod do GPS. In: *Univerzita Karlova v Praze, Katedra aplikované geoinformatiky* [online]. 2008 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/vyuka/gps/skriptum-uvod-do-gps>
15. EGNOS SERVICE NOTICE. In: *EGNOS SERVICE NOTICE* [online]. 2012 [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: http://www.essp-sas.eu/downloads/oobwxqecj/service_notice_3v1_upcoming_egnoss_upgrades_in_q1_2012.pdf
16. EGNOS: EUROPEAN GEOSTATIONARY NAVIGATION OVERLAY SERVICE. [online]. 2009, 1-10 [cit. 2011-12-27]. Dostupné z: http://www.egnoss-pro.esa.int/Publications/ESA_EGNOS_br284_2009.pdf
17. EGNOS: Safety of Life - Service Definition Document. In: *ESA publications* [online]. 2011 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/egnoss/files/egnoss-sol-sdd-v1.0_en.pdf
18. *Federal radionavigation plan*. 2010. Dostupné z: http://www.navcen.uscg.gov/pdf/2010_FRP_FINAL_Signed.pdf
19. FORSSELL, B. The dangers of GPS/GNSS. *Coordinates* [online]. 2009(2), 6-8 [cit. 2012-01-23]. Dostupné z: <http://mycoordinates.org/pdf/feb09.pdf>
20. *Global Navigation Satellite Systems*. In: *My Georamblings* [online]. 2011 [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://georamblings.com/wp-content/uploads/2012/02/Lecture11-GNSS.pdf>
21. GPS Status and Modernization. In: *Space - Based positioning navigation and timing* [online]. 2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.pnt.gov/advisory/2011/11/martin.pdf>
22. GURU RAO, Vyasraj, Gérard LACHAPELLE a Vijay KUMAR. Analysis of IRNSS over Indian Subcontinent. *ION ITM* [online]. 2011, B5 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: http://plan.geomatics.ucalgary.ca/papers/ion_itm11_rao%20et%20al_jan11.pdf
23. HESSIN, Col Robert M. GPS Constellation, Modernization Plans and Policy. In: *Official U. S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics* [online]. 10.11 2011 [cit. 2012-03-23]. Dostupné z: <http://www.gps.gov/multimedia/presentations/2011/11/USTTI/hessin.pdf>
24. JEŘÁBEK, Jaroslav. Úloha ATM systémů při podpoře nových způsobů a metod letecké navigace. *Mezinárodní vědecká konference* [online]. 2011, č. 11 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: http://www.vojenskaskola.cz/skola/uo/fvt/struktura/k206/Documents/veda/MDSPSL2011_Sbornik.pdf

25. LAURE, Anne a Vogel EGIS - AVIA. GNSS linked to PBN concept. In: *GNSS linked to PBN concept* [online]. 2011 [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: <http://siraj.ec.pildo.com/uploads/Rabat/files/GNSS%20linked%20to%20PBN%20Concept.pdf>
26. LUŽICA, Štefan a Pavel GRECMAN. Aircraft Position Accuracy determination on the base of Ellipse or Ellipsoid Error Probable. In: *University of Defence in Brno, Czech Republic* [online]. 2008 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <https://appl.vojenskaskola.cz/Guarantee/Pages/PDF/ShowPublikaceDPB.aspx?ID=a7dde91b-ce9a-4d82-ab97-9d69a4d10cb9>
27. MAREK, Josef a Ladislav ŠTĚPÁNEK. PŘESNOST SATELITNÍHO NAVIGAČNÍHO SYSTÉMU GPS A JEHO DOSTUPNOST V KRITICKÝCH PODMÍNKÁCH. [online]. 2009, 4(3), 162-173s [cit. 2011-12-24]. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/15_2009/Marek.pdf
28. MCDONALD, Keith D. a Christopher HEGARTY. Post-Modernization GPS Performance Capabilities. In: MCDONALD. *Proceedings of ION annual Meeting, San Diego, CA*, [online]. 2000 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: <http://www.mygarmin.ch/dok-gps/gps-zukunft.pdf>
29. *Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.gps.gov/systems/gps/control/>
30. PISCA, Peter. Globálne navigačné systémy. In: *Globálne navigačné systémy* [online]. 2005 [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://www.4-construction.com/sk/clanok/globalne-navigacne-systemy/>
31. RUSSO, Anthony J. Global Positioning System: A Revolution Now in Evolution. In: *Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics* [online]. 17.3 2011 [cit. 2012-03-23]. Dostupné z: <http://www.gps.gov/multimedia/presentations/2011/03/ohio/russo.pdf>
32. Satellite Based Augmentation System Review. In: *Australian Government: Department of Infrastructure and Transport* [online]. Květen 2011 [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: http://www.infrastructure.gov.au/aviation/sbas/files/SBAS_Review.pdf
33. *Terminologie z oblasti metrologie* [online]. 2010 [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/podklady_vyuka/terminologie_metrolog2010.pdf
34. *Testy normality* [online]. Olomouc, 2008 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <http://mant.upol.cz/soubory/OdevzdanePrace/B08/b08-06-vn.pdf>. Bakalářská práce. UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI.
35. Úřad pro civilní letectví. Letecký předpis L 10/I : *O civilní letecké telekomunikační službě: Svazek I: Radionavigační prostředky* [online]. Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, 2003, poslední změna 2010-11-18 [cit. 2011-10-20]. Uveřejněno pod č. j. 1285/2003-220-SP/1. Dostupné z: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
36. User guide for EGNOS: application developers. In: *User guide for EGNOS* [online]. 2009 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/satnav/egnos/files/brochures-leaflets/egnos-user-guide_en.pdf

37. WEIGEL, Josef. Teorie chyb a vyrovnávací počet 1: Měřičské chyby. In: *Teorie chyb a vyrovnávací počet 1* [online]. Brno, 2004 [cit. 2012-02-25]. Dostupné z: <http://data.vypecky.info/Pro%20geodety/vyrovnava/teoriechybavyrovnacipocetI-merickechyby.pdf>
38. ZOGG, Jean-Marie. *GPS Basics* [online]. 2002 [cit. 2012-01-22]. ISBN GPS-X-02007. Dostupné z: http://faculty.ksu.edu.sa/hbilani/SE412books/GPS_basics_u_blox_en.pdf

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Seznam zkratek

Zkratka	Anglicky	Česky
AAIM	Aircraft Autonomous Integrity Monitoring	Autonomní monitorování integrity v letadle
ABAS	Airborne Based Augmentation Systems	Systemy s palubním rozšířením
APV	Approach Procedure with Vertical guidance	Postup přiblížení podle přístrojů s vert. vedením
ASQF	Application Facility and Qualification Facility	Francouzské podpůrné středisko systému EGNOS
C/A	Coarse/Acquisition	Kód pro službu SPS GPS
CEP	Circular Error Probable	Kruh pravděpodobné chyby (nejistoty)
DGPS	Differential Global Positioning System	Diferenční globální polohový systém
DME	Distance measuring equipment	Dalkoměrné zařízení
DOP	Dilution of Precision	Faktor snížení přesnosti
ECAC	European Civil Aviation Conference	Evropská konference civilního letectví
EGNOS	European Geostacionary Navigation Overlay Service	Evropská geostacionární rozšiřující služba
ESA	European Space Agency	Evropská kosmická agentura
EWAN	EGNOS Wide Area Communication Network	EGNOS vysokorychlostní síť pro přenos dat
FMS	Flight Management System	Letový řídicí systém
FRP	Federal Radionavigation Plan	Federální radionavigační plán USA
Gagan	GPS Aided Geo Augmented Navigation	Indický rozšiřující systém
GBAS.	Ground Based Augmentation Systems	Systemy s pozemním rozšířením
GDOP	Geometric Dilution of Precision	Faktor geometrického snížení přesnosti
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globální navigační satelitní systém
GPS	Global Positioning System	Globální polohový systém

GRAS	Ground-based Regional Augmentation System	Systém s pozemním regionálním rozšířením
HDOP	Horizontal Dilution of Precision	Faktor horizontálního snížení přesnosti
HNSE	Horizontal Navigation System Error	Navigační systémová chyba v horizontální rovině
HPE	Horizontal Position Error	Horizontální chyba polohy
ICAO	International Civil Aviation Organisation	Mezinárodní organizace civilního letectví
IFR	Instrument Flight Rules	Let podle přístrojů
ILS	Instrument Landing System	Systém přesných přibližovacích majáků
LAAS	Local Area Augmentation System	Místní rozšíření systému
LNAV	Lateral Navigation	Mód FMS horizontální navigace
MCC	Master Control Centre	Hlavní řídicí centrum EGNOS
MLS	Microwave Landing System	Mikrovlnný přistávací systém
MNČ		Metoda nejmenších čtverců
MSAS	MTSAT Satellite Based Augmentation System	Systém s rozšířením pomocí satelitů MTSAT
MTSAT	Multifunctional Transport Satellite	Multifunkční dopravní geostacionární satelit
NLES	Navigation Land Earth Station	Pozemní navigační stanice EGNOS
NPA	Non Precision Approach	Nepřesné přístrojové přiblížení
NSE	Navigation System Error	Navigační systémová chyba
P	Precision, Protected	Kód pro službu PPS GPS
PA	Precision Approach	Přesné přiblížení
PACF	Performance Access Checkout Facility	Španělské středisko podpory EGNOS
PBN	Performance Based Navigation	Navigace založená na výkonnosti
PDOP	Position Dilution of Precision	Faktor polohového snížení přesnosti
PPS	Precise Positioning Service	Přesná polohová služba
PRN	Pseudorandom Noise	Pseudonáhodný šum
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring	Autonomní monitorování integrity v přijímači
RIMS	Ranging And Integrity Monitoring Stations	Měřicí a monitorovací stanice EGNOS
RMS	Root Mean Square	Střední kvadratická chyba

RNAV	Area Navigation	Prostorová navigace
RNP	Required Navigation Performance	Požadovaná navigační výkonnost
SA	Selective Availability	Výběrový přístup GPS
SBAS	Satellite Based Augmentation Systems	Systémy se satelitním rozšířením
SEP	Spherical Error Probable	Pravděpodobná prostorová chyba
SPS	Standard Positioning Service	Standardní polohová služba GPS
TDOP	Time Dilution of Precision	Faktor časového snížení přesnosti
TMA	Terminal Control Area	Koncová řízená oblast
UEE	User Equipment Error	Chyba uživatelského zařízení
UERE	User Equivalent Range Error	Měření pseudovzdálenosti satelit-přijímač uživatele
URE	User Range Error	Chyba určení vzdálenosti uživatele
VDOP	Vertical Dilution of Precision	Faktor vertikálního snížení přesnosti
VIM 3	International Vocabulary of Metrology 3	Mezinárodní metrologický slovník
VMNČ		Vážená metoda nejmenších čtverců
VNAV	Vertical Navigation	Mód FMS vertikální navigace
VNSE	Vertical Navigation System Error	Navigační systémová chyba ve vertikální rovině
VOR	VHF omnidirectional radio range	Všesměrový radiový maják
VPE	Vertical Position Error	Vertikální chyba polohy
WAAS	Wide Area Augmentation System	Americký rozšiřující družicový systém

Seznam symbolů

Zkratka	Jednotka	Popis
c	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost světla
$E(x)$	$[m]$	Střední hodnota
h	$[m^{-1}]$	Míra přesnosti
p	$[\%]$	Pravděpodobnost
$R_A^j(t)$	$[m]$	Pseudovzdálenost j – tého satelitu
s_y	$[m]$	Odhad směrodatné odchytky ve směru sever - jih
s_y^2	$[m^2]$	Odhad rozptylu ve směru ve směru sever - jih
s_x	$[m]$	Odhad směrodatné odchytky ve směru východ - západ
s_x^2	$[m^2]$	Odhad rozptylu ve směru východ - západ
s_z	$[m]$	Odhad směrodatné odchytky ve vertikálním směru
s_z^2	$[m^2]$	Odhad rozptylu ve vertikálním směru
u	$[m]$	Velikost hlavní poloosy elipsy chyb
v	$[m]$	Velikost vedlejší poloosy elipsy chyb
\bar{y}	$[m]$	Odhad střední hodnoty ve směru sever - jih
\bar{x}	$[m]$	Odhad střední hodnoty ve směru východ - západ
\bar{z}	$[m]$	Odhad střední hodnoty ve vertikálním směru
$\delta_A(t)$	$[s]$	Časová korekce přijímače
$\delta^j(t)$	$[s]$	Časová korekce hodin j – tého satelitu
Θ	$[^\circ]$	Orientační úhel elipsy chyb
ρ_{xy}	$[-]$	Koeficient korelace
σ_x	$[j]$	Směrodatná odchytky
σ_x^2	$[j^2]$	Rozptyl
σ_{xy}	$[j^2]$	Kovariance
ϑ	$[m]$	Systematická chyba v horizontu
$\bar{\vartheta}$	$[m]$	Systematická chyba v prostoru

PŘÍLOHA

Příloha 1:

Odvození metody nejmenších čtverců

Metoda je založena na principu, že součet čtverců reziduálních odchylek mezi regresní funkcí a naměřenými hodnotami je minimální. To znamená, že nutnou podmínkou pro minimalizaci odchylek je, že parciální derivace podle jednotlivých proměnných se rovná nule. [19]

$$\text{Platí: } S_A^j(t) = \sum_{i=1}^n (W_A^j(t) - l_A^j(t))^2 = \varepsilon^2 = \text{minimum} \quad (\text{p1.1})$$

$$\text{Kde: } W_A^j(t) = a_{XA}^j(t)dX_A + a_{YA}^j(t)dY_A + a_{ZA}^j(t)dZ_A - cd\delta_A(t) \quad (\text{p1.2})$$

$$S_A^j(t) = \sum_{i=1}^n (a_{XA}^j(t)dX_A + a_{YA}^j(t)dY_A + a_{ZA}^j(t)dZ_A - cd\delta_A(t) - l_A^j(t))^2 \quad (\text{p1.3})$$

Aby byl zajištěn požadavek zajištění minima, musí být splněno:

$$\frac{\partial S_A^j(t)}{\partial a_{XA}^j(t)} = \frac{\partial S_A^j(t)}{\partial a_{YA}^j(t)} = \frac{\partial S_A^j(t)}{\partial a_{ZA}^j(t)} = \frac{\partial S_A^j(t)}{\partial c} = 0 \quad (\text{p1.4})$$

Parciální derivací rovnice 3.15 podle jednotlivých parametrů se obdrží:

$$\frac{\partial f(S_A^j(t))}{\partial a_{XA}^j(t)} = a_{XA}^j(t)dX_A + a_{YA}^j(t)dY_A + a_{ZA}^j(t)dZ_A - cd\delta_A(t) - l_A^j(t) = 0 \quad (\text{p1.5})$$

$$\frac{\partial f(S_A^j(t))}{\partial a_{YA}^j(t)} = a_{XA}^j(t)dX_A + a_{YA}^j(t)dY_A + a_{ZA}^j(t)dZ_A - cd\delta_A(t) - l_A^j(t) = 0 \quad (\text{p1.6})$$

$$\frac{\partial f(S_A^j(t))}{\partial a_{ZA}^j(t)} = a_{XA}^j(t)dX_A + a_{YA}^j(t)dY_A + a_{ZA}^j(t)dZ_A - cd\delta_A(t) - l_A^j(t) = 0 \quad (\text{p1.7})$$

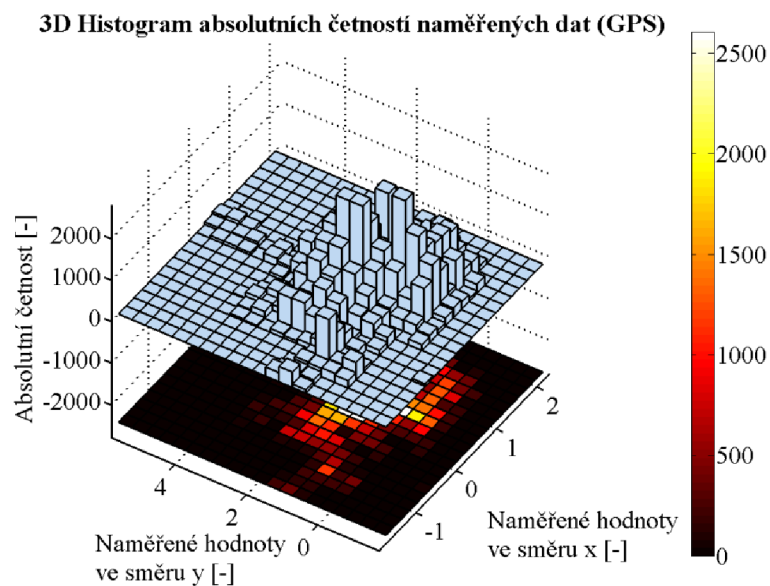
$$\frac{\partial f(S_A^j(t))}{\partial c} = a_{XA}^j(t)dX_A + a_{YA}^j(t)dY_A + a_{ZA}^j(t)dZ_A - cd\delta_A(t) - l_A^j(t) = 0 \quad (\text{p1.8})$$

Zápis rovnic do maticového tvaru:

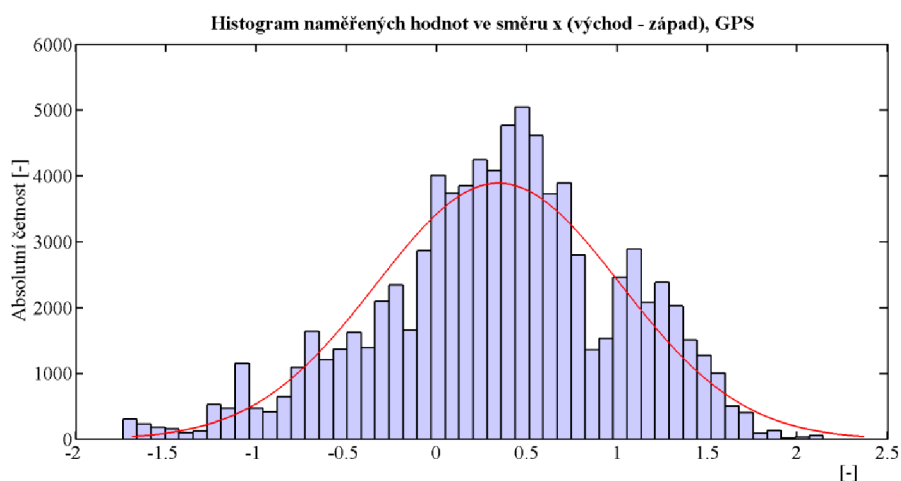
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{XA}^1 & a_{YA}^1 & a_{ZA}^1 & -1 \\ a_{XA}^2 & a_{YA}^2 & a_{ZA}^2 & -1 \\ a_{XA}^3 & a_{YA}^3 & a_{ZA}^3 & -1 \\ a_{XA}^4 & a_{YA}^4 & a_{ZA}^4 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_A^1(t) \\ l_A^2(t) \\ l_A^3(t) \\ l_A^4(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta X_A \\ \Delta Y_A \\ \Delta Z_A \\ c \cdot \Delta \delta_A(t) \end{bmatrix} \quad (\text{p1.9})$$

Příloha 2:

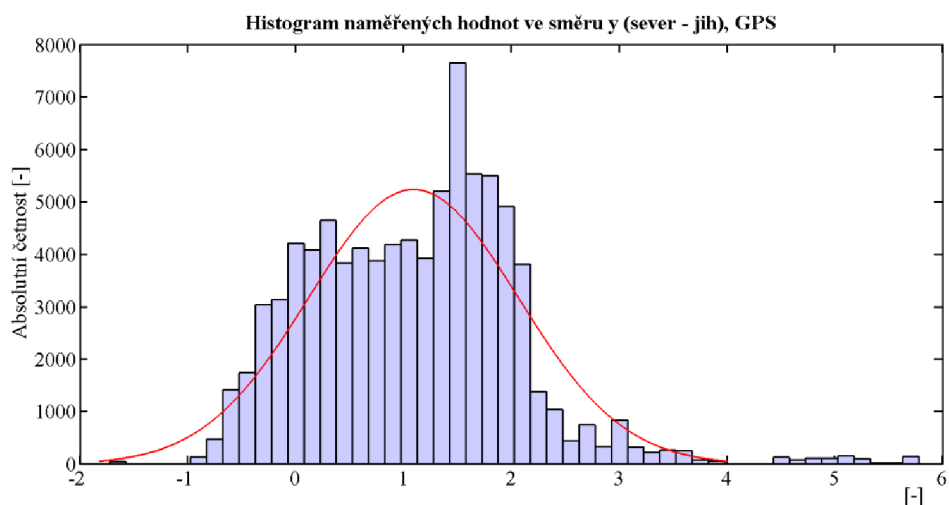
Testy normality dat ve směrech os x a y (data GPS)



Obr. 27 3D histogram absolutních četností naměřených chyb ve směrech x a y.

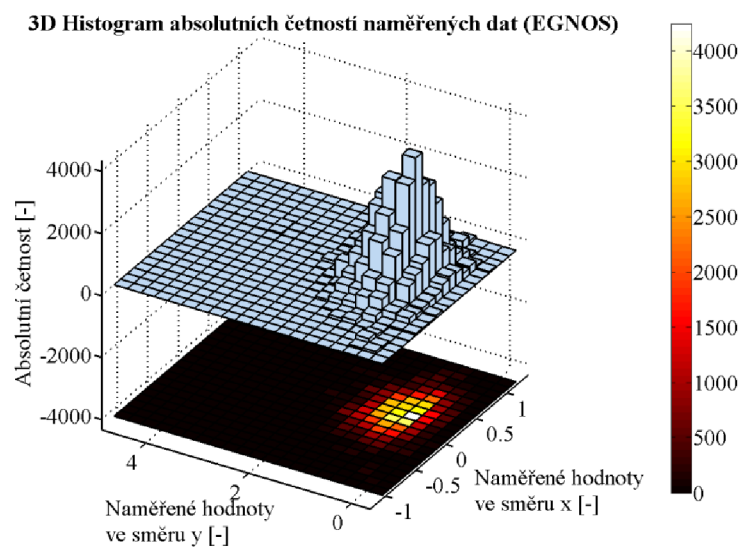


Obr. 28 Histogram absolutních četností naměřených chyb ve směru východ – západ.

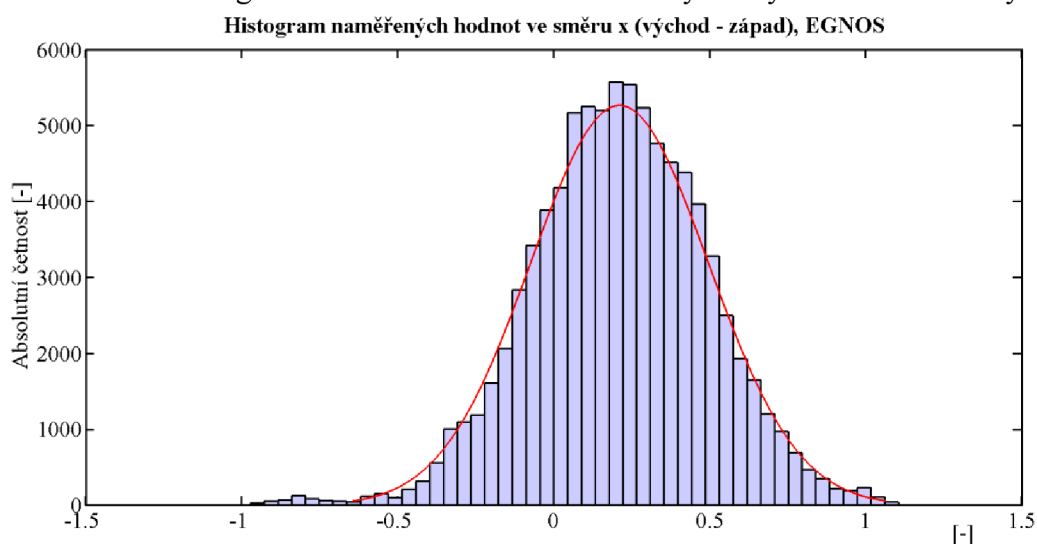


Obr. 29 Histogram absolutních četností naměřených chyb ve směru sever – jih.

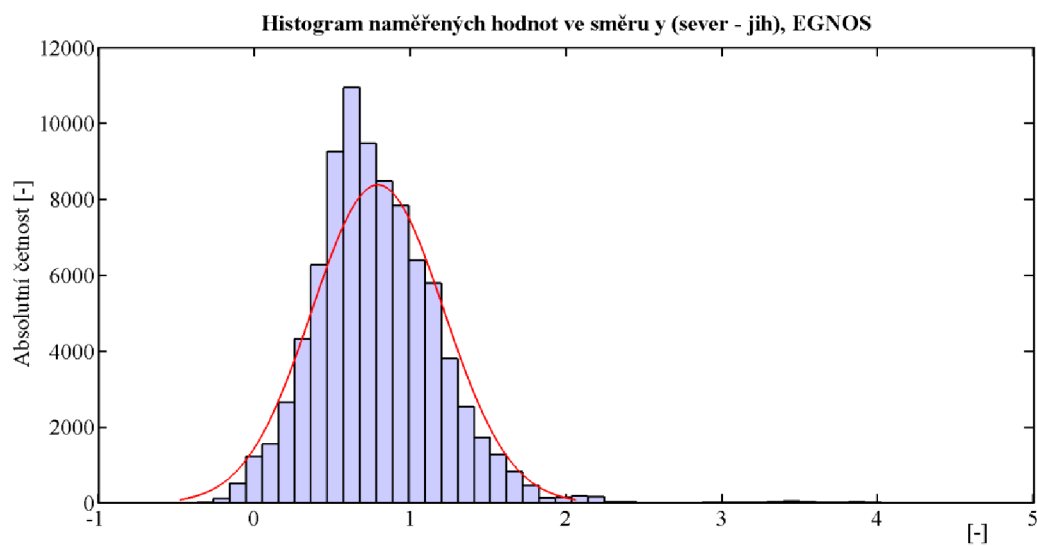
Testy normality dat ve směrech os x a y (data EGNOS)



Obr. 30 3D histogram absolutních četností naměřených chyb ve směrech x a y.



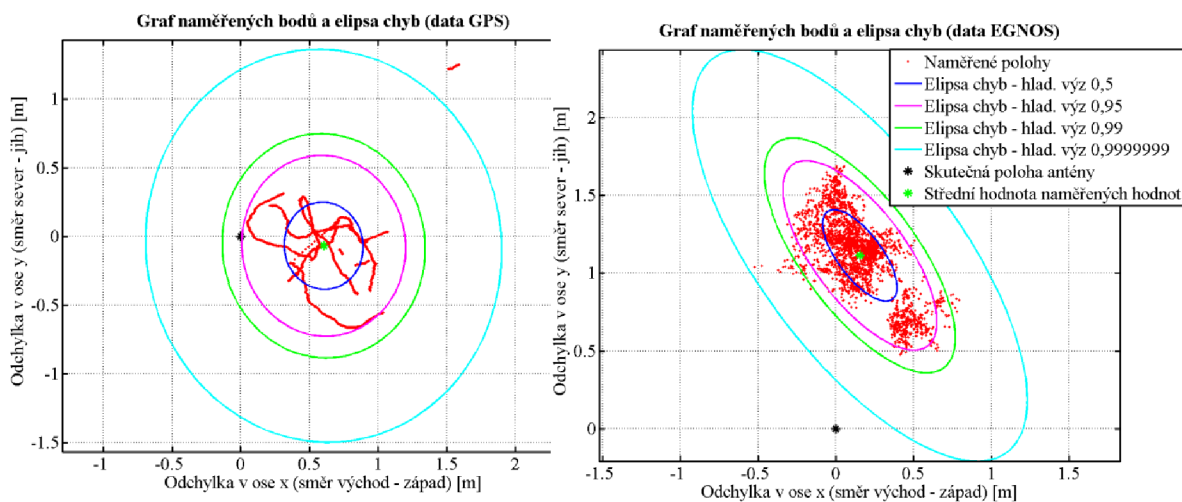
Obr. 31 Histogram absolutních četností naměřených chyb ve směru východ – západ.



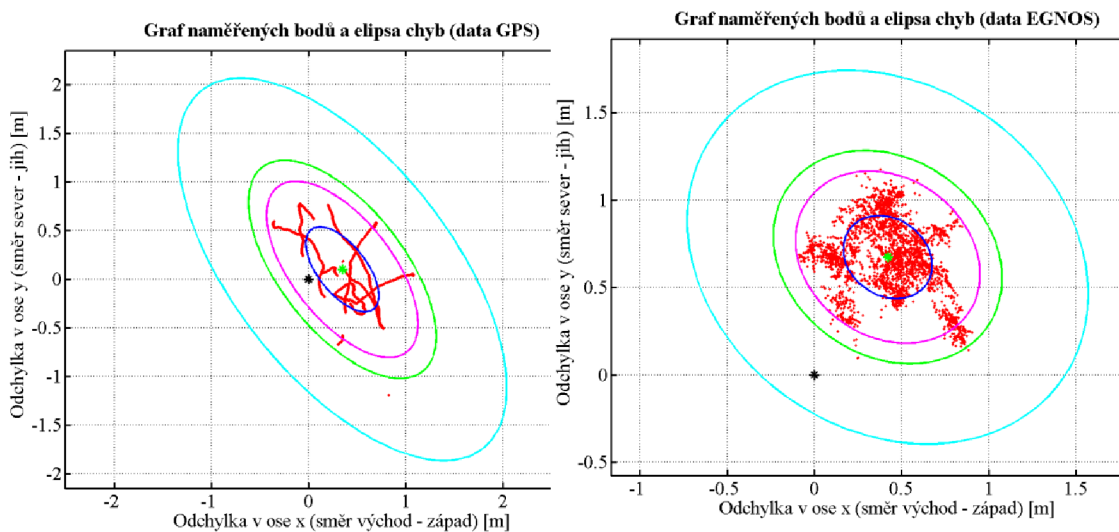
Obr. 32 Histogram absolutních četností naměřených chyb ve směru sever – jih.

Příloha 3

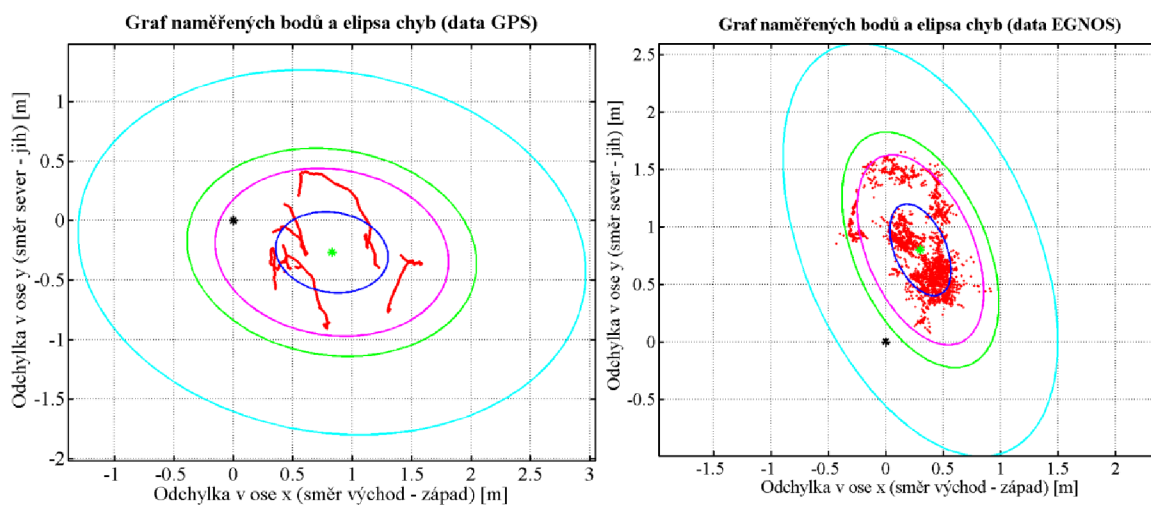
Elipsy chyb po 3000 naměřených odchylek polohy v intervalu od 1 - 9000 vzorků



Obr. 33 Data GPS a EGNOS proložená elipsami chyb v intervalu 1 - 3000 vzorků.



Obr. 34 Data GPS a EGNOS proložená elipsami chyb v intervalu 3001 - 6000 vzorků.

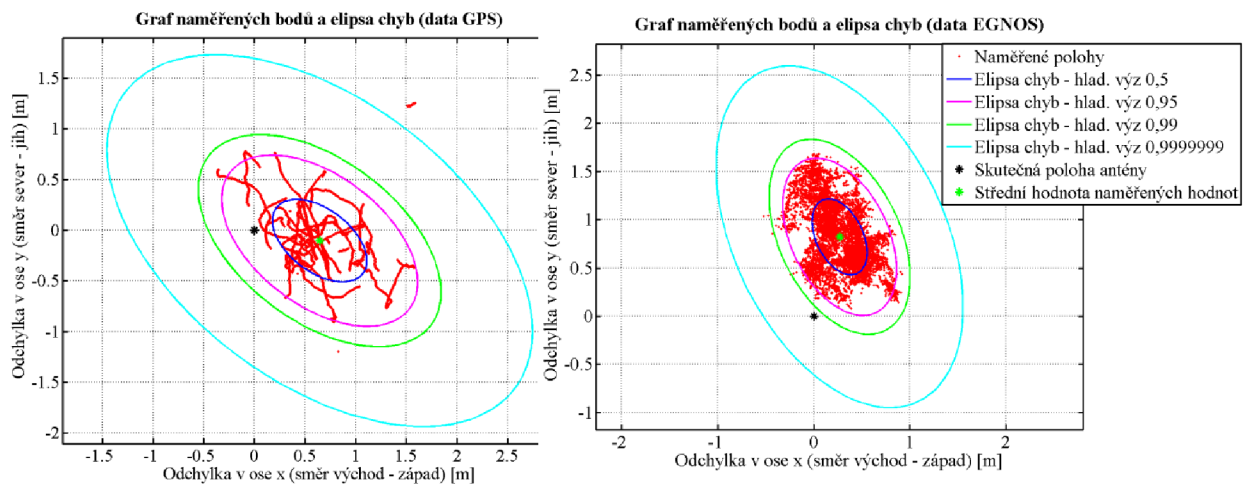


Obr. 35 Data GPS a EGNOS proložená elipsami chyb v intervalu 6001 - 9000 vzorků.

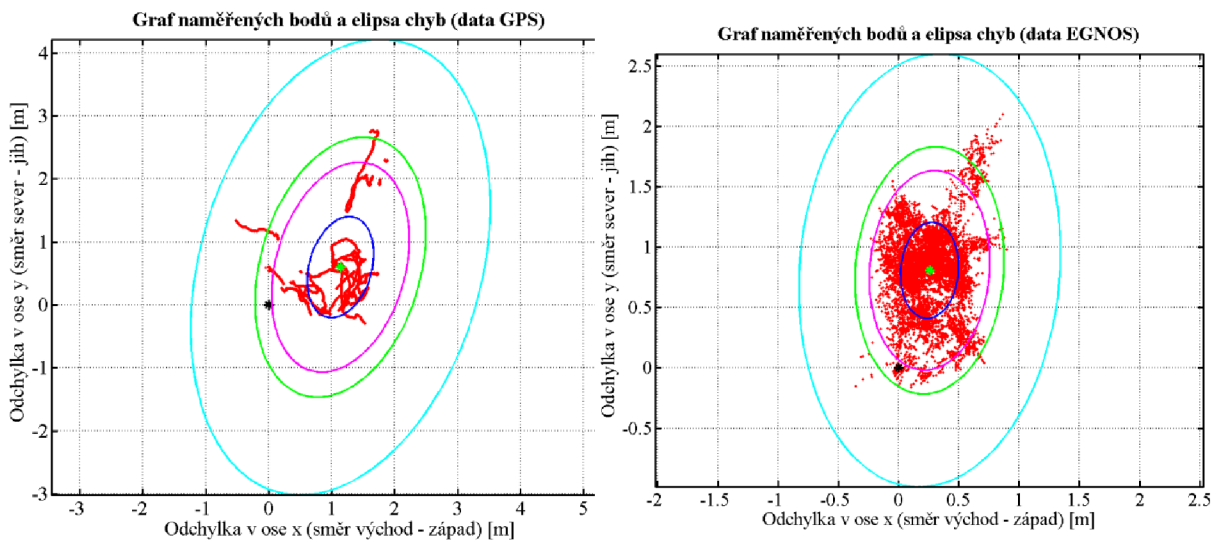
Tab. 1 vypočtené hodnoty v intervalu od 1 - 9000 naměřených odchylek polohy:

Počet (1;3000) Pravděpodobnost [%]	Data GPS				Data EGNOS			
	50	95	99	99,99999	50	95	99	99,99999
\bar{x} [m]	0,60				0,15			
\bar{y} [m]	- 0,07				1,11			
σ_x^2 [m ²]	0,06				0,04			
σ_y^2 [m ²]	0,07				0,06			
σ_x [m]	0,77				0,20			
σ_y [m]	0,27				0,25			
u[m]	0,32	0,66	0,82	1,43	0,35	0,73	0,90	1,58
v[m]	0,29	0,60	0,74	1,29	0,14	0,30	0,37	0,64
\bar{z} [m]	- 1,43				0,43			
σ_z^2 [m ²]	1,08				0,16			
σ_z [m]	1,04				0,40			
ϑ (x, y) [m]	0,43				1,13			
ϑ (x, y, z) [m]	1,55				1,21			
Počet (3001; 6000) Pravděpodobnost [%]	Data GPS				Data EGNOS			
50	95	99	99,99999	50	95	99	99,99999	
\bar{x} [m]	0,35				0,42			
\bar{y} [m]	0,10				0,68			
σ_x^2 [m ²]	0,10				0,05			
σ_y^2 [m ²]	0,14				0,04			
σ_x [m]	0,32				0,22			
σ_y [m]	0,37				0,20			
u[m]	0,518	1,076	1,334	2,339	0,269	0,561	0,696	1,220
v[m]	0,247	0,513	0,637	1,116	0,218	0,453	0,562	0,986
\bar{z} [m]	0,316				0,521			
σ_z^2 [m ²]	0,602				0,261			
σ_z [m]	0,776				0,511			
ϑ (x, y) [m]	0,362				0,795			
ϑ (x, y, z) [m]	0,481				0,951			
Počet (6001; 9000) Pravděpodobnost [%]	Data GPS				Data EGNOS			
50	95	99	99,99999	50	95	99	99,99999	
\bar{x} [m]	0,83				0,30			
\bar{y} [m]	- 0,27				0,80			
σ_x^2 [m ²]	0,16				0,05			
σ_y^2 [m ²]	0,08				0,11			
σ_x [m]	0,40				0,23			
σ_y [m]	0,91				0,34			
u[m]	0,475	0,988	1,225	2,149	0,422	0,877	1,087	1,907
v[m]	0,334	0,695	0,862	1,512	0,223	0,464	0,576	1,011
\bar{z} [m]	- 0,443				0,221			
σ_z^2 [m ²]	0,321				0,149			
σ_z [m]	0,567				0,386			
ϑ (x, y) [m]	0,869				0,856			
ϑ (x, y, z) [m]	0,976				0,884			

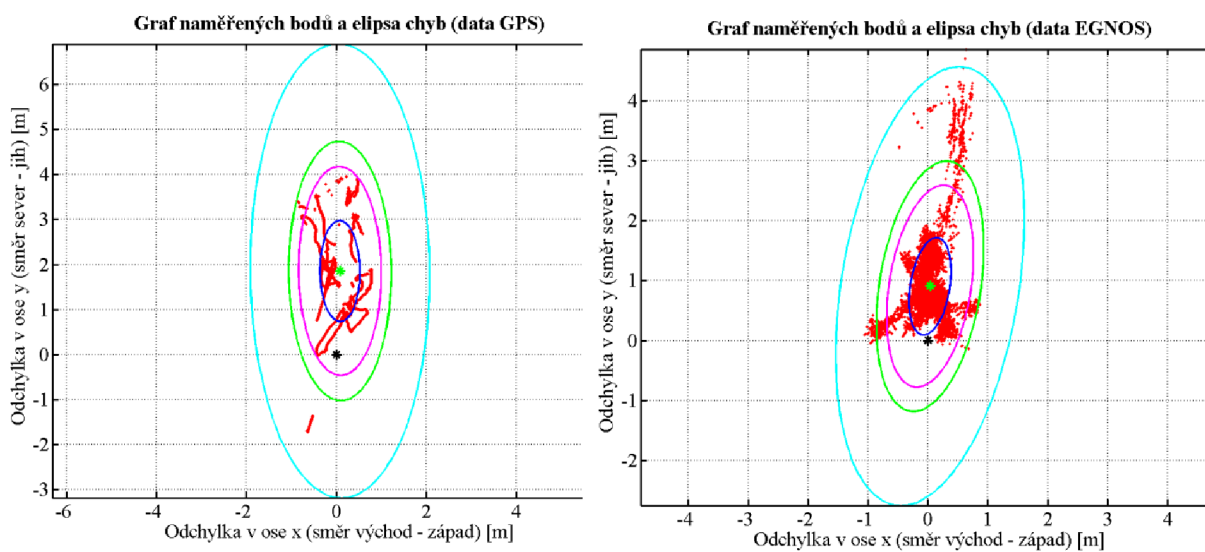
Elipsy chyb po 10000 naměřených odchylek polohy v intervalu od 1 - 30000 vzorků



Obr. 36 Data GPS a EGNOS proložená elipsami chyb v intervalu 1 - 10000 vzorků.



Obr. 37 Data GPS a EGNOS proložená elipsami chyb v intervalu 10001 - 20000 vzorků.



Obr. 38 Data GPS a EGNOS proložená elipsami chyb v intervalu 20001 - 30000 vzorků.

Tab.2 vypočtené hodnoty v intervalu od 1 - 9000 naměřených odchylek polohy

Počet (1; 10000)	Data GPS				Data EGNOS			
Pravděpodobnost [%]	50	95	99	99,99999	50	95	99	99,99999
\bar{x} [m]	0,64				0,27			
\bar{y} [m]	- 0,10				0,82			
σ_x^2 [m ²]	0,16				0,06			
σ_y^2 [m ²]	0,12				0,11			
σ_x [m]	0,40				0,24			
σ_y [m]	0,35				0,33			
u[m]	0,53	1,11	1,38	2,41	0,42	0,87	1,08	1,89
v[m]	0,31	0,64	0,79	1,39	0,24	0,50	0,63	1,10
\bar{z} [m]	- 0,57				0,37			
σ_z^2 [m ²]	1,12				0,23			
σ_z [m]	1,06				0,48			
$\vartheta(x, y)$ [m]	0,65				0,86			
$\vartheta(x, y, z)$ [m]	0,86				0,89			
Počet 10001; 20000)	Data GPS				Data EGNOS			
Pravděpodobnost [%]	50	95	99	99,99999	50	95	99	99,99999
\bar{x} [m]	1,14				0,81			
\bar{y} [m]	0,60				0,26			
σ_x^2 [m ²]	0,20				0,11			
σ_y^2 [m ²]	0,46				0,04			
σ_x [m]	0,45				0,33			
σ_y [m]	0,68				0,20			
u[m]	0,82	1,70	2,11	3,71	0,40	0,83	1,02	1,80
v[m]	0,49	1,03	1,27	2,23	0,24	0,50	0,61	1,08
\bar{z} [m]	- 1,40				- 0,09			
σ_z^2 [m ²]	1,15				0,30			
σ_z [m]	1,07				0,55			
$\vartheta(x, y)$ [m]	1,29				0,85			
$\vartheta(x, y, z)$ [m]	1,90				0,86			
Počet (20001; 30000)	Data GPS				Data EGNOS			
Pravděpodobnost [%]	50	95	99	99,99999	50	95	99	99,99999
\bar{x} [m]	0,08				0,03			
\bar{y} [m]	1,86				0,91			
σ_x^2 [m ²]	0,14				0,09			
σ_y^2 [m ²]	0,90				0,47			
σ_x [m]	0,37				0,30			
σ_y [m]	0,95				0,68			
u[m]	1,11	2,32	2,87	5,03	0,82	1,70	2,11	3,69
v[m]	0,44	0,91	1,13	1,99	0,33	0,68	0,84	1,48
\bar{z} [m]	0,27				- 0,02			
σ_z^2 [m ²]	5,14				1,60			
σ_z [m]	2,26				1,26			
$\vartheta(x, y)$ [m]	1,86				0,91			
$\vartheta(x, y, z)$ [m]	1,88				0,91			