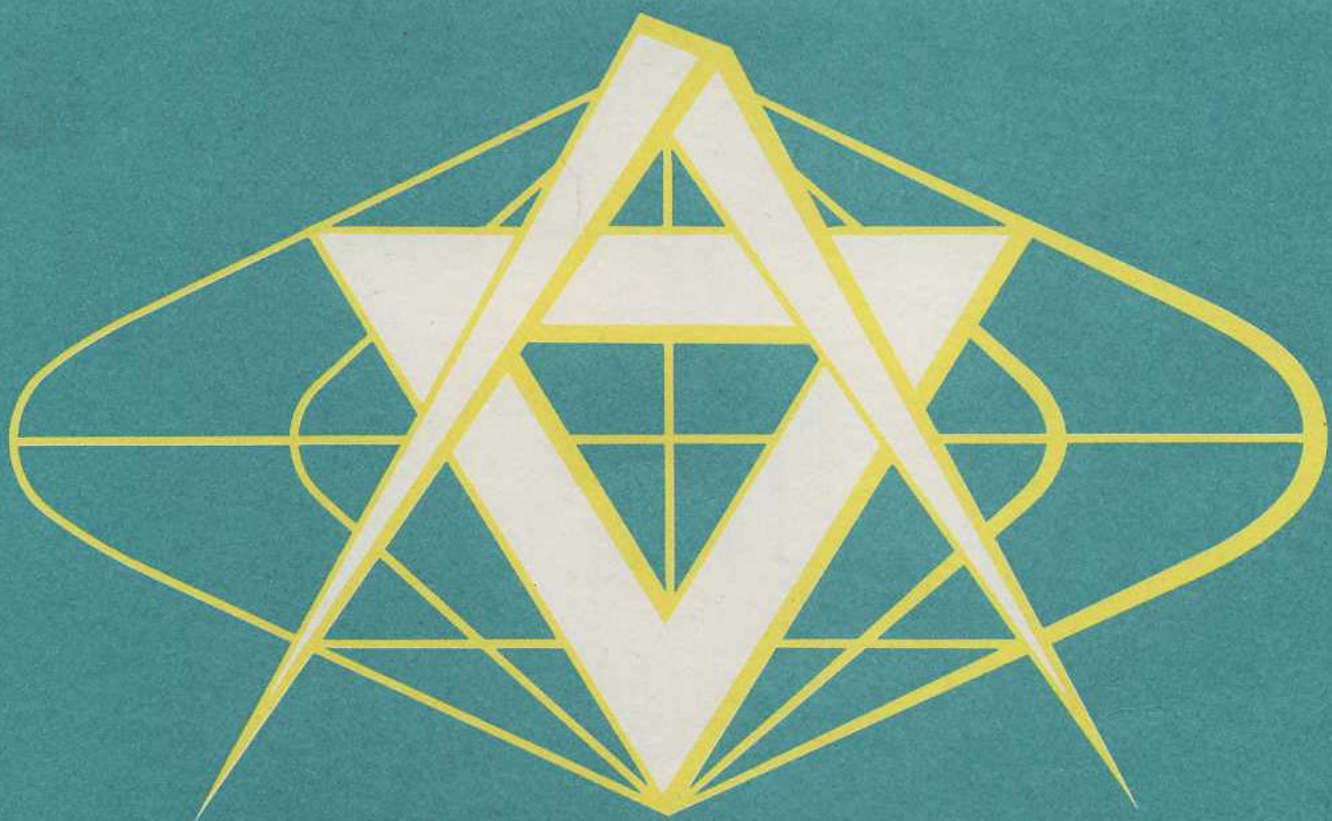


SBORNÍK TOPOGRAFICKÉ SLUŽBY



**VOJENSKÝ
TOPOGRAFICKÝ OBZOR**

SBORNÍK GPS

3/92

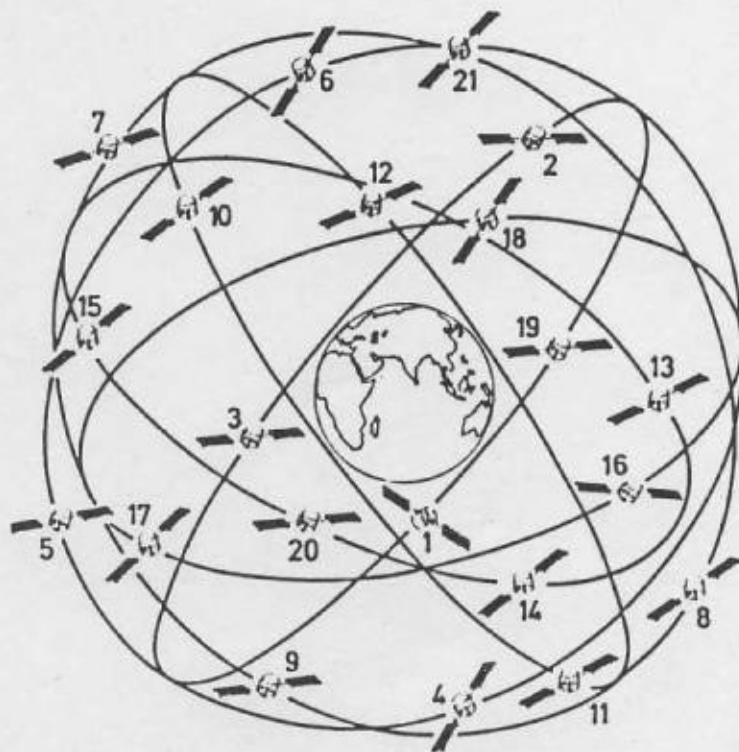
SBORNÍK TOPOGRAFICKÉ SLUŽBY. Neperiodická publikace vojenskoodborných článků a informací. Vydalo topografické oddělení GŠ. Řídí redakční rada. Předseda redakční rady: plk. Ing. Zdeněk Širůček. Vedoucí redaktor: pplk. Ing. Eduard Vařejka, Výzkumné středisko 090, Rooseveltova 23, Praha 6.

Vytiskl Vojenský zeměpisný ústav Praha.

Za obsah článků odpovídají autoři. Neprošlo jazykovou úpravou.

SBORNÍK GPS

INFORMACE O TECHNOLOGII URČOVÁNÍ POLOHY
PROSTŘEDNICTVÍM GPS, ZKUŠENOSTI
A VÝSLEDKY DOSAŽENÉ DO ROKU 1992



STUDIJNÍ POMŮCKA - ŘADA GEODETICKÁ
ZPRACOVAL KOLEKTIV AUTORŮ V ROCE 1992

SBORNÍK GPS

INFORMACE O TECHNOLOGIÍCH URČOVÁNÍ POLOHY
PROSTŘEDNĚM GPRS KŘIVKAMI
A VÝSLEDKY HLEDÁNÍ DO ROKU 1992



STUDIUM FOMŮČKA - ŘADA GRAFICKÁ
PRÁČOVNÍ KOLEKTIV AUTORŮ V ROKU 1992

Sborník GPS

O B S A H

	Strana
1. Plk. Ing. Karel Raděj, CSc.: Problematika GPS v topografickém zabezpečení vojsk	7
<i>Recenze: plk. Ing. Drahomír Dušátko, CSc.</i>	
2. Plk. Ing. Drahomír Dušátko, CSc.: Stručný přehled pojmů z teorie pohybu umělých družic Země (UDZ)	9
<i>Recenze: pplk. Ing. Vladimír Šilhan, CSc.</i>	
3. Plk. Ing. Drahomír Dušátko, CSc.: Klasické a geocentrické geodetické systémy	12
<i>Recenze: pplk. Ing. Vladimír Šilhan, CSc.</i>	
4. Pplk. Ing. Jaroslav Matonoha: Základní informace o systému GPS a jeho charakteristiky	19
<i>Recenze: Ing. Vlastimil Jonáš</i>	
5. Ing. Vlastimil Jonáš: Využití technologie GPS pro geodetické účely	33
<i>Recenze: Ing. Miloš Tůma, CSc.</i>	
6. Pplk. Ing. Jaroslav Matonoha: Využití systému GPS v navigaci a TGZ	44
<i>Recenze: pplk. Ing. Viliam Vatri, CSc.</i>	
7. Kpt. Ing. Petr Janus: Technologie měření GPS	53
<i>Recenze: Ing. Vlastimil Jonáš</i>	
8. Ing. Vlastimil Jonáš: Zpracování měření GPS a jeho softwarové zabezpečení	61
<i>Recenze: plk. Ing. Drahomír Dušátko, CSc.</i>	
9. Ing. Miloš Tůma, CSc.: Aplikace technologií GPS v topograficko-geodetickém zabezpečení	63
<i>Recenze: pplk. Ing. Jaroslav Matonoha</i>	
10. Prof. Ing. Zdeněk Nevošád, DrSc.: Určení místních měřítkových a úhlových změn v polohovém bodovém poli	70
<i>Recenze: plk. Ing. Drahomír Dušátko, CSc.</i>	
11. Pplk. Ing. Vladimír Šilhan, CSc.: Měření GPS v astronomicko-geodetické síti ČSFR	82
<i>Recenze: plk. Ing. Drahomír Dušátko, CSc.</i>	
12. Ing. David Jindra, CSc.: Informace o praktických zkušenostech s geodetickými aplikacemi systému GPS v Zeměměřickém ústavu	91
<i>Recenze: Ing. Miloš Tůma, CSc.</i>	
13. Pplk. Ing. Vladimír Šilhan, CSc.: Možnosti využití GPS v analytické aerotriangulaci	97
<i>Recenze: pplk. Ing. Jaroslav Matonoha</i>	

PŘÍLOHY

HAZDO

Strana

1. Geodetické a navigační přijímače GPS	101
2. Nabídky nové techniky GPS	106
3. Seznam doposud známých výrobců přijímačů GPS	114
Anotace	115

CONTENTS

	Page
1. Karel Raděj: GPS-problems in topo-geodetic security of troops	7
2. Drahomír Dušátko: Concise review of terms from the Earth Satellite motion theory	9
3. Drahomír Dušátko: Classical and geocentric geodetic systems	12
4. Jaroslav Matonoha: Fundamental information on GPS and its characteristics	19
5. Vlastimil Jonáš: Utilization of GPS-technology for geodetic purposes	33
6. Jaroslav Matonoha: Utilization of GPS in navigation and in topo-geodetic security	44
7. Petr Janus: Technology of GPS measurements	53
8. Vlastimil Jonáš: Processing of GPS-measurements and its software support	61
9. Miloš Tůma: Application of GPS-technologies in topo-geodetic security	63
10. Zdeněk Nevošád: Determination of local scale and angle changes in a planimetric point field	70
11. Vladimír Šilhan: GPS-measurements in the astro-geodetic network of the CSFR	82
12. David Jindra: Information on practical experience with geodetic applications of GPS in the Surveying Institute	91
13. Vladimír Šilhan: Possibilities of GPS-utilization in analytical aerotriangulation	97

ANNEXES

1. Geodetic and navigation GPS-receivers	101
2. Offers of new GPS-technique	106
3. List of up to now known producers of GPS-receivers	114
Annotations	115

INHALT

	Seite
1. Karel Raděj: GPS-Problematik in der topographischen Sicherstellung der Truppen	7
2. Drahomír Dušátko: Kurze Übersicht der Begriffe der Bewegungstheorie der künstlichen Erdsatelliten	9
3. Drahomír Dušátko: Klassische und geozentrische geodätische Systeme	12
4. Jaroslav Matonoha: Grundinformationen über das GPS-System und seine Charakteristiken	19
5. Vlastimil Jonáš: Ausnutzung der GPS-Technologie für geodätische Zwecke	33
6. Jaroslav Matonoha: Ausnutzung des GPS-Systems in der Navigation und in der topographisch-geodätischen Sicherstellung	44
7. Petr Janus: Meßtechnologie des GPS	53
8. Vlastimil Jonáš: Bearbeitung der GPS-Messungen und ihre Software-Sicherstellung	61
9. Miloš Tůma: Anwendung der GPS-Technologie in der topographisch-geodätischen Sicherstellung	63
10. Zdeněk Nevošád: Bestimmung der lokalen Maßstabs- und Winkeländerungen im Lagepunktfeld	70
11. Vladimír Šilhan: GPS-Messungen im astronomisch-geodätischen Netz der Tschechoslowakischen Föderativen Republik	82
12. David Jindra: Informationen über die praktischen Erfahrungen mit den geodätischen Anwendungen des GPS-Systems im Vermessungsinstitut	91
13. Vladimír Šilhan: Ausnutzungsmöglichkeiten des GPS in analytischer Aerotriangulation	97

BEILAGEN

1. Geodätische und Navigationsempfänger des GPS	101
2. Angebot der neuen GPS-Technik	106
3. Verzeichnis der bisher bekannten Erzeuger der GPS-Empfänger	114
Annotationen	115

1. Problematika GPS v topografickém zabezpečení vojsk

Nezbytnost časové a prostorové koordinace předpokládaných vojenských operací globálního charakteru vedla v první fázi vývoje družicové geodézie ke vzniku globálních navigačních a vzápětí nato geodeticky efektivních systémů.

Vznikající družicové prostorové systémy, spojené se Zemí, postupně umožňovaly jednoznačnou geometrickou a fyzikální, dynamickou interpretaci zemského tělesa. Pro uvedené období bylo typické spojení úsilí vědecké a technologické fronty, dotované z vojenských rozpočtů zainteresovaných velmocí.

Vedle toho byly ještě do poloviny 80. let rozvíjeny geodetické sítě vysoké relativní přesnosti (řádově 1.10^{-6}) prostřednictvím klasických pozemních metod a za cenu značných nákladů a nároků na čas.

Převratný vývoj byl zahájen geometrickou družicovou geodézií - synchronními metodami fotografickou (družice PAGEOS) a dálkoměrnou laserovou (LAGEOS). Stručně lze shnout, že geometrické metody družicové geodézie využívaly UZ jako záměrného bodu signálu na její dráze; analogicky pozemním klasickým metodám tak existuje družicová triangulace, trilaterace a polygonometrie. S těmi pak korespondují metody observace synchronní, kvazisynchronní a orbitální.

S nástupem dynamické geodézie, jejímž hlavním úkolem je průběžné určování parametrů proměnlivého vektoru - spojnice geocentra s těžištěm UZ - za podmínek vlivu tíhového pole Země na dráhu UZ, jsou podstatně rozšířeny možnosti polohového určení i definování parametrů tělesa Země.

V období 70. let zahájila svoji éru dopplerovská geodézie, kdy při délkách stran asi 100 km i více byly rozvíjeny geometrické konstrukce s polohovou přesností od $\pm 0,2$ m do $\pm 0,5$ m. Pro zpřesňování parametrů geodetických systémů má velký význam spolehlivé určení polohy geocentra vzhledem k povrchovému bodovému poli, dále pak stanovení transformačních vztahů klasických geodetických systémů k systému geocentrickému, spojování a kontrola sítí klasických (tzv. kombinace klasických - terestických - a družicových sítí).

Laserová dálkoměrná měření a metoda VLBI (Very Long Baseline Interferometry) poskytují dnes vysokou přesnost a v kombinaci s dalšími metodami zabezpečují pro globální geodetické systémy spolehlivé měřítka, sítě základních (inerciálních) bodů a dynamické charakteristiky Země. Družicová altimetrie umožňuje rozsáhlé mapování fyzikálního tvaru Země - průběhu nulové ekvipotenciální plochy na 3/4 jejího povrchu.

Vstup technologie GPS do geodetické praxe je doslova mezníkem v historii geodézie, geodetických základů a v navigaci. V dané etapě jsme účastníky a tvůrci dosud nebývalého přelomu ve vývoji jedné z nejstarších disciplín lidské činnosti.

Topografická služba Čs. armády se díky aktivitě některých specialistů včas zapojila do domácích i mezinárodních aktivit v oblasti družicové geodézie. Vedle rozvinutí družicových observací na východním Slovensku a v objektu VTOPÚ Dobruška, výstavby družicové části stanice Polom, byla tato disciplína zároveň zahrnuta do učebních osnov katedry geodézie v brněnské Vojenské akademii a byla vydána čtyřdílná publikace profesora Burši Kosmická geodézie.

TS Čs. armády prováděla prakticky nepřetržitě fotografické a dálkoměrné laserové observace v rámci programů tzv. Provozní sítě kosmické triangulace (komora AFU 75 a dálkoměr LD-3). Ačkoli byla tato účast pasivní, omezená prakticky na observace, zpracování a předávání výsledků do zpracovatelského centra, přispěla ke vzniku novodobé tradice a k přípravě vlastních odborníků služby. Na čs. území byla klasickými postupy zaměřena část základny kosmické triangulace Potsdam - Sofia - Pulkovo - Potsdam, dále pak byly provedeny dopplerovské observace na vybraných bodech čs. geodetických základů v geodetickém systému 1942/83. Prostřednictvím dopplerovské aparatury DOG 3, převzaté od ASÚ ČSAV, byla zaměřena národní dopplerovská síť bodů, která poskytla předběžná porovnání systému WGS 72 s S-1942.

Díky tomuto zájmu a existující tradici byla do praxe úspěšně zavedena technologie GPS, takže TS Čs. armády se mohla účinně zapojit do prací ve prospěch zpřesnění a modernizace čs. geodetických základů (zaměření bodů čs. sítě nultého řádu na jaře 1992). Aktivity roku 1992 vyvrcholily opakovaným zaměřením této sítě na podzim 1992 ve spolupráci s měřiči Defense Mapping Agency z USA.

Předkládaný Sborník, tematicky zaměřený na popularizaci technologie GPS v čs. podmínkách, má umožnit příslušníkům TS Čs. armády, posluchačům vojenských škol a uživatelům u vojsk seznámení se se základními charakteristikami systému GPS, jeho možnostmi a existujícími aplikacemi. Není opominuta příbuzná problematika navigačního využití, příp. kombinace GPS s inerciální technikou. Cílem je, aby Sborník vedle sumy informací poskytl náčelníkům, kteří odpovídají za řízení příslušných prací, nezbytné informace o organizaci přípravy, měření a zpracování jeho výsledků, pracovníkům v terénu pak metodiku pro osobní přípravu. Vzhledem k aktuálnosti oblasti, jejímu rychlému vývoji a technickému zdokonalování přístrojové základny mohou některé části Sborníku zastarat. Proto je významný průřez základními principy, které jsou trvalé a jejichž zvládnutí Sborník umožňuje.

Je nezbytné ocenit aktivní a iniciativní práci plk. Ing. Drahomíra Dušátka, CSc., a dalších specialistů TS na vydání tohoto Sborníku. Z hlediska potřeb TS Čs. armády je užitečné, že se přikročilo k vydávání sborníků s různou tematikou. Po tomto

Sborníku, tematicky zaměřeném na technologii GPS, bude vydán Sborník o problematice výstavby a využívání informačního systému o území. Hlubší teoretické poznatky pak zájemcům poskytne připravovaná týdenní publikace prof. Burši a Ing. Kosteckého, CSc., „Kosmická geodézie a kosmická geodynamika“, která vyjde v průběhu roku 1993.

Došlo 15. 11. 1992

2. Stručný přehled pojmů z teorie pohybu umělých družic Země (UDZ)

Pro pochopení základní vývojové linie a dosažení komplexního přístupu k celé problematice je uveden přehled principů pohybu UDZ s ohledem na jejich význam při zpracování výsledků měření a pro aplikaci těchto výsledků v praxi TS Čs. armády.

2.1. Gravitační potenciál Země

Periodický pohyb UDZ probíhá v reálném vnějším tíhovém poli Země, které se velkou měrou podílí na deformacích teoretické, geometrické dráhy, příslušné normalizovanému tělesu Země. Poruchy dráhy UDZ, vyvolávané reálným tíhovým polem, vedou k nezbytnosti nepřetržité lokace UDZ a k periodickému zpřesňování efemerid jejich drah.

Matematický popis prostředí, včetně dalších vlivů působících na dráhu UDZ, není natolik výstižný, aby z jeho anomalit byly přesně a dlouhodobě určeny dráhové poruchy oproti dráze ideální.

Informace o parametrech dráhy skutečné a teoretické umožňují na druhé straně tyto faktory deformací, anomalit popsat a postihnout - díky nezávislému určování souřadnic UDZ na povrchu Země.

Hlavním rušícím prvkem je reálné anomální tíhové pole Země, které se z čistě praktických důvodů vyjadřuje jejím gravitačním potenciálem V ve dvou složkách

$$V = G \int_M \frac{dm}{r} + R, \quad (1)$$

kde první člen vpravo je obecně normální a druhý poruchový, přičemž

G	- gravitační konstanta,
M	- hmotnost tělesa Země,
dm	- hmotnost elementu M ,
r	- vzdálenost od potenciálového bodu na povrchu Země k UDZ (ve vnějším prostoru tělesa M),
R	- poruchový potenciál tělesa Země.

Integrál (1) je pro praktické účely nahrazen rozvojem do řady sférických funkcí (např. [1], [2] aj.) např. ve tvaru

$$V = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \left(\frac{a_0}{r}\right)^n (J_n^{(k)} \cos k\lambda + S_n^{(k)} \sin k\lambda) P_n^{(k)}(\sin \Phi), \quad (2)$$

kde

Φ, λ, r	- zeměpisné sférické geocentrické souřadnice a průvodič potenciálového bodu,
$J_n^{(k)}, S_n^{(k)}$	- bezrozměrné harmonické koeficienty stupně n , řádu k v rozvoji V (Stokesovy konstanty),
GM	- geocentrická gravitační konstanta (násobek Newtonovy gravitační konstanty a hmotnosti Země),
$P_n^{(k)}(\sin \Phi)$	- Legendrova konjugovaná (připojená) funkce,
a_0	- volitelný délkový parametr (zpravidla $a_0 = 6\,378\,140$ m).

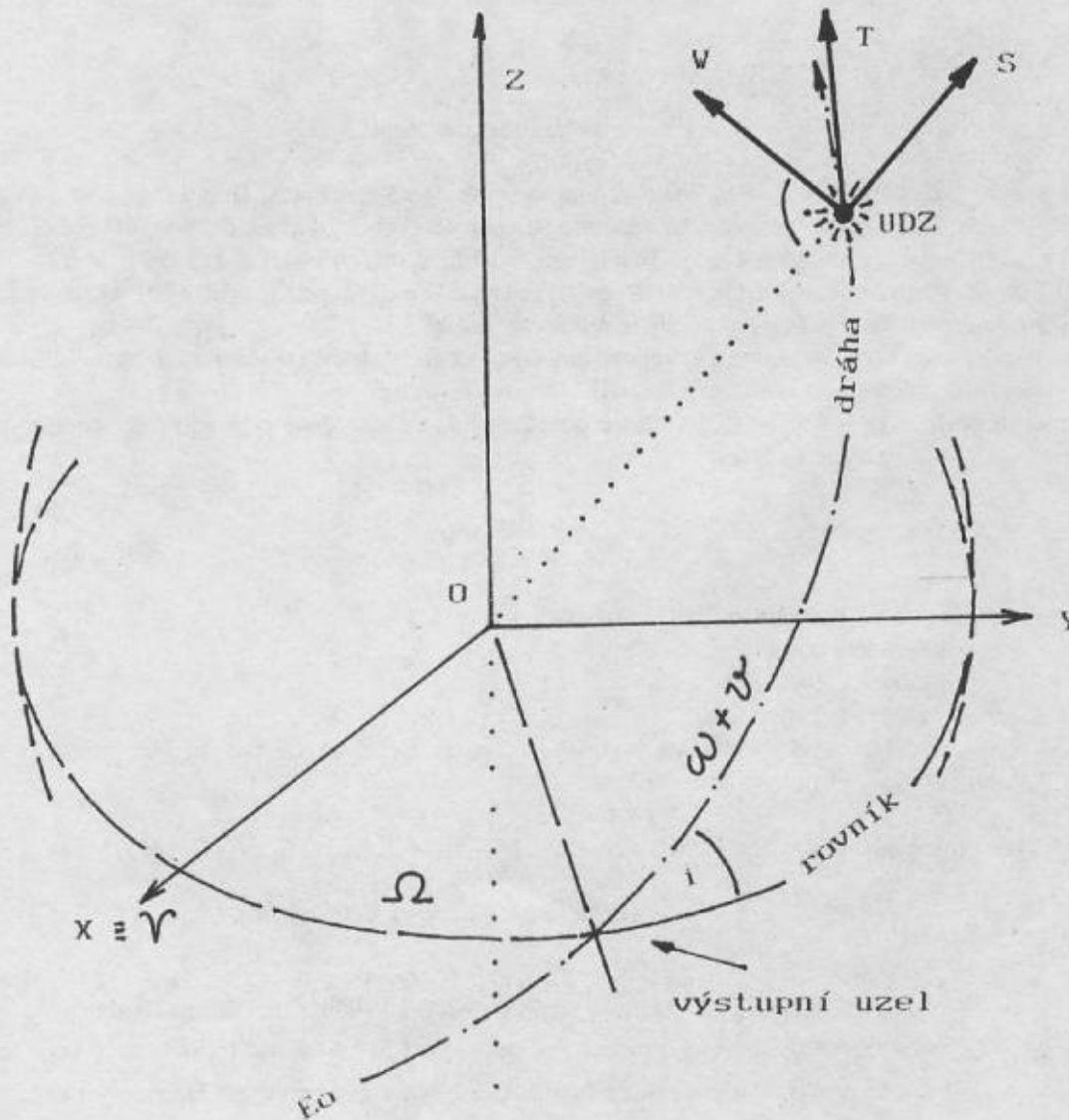
Jeden ze Stokesových koeficientů - zonální harmonika J_2 - je součástí definice moderního geodetického systému [3], neboť vztahově koresponduje s geometrickým zploštěním náhradního tělesa Země. Tyto vazby zabezpečují jednotu geometrických a dynamických parametrů reálné a „normalizované“ Země.

Soubor Stokesových parametrů a geocentrická gravitační konstanta popisují vnější gravitační pole Země pouze do určitého přiblížení. Tudíž i popis prostředí, v němž se UDZ pohybuje, je přibližný, ačkoli harmoniky vypočtené ze Stokesových parametrů dosahují již vysoké úrovně rozlišení. V současné době určení úrovně řádu a stupně harmonik je omezeno pouze nestabilitou systému.

Na tomto místě lze uvést, že úlohou pozemního řídicího a zabezpečovacího segmentu systému GPS je určovat nezbytné aktuální parametry drah UDZ a s využitím dlouhodobě platného popisu reálného tíhového pole Země připravovat a předávat (injektovat) data na paluby jednotlivých UDZ segmentu družicového. Souřadnice (X, Y, Z) observačních stanic jsou zároveň součástí charakteristik daného družicového geocentrického geodetického systému (např. WGS 84) a pro běžného uživatele údajem hlavním.

Problematika zpřesňování parametrů tíhového pole Země je popsána např. v [1], [2], [5], [6], [7] a v dalších.

S odkazem na elementy teorie reálného pohybu UDZ je pro představu uveden obr. 1 [4], [5], [8] se složkami R , působícími na UDZ.



Obr. 1. Složky S, T, W celkového poruchového potenciálu R , přičemž veličiny a, e, i, Ω, ω jsou funkcemi času t

Charakteristiky poruchového pohybu UDZ jsou vztaženy k oskulační keplerovské dráze, popsané oskulačními elementy $a(t), e(t), i(t), \Omega(t), \omega(t) [M(t)]$ proměnnými v čase, viz např. [1], [2], [21] a další.

Diferenciální rovnice v oskulačních elementech se vyjadřují prostřednictvím složek poruchového potenciálu W, T, S (viz obr. 1). Souřadnice UDZ jsou pak explicitní funkcí času t , konstantní parametry pak funkcí dráhových elementů referenční elipsy E_0 a konečně Stokesových parametrů $S_n^{(k)}, J_n^{(k)}$ (zde kromě dalších vnějších vlivů)

$$X = X(t; a_0, e_0, i_0, \Omega_0, \omega_0, T_0; S_n^{(k)}, J_n^{(k)}) \quad (3)$$

a obdobně pak pro souřadnice Y, Z .

Obecně je poruchový pohyb UDZ popsán v třírozměrném prostoru systémem Lagrangeových diferenciálních rovnic 2. druhu.

V prostorových geocentrických souřadnicích X, Y, Z mají tvar:

$$\begin{aligned}\frac{d^2x}{dt^2} + G\frac{x}{r^3} &= \frac{\partial V}{\partial x} + Q_x, \\ \frac{d^2y}{dt^2} + G\frac{y}{r^3} &= \frac{\partial V}{\partial y} + Q_y, \\ \frac{d^2z}{dt^2} + G\frac{z}{r^3} &= \frac{\partial V}{\partial z} + Q_z,\end{aligned}\tag{4}$$

kde

Q_x, Q_y, Q_z – poruchy dráhy UDZ způsobené odporem atmosféry a tlakem slunečního záření, podrobněji viz [20], [22].

Výpočet souřadnic polohy UDZ X, Y, Z se děje integrací rovnic (4) s použitím několika metod (analytické, numerické, aproximací) tak, že výsledek je tvořen částí relativně konstantní a proměnnou:

$$X = X_0 + \Delta_i X; Y = Y_0 + \Delta_i Y; Z = Z_0 + \Delta_i Z.\tag{5}$$

Tyto rutinní procedury jsou součástí funkce pozemního zabezpečovacího segmentu UDZ systému GPS.

Poznámka: Praktický smysl použití potenciálové funkce pro vyjádření tíhového pole Země je patrný např. ze (4) - parciální derivace V ve směru osy Z je tíhové zrychlení, z něhož dvojí integrací podle času získáváme úsek poruchové dráhy UDZ v této ose.

Z geodetického hlediska jsou dnes aktuální tyto technologie družicové a kosmické geodézie:

a) Laserové určování poloh UDZ z pozemních stanic, majících systémové geocentrické souřadnice určené s vysokou spolehlivostí a přesností

Poskytují okamžité souřadnice polohy UDZ v geocentrickém systému stálých observačních stanic (např. v uvedeném pozemním zabezpečovacím segmentu GPS), výpočet prognóz drah UDZ, zpětné určování a zpřesňování souřadnic pozemských stanic pro účely geodynamiky, sledování změn rychlosti rotace Země a změny polohy pólů.

b) Systém globálního určování polohy GPS, příp. TRANSIT

Určování uživatelských souřadnic v daném geodetickém systému (např. ve WGS 84) pro výstavbu, spojování geodetických sítí; určování souřadnic bodových překrytových polí pro určování transformačních parametrů; zhušťování souřadnicových polí, určování geodetických výšek, geodynamická sledování atd., navigační využití.

c) Družicová altimetrie

Určování topografie světových moří s odvozením průběhu geoidu.

d) Velkozákladnová interferometrie (VLBI)

Určování měřítka globálních geodetických sítí a jejich spojování, geodynamické a geotektonické studie apod.

e) Vzájemné kombinace výše uvedených technik

Došlo 2. 10. 1992

3. Klasické a geocentrické geodetické systémy

V aktivním používání jsou nadále klasické kontinentální geodetické systémy, v Evropě např. European Datum 1950 (ED 50), ED 87 [9], S-1942, S-1942/83 [10]. Úporně se v praxi udržují národní (lokální) geodetické sítě technického a katastrálního charakteru, které nemají znaky geodetického systému. Jejich užívání je diktováno zavedenou hospodářskou praxí, vznikajícími územními informačními systémy, vydávanými kartografickými díly atd.

Moderní, novodobý klasický geodetický systém je charakterizován:

- parametry referenčního elipsoidu,
- údaji $B, L; H^{niv}; \varphi, \lambda; \xi, \eta, \zeta$; azimuty $A; \alpha$ výchozích stran na základním bodu triangulace,
- souřadnicemi B, L, H astronomicko-geodetické sítě, souborem systémových tížnicových odchylek a výšek geoidu (kvazigeoidu),
- metodou vyrovnání geodetických prvků.

Nověji k tomu přistupují některé dynamické parametry a data, jako je vybraný vzorec pro normální tížové zrychlení a hodnoty tížového zrychlení na základních referenčních stanicích.

Reprezentace polohových údajů v rovině se děje prostřednictvím zvoleného kartografického zobrazení.

V rámci evropského kontinentu pokračuje realizace historické integrační tendence geodetických základů. Vývoj systému ED 87 byl uzavřen; byla ustavena nová komise pro výstavbu evropského geodetického systému EUREF (European Reference Frame), který bude kontinentální součástí systému globálního.

Perspektiva geodetických systémů, jejich základních bodových polí spočívá ve výstavbě

geocentrických prostorových geodetických systémů,

spjatých s tělesem Země geometrickými a dynamickými parametry, určenými převážně metodami družicové (kosmické) geodézie. Geocentrické prostorové souřadnice, spjaté pevně s otáčející se Zemí a s počátkem v těžišti Země (geocentru), jsou:

- osa Z - prochází těžištěm Země a konvenčním mezinárodním pólem CIO (Conventional International Origin), vzhledem ke kterému se určují souřadnice vektoru okamžité rotace Země,
- osy X, Y - leží v rovině rovníku, osa X prochází průsečíkem nultého poledníku a rovníku, osa Y je k ose X kolmá.

Definice geodetického geocentrického referenčního souřadnicového systému (GRS) o souřadnicích $(X, Y, Z)_{GRS}$ a jeho vztah ke klasickému systému o souřadnicích $(X, Y, Z)_{REF}$ je dána jeho geometrickými a dynamickými parametry:

a) Geometrické parametry

- velká poloosa a zploštění referenčního elipsoidu a, α ,
- poloha počátku GRS vzhledem ke geocentru, vyjádřená 3 posuny (translačními prvky) $\delta x_0, \delta y_0, \delta z_0$,
- vzájemné stočení os X, Y, Z (rotační prvky, Eulerovy, Cardanovy úhly), $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$; jejichž znaménka jsou kladná při otáčení proti směru chodu ručiček hodin.

Pro vztah mezi oběma systémy platí:

$$\begin{aligned} X_{GRS} &= X_{REF} + \delta x_0 - \varepsilon_3 Y_{REF} - \varepsilon_2 Z_{REF}, \\ Y_{GRS} &= Y_{REF} + \delta y_0 - \varepsilon_1 Z_{REF} - \varepsilon_3 X_{REF}, \\ Z_{GRS} &= Z_{REF} + \delta z_0 + \varepsilon_2 X_{REF} - \varepsilon_1 Y_{REF}. \end{aligned} \quad (1)$$

Pro vztahy mezi systémovými souřadnicemi $B, L, H^{el} (H^a)$ a souřadnicemi X, Y, Z pak platí:

$$\begin{aligned} X &= (N + H^{el}) \cos B \cos L, \\ Y &= (N + H^{el}) \cos B \sin L, \\ Z &= (N \frac{b^2}{a^2} + H^{el}) \sin B, \end{aligned} \quad (2)$$

přičemž elipsoidická výška H^{el} je součet výšky nadmořské (nivelované), např. normální H^a , a výšky geoidu (kvazigeoidu) ζ v daném geodetickém systému, kde $N = \sqrt{a(1 - e^2)} = a / (1 - e^2 \sin^2 B)^{1/2}$; $\operatorname{tg} L = \frac{Y}{X}$. Vztahem (1) je popsán transformační model podle Burši [2]. V praxi je tento model rozšířen o sedmý parametr - měřítkový koeficient m :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{lok}} + \begin{bmatrix} \delta x_0 \\ \delta y_0 \\ \delta z_0 \end{bmatrix} + (1+m) \begin{bmatrix} 1-\epsilon_3 & \epsilon_2 \\ \epsilon_3 & 1-\epsilon_1 \\ -\epsilon_2 & \epsilon_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{lok}} \quad (3)$$

a je označován jako model Buršův - Wolfův. Vzhledem k měřítkovým nehomogenitám u lokálních geodetických systémů (obvykle klasického typu) je používán tzv. model Moloděnského [11]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS 84}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{lok}} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta S & \omega - \psi \\ -\omega & \Delta S & \epsilon \\ \psi & -\epsilon & \Delta S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}_{\text{lok}}, \quad (4)$$

kde ve shodě se symbolikou v [11] jsou:

- $\Delta S; (\epsilon, \psi, \omega)$ – změny měřítka a změny orientace os lokálního geodetického systému,
- $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – posuny v osách X, Y, Z mezi počátkem lokálního systému a počátkem WGS 84 (WGS 84 minus lokální),
- X_0, Y_0, Z_0 – souřadnice základního bodu lokálního geodetického systému (např. Pulkovo, Potsdam apod.), příp. bodu v těžišti území transformace.

V praxi, kde záleží na účelu anebo přesnosti transformace (též na jednoznačnosti a spolehlivosti jinak vzájemně korelovaných parametrů), se volí druh a počty transformačních parametrů, např. varianty:

- I. $\delta x_0, \delta y_0, \delta z_0$ – pro rychlé, lokální transformace,
- II. $\delta x_0, \delta y_0, \delta z_0; \epsilon_3$ – pro klasické systémy s chybnou orientací vzhledem k ose Z ,
- III. $\delta x_0, \delta y_0, \delta z_0; \epsilon_3; m$ – navíc s měřítkovými deformacemi v oblasti transformace.

Volba počtu a kombinace parametrů vychází z analýzy charakteru a velikosti středních chyb parametrů, získaných při jejich určování z n rovnic, daných počtem n identických bodů o souřadnicích v obou systémech. Výpočetní programy bývají sestaveny tak, že umožňují výběr určovaných parametrů a jejich analýzu.

Pro pochopení tohoto typu transformace je uveden ve zkratce přístup k jeho odvození podle [4]:

- změna systému je uvažována jako důsledek změny polohy základního bodu, změny parametrů elipsoidu a netotožnosti počátků obou souřadnicových prostorových systémů;

- diferencováním výchozí funkční rovnice se získají systémové rozdíly souřadnic $\delta X, \delta Y, \delta Z$ obou systémů:

$$\begin{aligned} \delta X &= \delta x_0 + \frac{\partial X}{\partial a} \delta a + \frac{\partial X}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial X}{\partial B} \delta B + \frac{\partial X}{\partial L} \delta L + \frac{\partial X}{\partial \zeta} \delta \zeta, \\ \delta Y &= \delta y_0 + \frac{\partial Y}{\partial a} \delta a + \frac{\partial Y}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial Y}{\partial B} \delta B + \frac{\partial Y}{\partial L} \delta L + \frac{\partial Y}{\partial \zeta} \delta \zeta, \\ \delta Z &= \delta z_0 + \frac{\partial Z}{\partial a} \delta a + \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \delta \alpha + \frac{\partial Z}{\partial B} \delta B + \frac{\partial Z}{\partial L} \delta L + \frac{\partial Z}{\partial \zeta} \delta \zeta; \end{aligned} \quad (5)$$

- malé změny $\delta a; \delta \alpha; \delta B; \delta L; \delta \zeta$ jsou podle Taylorovy věty považovány za diferenciály,
- avšak skutečná poloha bodů, nehlédě na geodetický systém, se v prostoru nemění, tj. platí tudíž

$$\delta X = \delta Y = \delta Z = 0; \quad (6)$$

- předem je zřejmé, že jsou známy změny geometrických charakteristik a, α elipsoidu; proto se jako důsledek systémového rozdílu mezi souřadnicemi běžných (identických) bodů vzájemně posunou počátky souřadnicových soustav o složky $\delta x_0, \delta y_0, \delta z_0$;

- uvedené složky (translační prvky, posuny) jsou pak transformačními parametry;

- spojením rovnic (5) a (6), vyčíslením diferenciálů a dosazením se získají rovnice pro výpočet posunů

$$\delta x_0 = a \sin B_i \cos L_i \delta B_i + a \cos B_i \sin L_i \delta L_i - \cos B_i \cos L_i (\delta \zeta_i + \delta a + a \sin^2 B_i \delta \alpha); \quad (7)$$

$$\delta y_0 = a \sin B_i \sin L_i \delta B_i - a \cos B_i \cos L_i \delta L_i - \cos B_i \sin L_i (\delta \zeta_i + \delta a + a \sin^2 B_i \delta \alpha);$$

$$\delta z_0 = -a \cos B_i \delta B_i - \sin B_i (\delta \zeta_i + \delta a + a \sin^2 B_i \delta \alpha + 2a \sin B_i \delta \alpha);$$

- jestliže je k dispozici i identických bodů se souřadnicemi v obou systémech, pak řešením MNČ lze určit hledané posuny, charakteristické pro danou transformační oblast.

Pro názornost si lze proces určování posunů představit jako natáčení a posun dvou paprskových trsů, umístěných v počátcích dvou soustav prostorových pravouhlých souřadnic X, Y, Z tak, aby se odpovídající paprsky protínaly v identických bodech [viz (6)]. Toho lze ovšem dosáhnout jen tehdy, když se počátky obou soustav vzájemně posunou o $\delta x_0, \delta y_0, \delta z_0$ a natočí, tj obdobně lze tuto představu rozšířit i na další prvky - jednotlivé rotace a měřítkový koeficient.

Transformace rozdílů souřadnic $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ bodů na zemském povrchu, určených ve WGS 84 diferenciálním měřením GPS, na rozdílů souřadnic v lokálním systému má tvar:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_{\text{lok}} = (1 + m) \vec{R}(\epsilon) \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_{\text{WGS 84}}, \quad (8)$$

kde $\sqrt{(\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2)}_{\text{WGS 84}}$ – délka strany (spojnice) mezi body 1, 2, na nichž proběhlo diferenciální měření GPS,

$\vec{R}(\epsilon)$ – matice rotací, ekvivalentní (3),

$\text{tg } A_{1,2} = \frac{\Delta Y_{1,2}}{\Delta X_{1,2}}$ – azimut strany.

b) Dynamické parametry geodetického systému jsou:

- model tíhového pole Země, vyjádřený Stokesovými parametry rozvoje gravitačního potenciálu tělesa Země do řady sférických funkcí (harmonickými koeficienty),

- vzorec pro normální tíhové zrychlení γ_0 , odvozený z modelu tíhového pole Země s příslušnými konstantami,

- geocentrická konstanta GM (násobek Newtonovy gravitační konstanty a hmotnosti Země),

- rychlost úhlové rotace Země ω .

3.1. Charakteristiky World Geodetic System 1984 (podle [11])

Definice souřadnicové soustavy:

Počátek – v těžišti tělesa Země (geocentru).

Osa Z – rovnoběžná se směrem CTP (Conventional Terrestrial Pole) pro pohyb pólu podle definice BIH (Bureau International de l'Heure) stanovené na základě dat, souřadnic stanic BIH.

Osa X – průsečnice roviny nultého poledníku WGS 84 s rovinou rovníku CTP.

Osa Y – kolmá k ose X v rovině rovníku CTP (90° východní délky).

Parametry elipsoidu WGS 84:

Velká poloosa

$$a = (6\,378\,137 \pm 2) \text{ m, odvozené zploštění } \alpha = 1/29,257\,223\,563.$$

Gravitační konstanta Země (násobek Newtonovy gravitační konstanty a hmotnosti Země)

$$GM = (3\,986\,005 \pm 0,6) 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}.$$

Normalizovaný zonální gravitační koeficient 2. řádu

$$\bar{C}_{2,0} = (-484,166\,85 \pm 0,001\,30) \cdot 10^{-6},$$

$$J_2 = J_{2,0} = 108\,263 \cdot 10^{-8}.$$

Úhlová rychlost rotace Země

$$\omega = (7\,292\,115 \pm 0,1500) \cdot 10^{-11} \text{ rad/s.}$$

Bližší podrobnosti viz [11]. Podle sdělení pracovníka DMA jsou pro model gravitačního potenciálu odvozeny harmonické koeficienty (Stokesovy konstanty) pro $n, m = 360$, jejichž prostřednictvím je určen průběh globálního geoidu (1992). V [11] jsou uvedeny koeficienty $n, m = 18$.

Další odvozenou charakteristikou je **hodnota normálního tíhového zrychlení na rovníku**

$$\gamma_e = 9,780\,326\,7714 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}.$$

Vzorec pro normální tíhové zrychlení (v miligalech, $10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)

$$\gamma_B = \frac{\gamma_e (1 + k \sin^2 B)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} = \frac{\gamma_e (1 + 0,001\,931\,851\,386\,39 \cdot \sin^2 B)}{\sqrt{1 - 0,006\,694\,379\,990\,13 \cdot \sin^2 B}}. \quad (9)$$

Rychlost světla ve vakuu

$$c = (299\,792\,458 \pm 1,2) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

3.2. Kombinace klasických a družicových geodetických systémů

Současná praxe v mnoha zemích potvrzuje, že výsledky měření GPS jsou běžnou součástí prací při výstavbě či modernizaci geodetických sítí, od sítí inženýrských až po geodetické základy. Vzhledem k evropské tradici a současné realitě se vývoj ubírá ve směru komplexního využití klasických (trigonometrických) sítí ve spojení s nadřazenou opěrnou, systémově charakterizovanou sítí GPS, tj. ve směru integrace klasických a družicových sítí. Řešení této úlohy probíhá v různých zemích prostřednictvím různých metod v závislosti na místních podmínkách, počtu bodů GPS a charakteru bodového pole. Možnost určení souřadnic vztahených k ploše elipsoidu poskytuje metodám GPS další využití ve výstavbě výškových a tíhových základů [15] pro definici plně kompatibilního geodetického systému prostřednictvím přístupů tzv. integrované geodézie. Přístup k modernizaci geodetických základů vhodný i pro čs. podmínky je uveden např. v [16]. Předpokladem je však zaměření kvalitní sítě „nultého“ řádu GPS, jejímž prostřednictvím jsou tisíce souřadnic bodů I. až V. řádu převedeny a rektifikovány do prostorové konstrukce GPS.

Podstata úlohy spočívá v těchto krocích:

1. Souřadnice GPS se převedou na zeměpisné geodetické $B, L; H$

$$(X, Y, Z)_{\text{GPS}} \longrightarrow (B, L; H)_{\text{GPS}},$$

2. Pro souřadnice zeměpisné geodetické GPS a stejné souřadnice identických bodů v lokálním systému se určí transformační parametry (předpokladem je znalost elipsoidických výšek)

$$(B, L; H)_{\text{GPS}} + (B, L; H)_{\text{lok}} \longrightarrow \text{transformační parametry.}$$

3. Prostřednictvím získaných transformačních parametrů se převedou souřadnice $(B, L; H)_{\text{lok}}$ vyšších řádů do „rektifikovaného“ lokálního systému

$$(B, L; H)_{\text{AGS, I. ř.}} \longrightarrow (B, L; H)_{\text{lok „rekr“}}.$$

4. Do osnovy bodů $(B, L; H)_{\text{lok „rekr“}}$ se na elipsoidu vypočtou a vyrovnají souřadnice bodových polí nižších řádů s využitím opravených a redukováných geodetických prvků (úhlů, směrů, příp. délek stran).

5. Vyrovnané souřadnice bodů lokálního systému se převedou do zobrazovací roviny užívaného lokálního kartografického zobrazení (např. Gaussova)

$$(B, L)_{\text{lok „rekr“}} \longrightarrow (x, y)_{\text{lok „rekr“}}.$$

Pokud je dané území zobrazeno v jediné kartografické rovině, anebo pro lokální síť menšího území (příp. inženýrské sítě), lze úlohu řešit podle jednoduchého schématu:

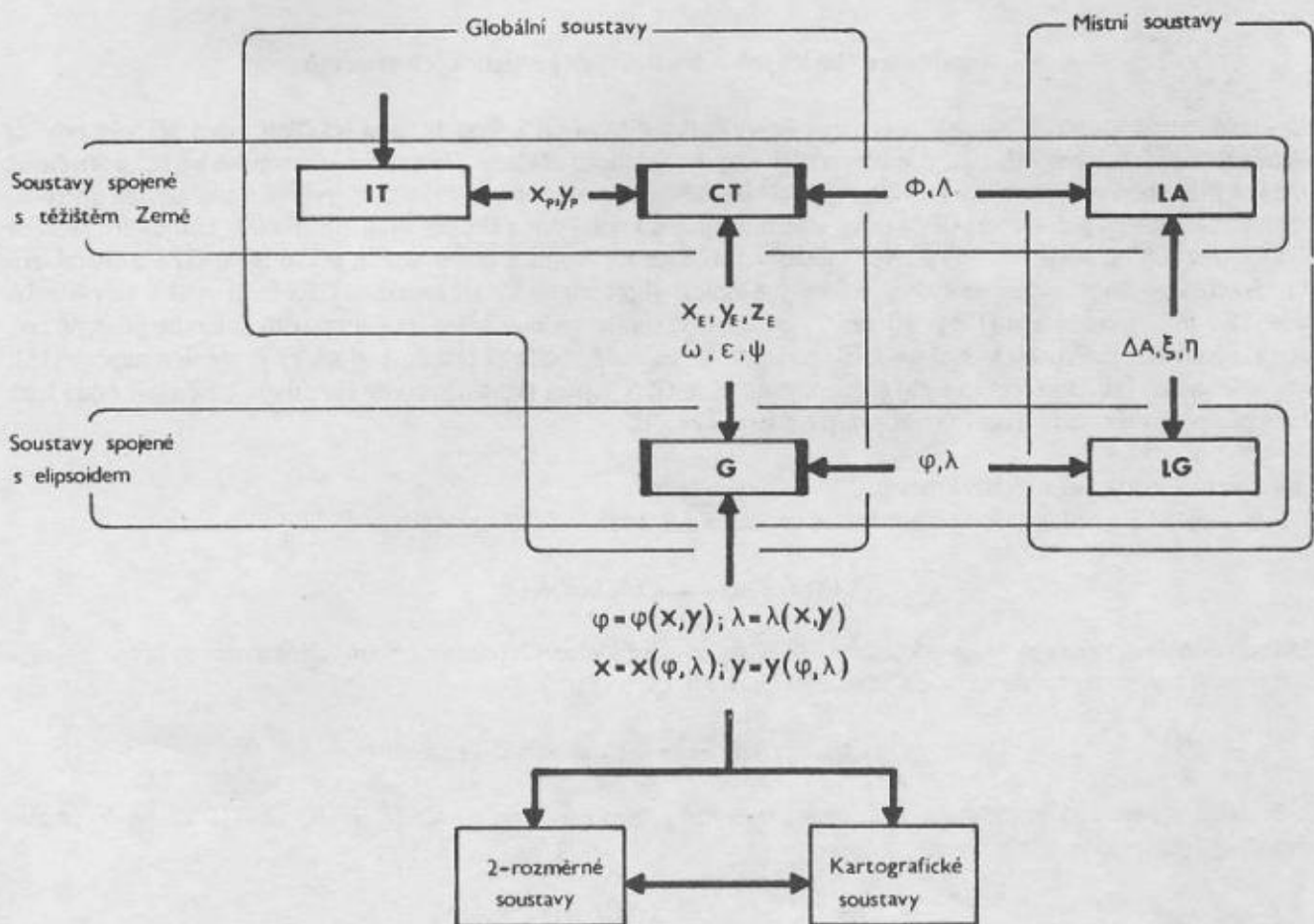
$$1. (X, Y, Z)_{GPS} \longrightarrow (B, L; H)_{GPS} \longrightarrow (x, y)_{lok\ GPS}$$

převodem souřadnic x, y GPS do lokálního kartografického zobrazení s parametry elipsoidu GPS x, y_{lok} .

$$2. \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{lok} = \vec{B} + m \cdot \vec{R}(\epsilon_3) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{lok\ GPS} \quad (10)$$

určením transformačních parametrů a následnou transformací v rovině lokálního zobrazení, kde

- \vec{B} – vektor translace v zobrazovací rovině,
- $\vec{R}(\epsilon_3)$ – matice rotace okolo osy Z o rozměru 2×2 ,
- m – měřítkový faktor.



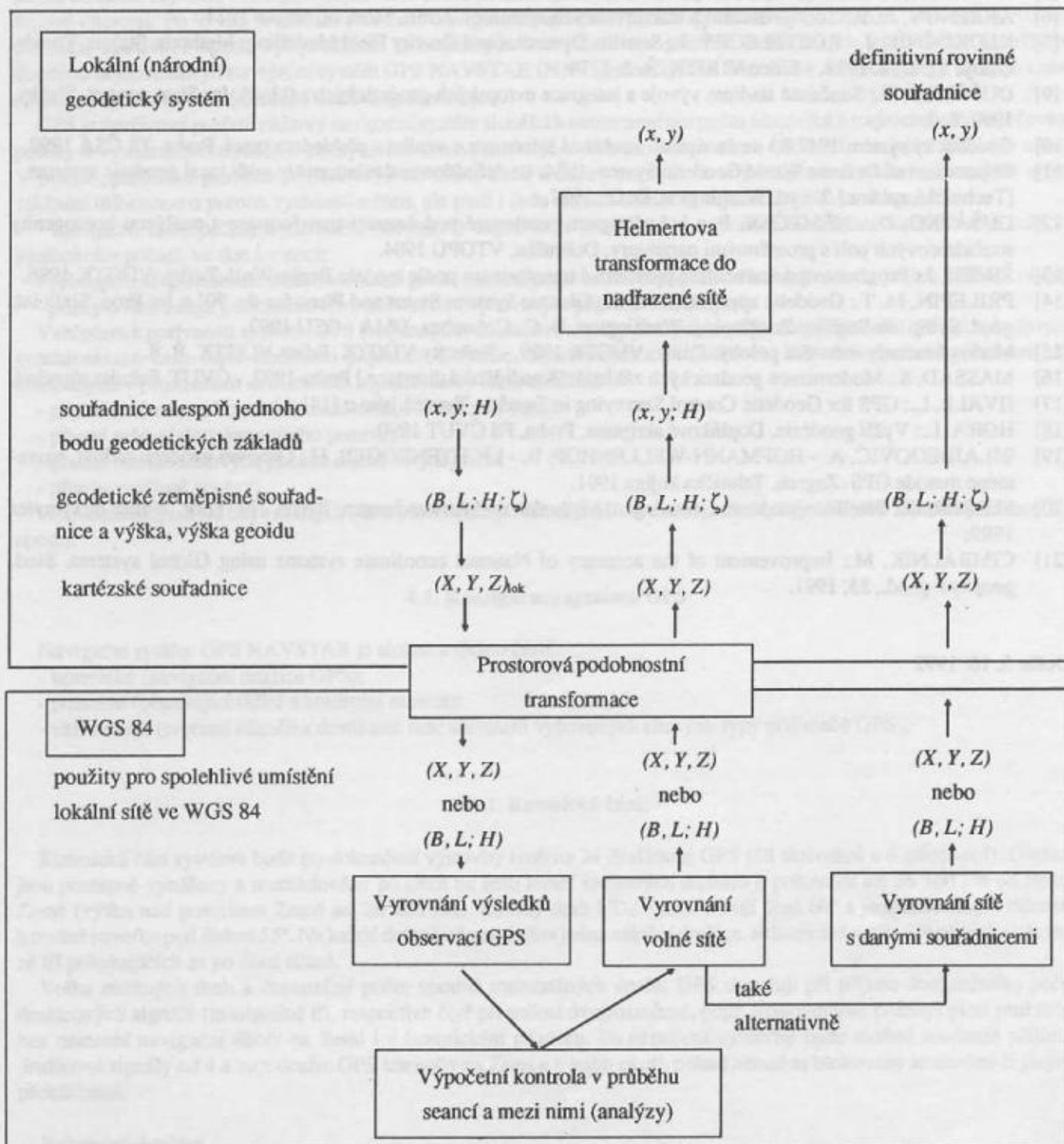
Obr. 1. Transformační diagram (G - geodetická souřadnicová soustava, LG - lokální geodetická souřadnicová soustava, CT - konvenční zemská soustava, IT - okamžitá zemská soustava, LA - lokální astronomická soustava)

Dalším možným přístupem je řešení uvedené na obr. 1 [17].

Na příkladu výstavby evropského geodetického systému od jeho fáze ED 79 k ED 87 lze velmi názorně porovnat rozdíl klasické a kombinované regionální geodetické sítě, vzniklý částečným zavedením družicových prvků do vyrovnání ED 87 [18].

Problematika je natolik aktuální, že odborné časopisy přinášejí průběžně informace o nových přístupech a řešeních této úlohy, např. při výstavbě geodetického systému EUREF (European Reference Frame), při využití GPS v městské, inženýrské geodézii a při modernizaci geodetických základů v ČSFR, Maďarsku, Polsku atp.

Např. v [18] je uveden "transformační diagram" pro vzájemné převody geocentrických, elipsoidických a rovinných souřadnicových soustav (viz obr. 1), shrnující přehledně předcházející text.



Obr. 2. Vývojový diagram procesu určení rovinných souřadnic lokální sítě prostřednictvím GPS [17]

Literatura:

- [1] BURŠA, M.: Základy kosmické geodézie. 3. díl. Kosmická geodézie dynamická. Praha, TS ČSLA 1970.
- [2] BURŠA, M. - KOSTELECKÝ, J.: Kosmická geodézie a kosmická geodynamika. Praha, TS AČR. - V tisku.
- [3] BURŠA, M.: The four primary geodetic parameters. Stud. geophys. geod., 36, 1992.
- [4] HEISKANEN, W. A. - MORITZ, H.: Physical Geodesy. San Francisco, London, W. H. Frieman 1967.
- [5] KABELÁČ, J.: Úvod do kosmické geodézie. 2. díl. Praha, FS ČVUT 1991.
- [6] AKSĚNOV, Je. P.: Teorija dviženija isskustvennyh sputnikov Zemli. Moskva, Nauka 1977.
- [7] KLOKOČNÍK, J. - KOSTELECKÝ, J.: Satellite Dynamics and Gravity Field Modelling: Methods, Statuts, Trends. Zdi by, VÚGTK 1988. - Edice VÚGTK, Ř. 5, č. 14.
- [9] DUŠÁTKO, D.: Současné stadium vývoje a integrace evropských geodetických základů. In: Sbor. topogr. Služby, 1992, č. 2.
- [10] Geodetický systém 1942/83 na čs. území. Souhrnná informace o vzniku s přehledem prací. Praha, TS ČSA 1992.
- [11] Department of Defense World Geodetic System 1984. Its definition and relationship with local geodetic systems. [Technická zpráva.] 2. vyd. Washington, D. C., 1987.
- [12] DUŠÁTKO, D. - NĚMEČEK, P. a kol.: Program prostorové podobnostní transformace s analýzou homogenity souřadnicových polí s proměnnými parametry. Dobruška, VTOPÚ 1984.
- [13] ŠIMEK, J.: Programová dokumentace prostorové transformace podle modelu Burša-Wolf. Zdi by, VÚGTK 1986.
- [14] PRILEPIN, M. T.: Geodetic applications of the Glonass System: Status and Plans for the 90' s. In: Proc. Sixth int. geod. Symp. on Satellite Positioning. Washington, D. C., Columbus, DMA - OSU 1992.
- [15] Moderní metody určování polohy. Zdi by, VÚGTK 1989. - Referáty VÚGTK. Edice VÚGTK, Ř. 8.
- [16] MASSAD, S.: Modernizace geodetických základů. [Kandidátská disertace.] Praha 1992. - ČVUT. Fakulta stavební.
- [17] JIVALL, L.: GPS for Geodetic Control Surveying in Sweden. Tamtéž jako u [14].
- [18] HORA, L.: Vyšší geodézie. Doplnkové skriptum. Praha, FS ČVUT 1990.
- [19] BILAJBEGOVIĆ, A. - HOFMANN-WELLENHOF, B. - LICHTENEGGER, H.: Osnovni geodetsi radovi, suvremene metode GPS. Zagreb, Tehnička knjiga 1991.
- [20] SEEBER, G.: Satellitengeodäsie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Berlin - N. York, Walter de Gruyter 1989.
- [21] CIMBÁLNÍK, M.: Improvement of the accuracy of National coordinate systems using Global systems. Stud. geophys. geod., 35, 1991.

Došlo 5. 10. 1992

4. Základní informace o systému GPS a jeho charakteristiky

Znalost přesné polohy a nutnost poskytování věrohodných informací o poloze získává na významu v mnoha odvětvích lidské činnosti, zejména v navigaci dopravních prostředků a vojenství, kde je důležitým předpokladem k úspěšnému vedení bojové činnosti. Po vývoji a užívání celé řady navigačních systémů, jako např. OMEGA, LORAN, TACAN, ARGOS, SECOR, TRANSIT apod., byl počátkem sedmdesátých let vyvinut a v průběhu osmdesátých let zaveden do užívání doposud nejdokonalejší navigační systém GPS NAVSTAR (NAVigation System with Time And Ranging), který je znám spíše pod zkratkou GPS (Global Positioning System).

GPS je družicový pasívní rádiový navigační systém sloužící k neomezenému počtu účastníků k trojrozměrnému určování polohy s vysokou přesností a k poskytování časových údajů v libovolném prostoru na Zemi a v jejím blízkém okolí. V plném operačním provozu (v roce 1993 až 1994) bude schopen poskytovat vojenským a civilním uživatelům nejen základní informace o poloze, rychlosti a času, ale plnit i řadu dalších úkolů. K nejdůležitějším z nich patří:

- navigační zabezpečení a navádění (navigace) dopravních prostředků a speciálních zařízení na stanovené cíle za jakéhokoliv počasí, ve dne i v noci;

- zabezpečení speciálních služeb v oblasti geodézie, fotogrammetrie, topografického mapování a jiných vědních oborů;
- poskytování údajů jednotného času uživatelům vybaveným přijímači GPS apod.

Vzhledem k pasívnosti systému GPS (což značí, že družicové signály jsou pouze přijímány přijímači GPS) je vyžadována synchronizace času mezi hodinami přijímače a družic. Synchronizace je (blíže viz 4.3) zabezpečena přenosem dat obsažených v přijímaném družicovém signálu, který musí umožnit:

- přesné měření vzdálenosti (pokud možno v reálném čase);
- přesné měření dopplerovského posuvu;
- přesná měření fázových posunů nosné vlny signálu;
- přenos vysílané zprávy;
- minimalizaci zdrojů chyb různých vlivů působících při šíření družicového signálu k přijímači (vliv ionosféry, troposféry apod.).

4.1. Konfigurace systému GPS

Navigační systém GPS NAVSTAR je složen z těchto částí:

- kosmické (navigační družice GPS);
- pozemní (obsahující řídicí a kontrolní stanice);
- uživatelské (tvořené několika desítkami tisíc uživatelů vybavených různými typy přijímačů GPS).

4.1.1. Kosmická část

Kosmická část systému bude po dokončení výstavby tvořena 24 družicemi GPS (18 aktivními a 6 záložními). Družice jsou postupně vynášeny a rozmisťovány po třech na šesti téměř kruhových drahách o poloměru asi 26 560 km od středu Země (výška nad povrchem Země asi 20 200 km). Roviny drah UDZ spolu svírají úhel 60° a jsou skloněny vzhledem k rovině rovníku pod úhlem 55°. Na každé dráze bude umístěna jedna záložní družice, aktivovaná v případě poruchy některé ze tří pohybujících se po dané dráze.

Volba oběžných drah a dostatečný počet vhodně rozmístěných družic GPS dovolují při příjmu dostatečného počtu družicových signálů (minimálně tří, respektive čtyř při určení dvojrozměrné, popř. trojrozměrné polohy) plnit prakticky bez omezení navigační úkoly na Zemi i v kosmickém prostoru. Po ukončení výstavby bude možné současně přijímat družicové signály od 4 a více družic GPS kdekoli na Zemi a v jejím okolí, pokud nebudou blokovány terénními či jinými překážkami.

Vybavení družice

Vybavení každé družice je tvořeno pěti základními podsystemy, a to:

- řídicím a kontrolním;
- aktivní navigace;

- zdrojovým;
- spojovacím;
- detekce jaderných výbuchů.

Na pokyn řídicího a kontrolního střediska lze korigovat v libovolném směru a v omezeném rozsahu dráhu každé družice a tím ovlivňovat jak její orientaci, tak i upravovat parametry její oběžné dráhy.

Každá družice vysílá signály na dvou nosných frekvencích, $L1 = 1575,42$ MHz a $L2 = 1227,60$ MHz. Signály jsou fázově modulovány pseudonáhodnými kódy, a to tak, že **frekvence L1 je modulována P kódem a C/A kódem, frekvence L2 pouze P kódem**. Informace o počtu, poloze a rozmístění všech družic získá uživatel dekodováním signálů v přijímači GPS, čímž se značně zkracuje čas potřebný k určení polohy uživatele. Je třeba poznamenat, že správce systému může kdykoliv znemožnit nežádoucím a neoprávněným uživatelům přístup k algoritmu generování kódu (tzv. antispoofing), a tím zamezit využívání navigačního systému.

4.1.2. Pozemní řídicí a kontrolní část

Pozemní řídicí a kontrolní část, tvořená jedním hlavním (řídicím) střediskem a pěti pomocnými (kontrolními) středisky, provádí nepřetržitá pozorování všech družic GPS na obou frekvencích.

Úkolem řídicího střediska je:

- shromažďovat navigační údaje od všech družic v centrálním počítači k určení jejich efemerid;
- provádět průběžnou analýzu poloh družic;
- určovat pravděpodobné změny jednotlivých oběžných drah družic v závislosti na změnách gravitačního pole Země;
- provádět změny v kódování družicových signálů a korekce palubních časových signálů;
- shromažďovat a zpracovávat další potřebné údaje a informace;
- dálkově řídit a koordinovat provoz a činnost pomocných kontrolních středisek;
- provádět injekcí efemerid na paluby jednotlivých družic GPS.

Úkolem pomocných středisek je:

- průběžně přijímat navigační signály od jednotlivých družic;
- s vysokou přesností určovat parametry drah družic a vyhodnocené odchylky předávat řídicímu středisku.

4.1.3. Uživatelská část systému GPS

Uživatelská část je tvořena různými typy přijímačů GPS, jež uživatelům umožňují:

- vyhledání navigačních družic;
- příjem a zpracování navigačních signálů;
- výpočet souřadnic polohy a dalších údajů přímo v přijímači;
- zobrazení údajů na výstupním grafickém zařízení (displeji).

Každý přijímač je tvořen těmito základními částmi:

- vstupní anténou, konvertorem a elektronickým blokem zpracování signálu;
- zpracovatelskou částí s převodníkem dat a číslicovým počítačem s pamětí;
- výstupním zařízením (displejem).

Počet jednotlivých funkčních částí a konstrukční provedení přijímače jsou závislé na požadavcích uživatelů a v jisté míře i na možnostech výrobce.

4.2. Struktura signálu GPS, kódování

Významnou úlohu v systému GPS sehrává struktura družicového signálu, která je volena tak, aby jeho zpracováním bylo možné kdykoliv a kdekoliv na Zemi a v jejím blízkém okolí určit polohu, rychlost, čas a případně další požadované veličiny. Signál je tvořen dvěma odlišnými nosnými frekvencemi, $L1$ a $L2$, na kterých jsou fázově modulována potřebná data. Obě uvedené frekvence, i další složky signálu, jsou odvozeny s využitím různých násobků ze základní nosné frekvence $f_0 = 10,23$ MHz takto: $L1 = 154 f_0 = 1575,42$ MHz,

$$L2 = 120 f_0 = 1227,60 \text{ MHz.}$$

Uvedené vysoké frekvence:

- zabezpečují odolnost systému vůči různým druhům rušení, a tak garantují jeho vysokou spolehlivost;
- umožňují měření vzdálenosti i fáze nosné vlny signálu s vysokou přesností;
- zabezpečují spolehlivý přenos dat vysílanou zprávou obsaženou v družicovém signálu;
- výrazně omezují vlivy atmosféry (zejména ionosféry) na šíření signálu.

Využívání vyšších frekvencí při dané energii vysílání je omezeno slabší úrovní příjmu signálu. Uvážením uvedené skutečnosti je kompromis mezi frekvencí a úrovní příjmu signálu.

Systém GPS, pracující jako jednostranný dálkoměr, neumožňuje přímé měření vzdáleností vzhledem ke krátkým vlnovým délkám obou nosných frekvencí ($\lambda_1 = 19$ cm a $\lambda_2 = 24$ cm) a poměrně značné měření vzdálenosti družice - přijímač. **Základním problémem určení vzdálenosti je zjištění:**

- doby šíření (časového intervalu Δt) družicového signálu určenou vzdáleností;
- celočíselného počtu N celých vlnových délek družicových signálů v určené vzdálenosti.

Pro tyto účely jsou nosné frekvence L1 a L2 fázově modulovány pomocí:

- pseudonáhodného C/A kódu;
- pseudonáhodného P kódu (Y kódu);
- dat (někdy označována jako D kód)

frekvence L1: C/A kódem a buď P, nebo Y kódem a daty D,

frekvence L2: P nebo Y kódem a daty D.

4.2.1. Pseudonáhodný C/A kód

Všem uživatelům systému je vždy dostupný C/A kód, který je hlavně využíván k vyhledávání jednotlivých družic GPS, neboť má vzhledem k P kódu několikanásobně vyšší vyzařovaný výkon. Poskytování C/A kódu je označováno jako standardní služba SPS (Standard Precision Service). Vzhledem k tomu, že je možné jej generovat a zpracovávat v přijímači společně s kódem přijímaného družicového signálu, lze dosáhnout přesnosti v určení polohy asi do 100 m. Generování kódu je realizováno v přijímači v tzv. posuvných registrech se zpětnou vazbou a odbočkami.

Pseudonáhodný C/A kód o frekvenci 1,023 MHz ($1/10 f_0$) a vlnové délce 300 m s periodou opakování 1 ms obsahuje celkem 1023 b. Podrobnější informace o uvedeném kódu i jeho zpracování lze získat např. v [1].

4.2.2. Pseudonáhodný P kód

Pseudonáhodný P kód je určen pouze omezenému přísně vybranému okruhu uživatelů (označováno jako SA - selective ability), zejména z ozbrojených sil USA, vybavených autorizovanými přijímači GPS schopnými přijímat a vyhodnocovat jak C/A, tak i P kód. Poskytování P kódu je označováno jako přesná služba - PPS (Precision Position Service). Generování P kódu je velice obtížné a zpravidla není možné bez spolupráce s obsluhujícím personálem systému GPS NAVSTAR, čímž je neoprávněným uživatelům znemožněno jeho využití, a tím i dosažení vyšší přesnosti určení polohy.

Pseudonáhodný P kód o frekvenci 10,23 MHz (frekvence je shodná se základní nosnou frekvencí f_0), vlnové délce 30 m, s periodou opakování $23,017\,555\,5 \cdot 10^{-6}$ s obsahuje $235,469\,59 \cdot 10^{12}$ b. Bližší informace lze nalézt v [1].

4.2.3. Pseudonáhodný Y kód

Pseudonáhodný Y kód je určen výhradně americké armádě a v případě potřeby nahrazuje P kód. Charakteristiky kódu a schéma jeho generování jsou před nežádoucími uživateli utajovány.

4.2.4. Data (D kód)

Data jsou modulována a vysílána s frekvencí 50 bitů za sekundu na obou nosných frekvencích, L1 a L2. Jejich součástí je navigační zpráva, ve které jsou uvedeny základní údaje o parametrech dráhy družic a další potřebné informace. Formát navigační zprávy, viz obr. 1, je tvořen jedním rámcem o celkové délce 1500 bitů a je rozdělen do pěti podrámců. Každý z podrámců 4 a 5 obsahuje 25 stránek.

Přenos dat je realizován pomocí 24 stránek, přičemž zbývajících 6 slouží k zabezpečení jejich přenosu. K příjmu kompletní zprávy o délce trvání 12,5 minuty je zapotřebí 25 rámců, každý o 1500 bitech. Celkově je tedy zapotřebí

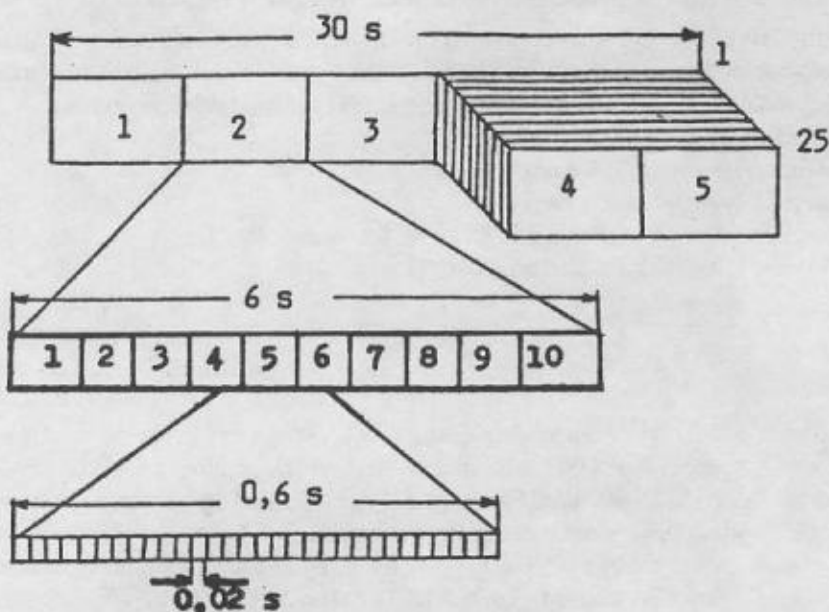
37 500 bitů. Doba trvání 1 bitu je 0,02 sekundy, během níž se přesně 20krát zopakuje (při rychlosti přenosu dat 1,023 megabitu za sekundu) kompletní C/A kód obsahující 1023 bitů.

Každý podrámec začíná telemetrickým slovem TLM, nesoucím informaci pro pozemní řídicí a kontrolní střediska. Po něm následuje slovo HOW (Hand-Over Word), které je nezbytné pro uživatele pracující s P-kódovými přijímači, neboť poskytuje informaci o způsobu vyhledání P kódu a kromě toho přenáší pořadové číslo podrámece v týdnu. Slovo HOW je měněno každých 6 sekund.

Základní jednotkou zprávy je jeden rámeček (délka 1500 bitů)

1 rámeček = 5 podrámečků,
podrámeček 4 a 5 má 25 stránek

1 podrámeček = 10 slov



Poznámka: Jeden mateřský rámeček obsahuje 5 podrámečků, z nichž podrámeček 4 a 5 obsahují 25 stránek, což představuje 37 500 bitů o době trvání 12,5 minuty.

Obr. 1

4.2.4.1. Obsah jednotlivých podrámečků

Podrámeček 1:

- označení - týdne GPS,
- L2 kódu a dat,
- informace o přesnosti a stavu každé družice (health - zdraví),
- stáří dat (efemerid),
- koeficientů pro korekci hodin družic.

Podrámeček 2 a 3:

- parametry dráhy družic pro vyslaný časový interval. Data obsažená v navigační zprávě jsou obnovována každou hodinu. Kapacita paměti palubního družicového počítače umožňuje uchovávat data na dalších 14 dní.

Podrámeček 4:

- almanach družic 25 až 32 (stránky 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10),
- koeficienty ionosférického modelu a UTC data (stránka 18),
- označení, zdali je zaveden tzv. antispoofing (ochrana dat před nežádoucími uživateli) na Y nebo P kódu pro každou družici (stránka 25),
- konfigurace družic (stránka 25),
- stav (zdraví) družic (stránka 25),
- rezervní stránky (1, 6, 11, 12, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24),
- náhradní stránky (13, 14, 15),
- speciální zprávy (stránka 17).

Podrámec 5:

- almanach družic 1 až 24 (stránky 1 až 24),
- stav (zdraví) družic 1 až 24 (stránka 25).

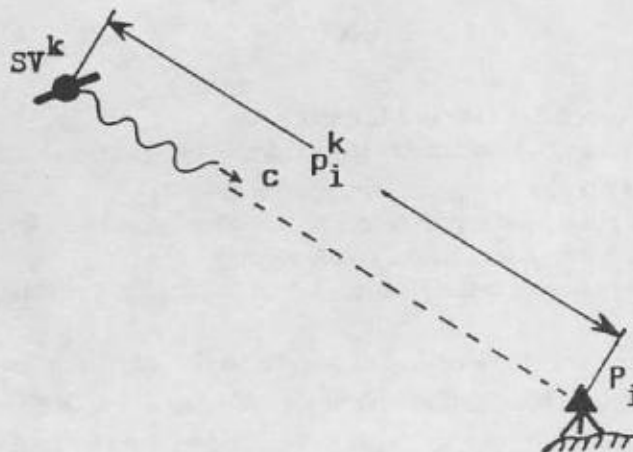
Celkový systém GPS, použité frekvence, způsoby kódování a dekodování družicových signálů, schopnost vyhledávat a opravovat chyby, využití progresivní technologie zpracování signálů apod., to vše zaručuje značnou odolnost systému vůči rušivým vlivům.

4.3. Měřené veličiny a jejich využití při určování polohy

Technologie určování polohy s využitím systému GPS je založena na bázi měření dvou veličin, a to:

- pseudovzdáleností (časového rozdílu Δt),
- fázového rozdílu nosné vlny družicového signálu, s jejichž pomocí jsou určovány vzdálenosti družice - přijímač.

Princip určení vzdálenosti p_i^k družice - přijímač je znázorněn na obr. 2.



Obr. 2

Vzdálenost lze vyjádřit pomocí zjednodušeného tvaru vztahem

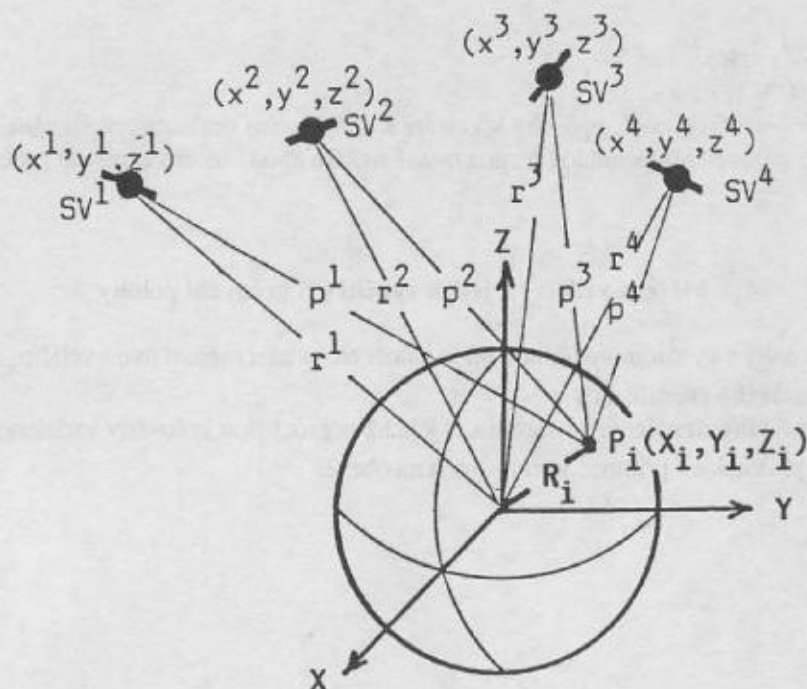
$$p_i^k = c \Delta t,$$

kde

- Δt – doba šíření družicového signálu vzdáleností p_i^k (družice - přijímač),
- c – rychlost šíření družicového signálu.

Jinak řečeno, vzdálenosti družice - přijímač p_i^k jsou získány měřením časového intervalu Δt násobeného rychlostí šíření družicového signálu c a jsou nazývány pseudovzdálenostmi. Pseudovzdálenosti jsou, na rozdíl od skutečných (pravých) vzdáleností, působením různých vlivů uvedených v 4.6 zatíženy chybami v měřených vzdálenostech.

Poté je pomocí vzdáleností p_i^k určených ve stejném časovém okamžiku (k nejméně 4 družicím) vypočítána poloha přijímače GPS. Princip určení polohy přijímače je znázorněn na obr. 3.



Obr. 3,

- kde
- r^k – geocentrický polohový vektor k -té družice,
 - p_i^k – polohový vektor k -té družice od i -tého přijímače (měřená pseudovzdálenost) ... známá veličina,
 - R_i – geocentrický polohový vektor i -tého přijímače,
 - X_i, Y_i, Z_i – souřadnice polohy i -tého přijímače ... neznámé (určované) veličiny,
 - x^k, y^k, z^k – souřadnice polohy k -té družice... známé veličiny,
 - δt – časový posun stupnic hodin přijímače a družice... neznámá veličina.

Je nutné uvést, že všechny určované pseudovzdálenosti jsou, dá se říci, stejnou měrou zatíženy chybou v určované vzdálenosti způsobenou nesynchronizací hodin družic a přijímače vzhledem k času GPS (tzv. časový posun δt). Je tedy zřejmé, že časový posun δt je kromě neznámých souřadnic polohy přijímače další neznámou veličinou, která musí být určena, a lze ji vyjádřit pomocí vztahu:

$$\delta t = dt - dT,$$

- kde (2)
- dt – časová odchylka hodin družice od etalonu času GPS,
 - dT – časová odchylka hodin přijímače od etalonu času GPS.

K řešení shora uvedených 4 neznámých veličin $X_i, Y_i, Z_i, \delta t$ je třeba 4 rovnic, které získáme z měření pseudovzdáleností (případně fázových měření) na 4 družice. Měřením na více než 4 družice získáme nadbytečný počet pozorovaných veličin. Základní zjednodušené rovnice pro výpočet 4 neznámých lze získat z obecného tvaru rovnice pro určení pseudovzdálenosti:

$$\sqrt{(x^k - X_i)^2 + (y^k - Y_i)^2 + (z^k - Z_i)^2} + c\delta t = p_i^k,$$

- kde (3)
- $k = 1, 2, 3, 4$ – počet sledovaných k družic,
 - x^k, y^k, z^k – souřadnice k -té družice,
 - p_i^k – měřené pseudovzdálenosti z i -tého přijímače ke k -té družici.

Jsou-li z dřívějšího měření známy některé veličiny (např. souřadnice X, Y polohy přijímače), pro určení zbývajících dvou veličin Z a δt je třeba dvou rovnic určených ze vztahu (3) apod.

Vezmeme-li v úvahu vztah (1) a zavedeme-li další zdroje chyb včetně jejich délkových korekcí, je možné vztah (3) vyjádřit ve tvaru:

- při uvážení měřených pseudovzdáleností:

$$\sqrt{(x^k - X_i)^2 + (y^k - Y_i)^2 + (z^k - Z_i)^2} + c\delta t + dp + d_{io} + d_{tr} = p_i^k, \quad (4)$$

- při uvážení fázových měření:

$$\sqrt{(x^k - X_i)^2 + (y^k - Y_i)^2 + (z^k - Z_i)^2} + c\delta t + \lambda N_i^k + dp + d_{io} + d_{tr} = p_i^k. \quad (5)$$

V rovnicích (4) a (5) značí:

- N_i^k – celočíselný počet vlnových délek signálu obsažených v určované vzdálenosti,
- $\lambda_{1,2}$ – vlnová délka družicového signálu L1, L2,
- d_t – chyba hodin družice,
- d_T – chyba hodin přijímače,
- d_{io} – korekce z vlivu ionosféry na určovanou vzdálenost,
- d_{tr} – korekce z vlivu troposféry na určovanou vzdálenost,
- dp – korekce z vlivu chyb efemerid družice.

Souřadnice polohy uživatele jsou určeny v družicovém souřadnicovém systému WGS 84 výpočtem ze známých poloh družic a dalších měřených veličin (pseudovzdáleností, fázových rozdílů). Hledané (určované) souřadnice jsou s využitím nelineárních rovnic vztaženy k měřeným veličinám a známým souřadnicím poloh družic. Soustava nelineárních rovnic je řešena metodou postupných aproximací pomocí vztahu:

$$x^{(p+1)} = x^{(p)} - W^{-1}(x^{(p)})f(x^{(p)}), \quad (6)$$

kde $x^{(p)}$ je vektor neznámých po p -té aproximaci. Vektor x^0 volíme na základě přibližných informací o neznámých (přibližné souřadnice atd.). $W(x)$ je tzv. Jacobiho matice funkcí f_1, \dots, f_n a $f(x)$ je vektor obsahující jednotlivé funkce

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))^T. \quad (7)$$

Poznámka: Řešení předpokládá, že matice W je regulární, tj., že funkce f_1, f_2, \dots, f_n jsou lineárně nezávislé. Vektor neznámých x můžeme vypočítat pomocí vztahů:

$$x = x^0 + \delta x, \quad (8)$$

$$\delta x = (A^T C^{-1} A)^{-1} A^T C^{-1} l^p, \quad (9)$$

$$l_i^p = f_i(x) - l_i, \quad (10)$$

kde

- x^0 – vektor přibližných hodnot neznámých,
- C – kovarianční matice měření,
- A – matice derivací funkcí podle jednotlivých neznámých,
- l_i – vektor měřených veličin.

Index 0 značí, že hodnoty jednotlivých derivací počítáme v „bodě“ x^0 . Výpočet je možno podle potřeby opakovat se zpřesněnými hodnotami neznámých.

Podrobnější informace o postupu výpočtu lze nalézt v libovolné učebnici numerické matematiky, např. [2].

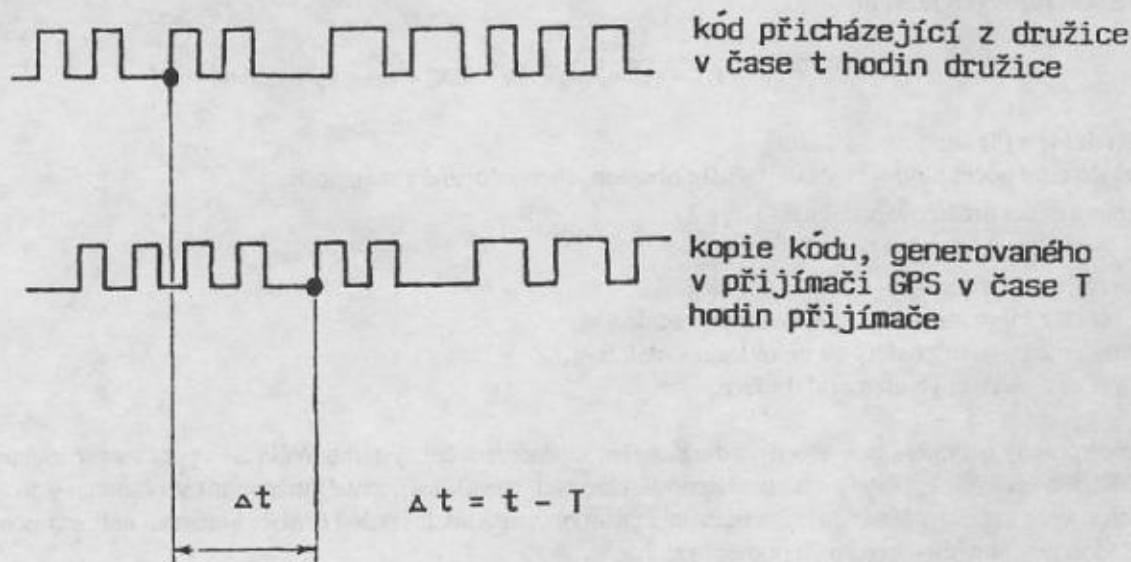
4.4. Metoda pseudovzdáleností, rovnice pro určování polohy

Určování polohy metodou pseudovzdáleností je založeno na měření pseudovzdáleností p_i^k (vzdáleností družice - přijímač, viz obr. 2) s využitím znalosti měřeného časového intervalu Δt a rychlosti šíření signálu c . Určení Δt je realizováno

v přijímači srovnáním generovaných a dekodovaných pseudonáhodných kódů. Pro určení pseudovzdálenosti je zpravidla využíván C/A kód, dostupný každému uživateli vybavenému přijímačem GPS. Princip určení Δt s využitím kódu je znázorněn na obr. 4.

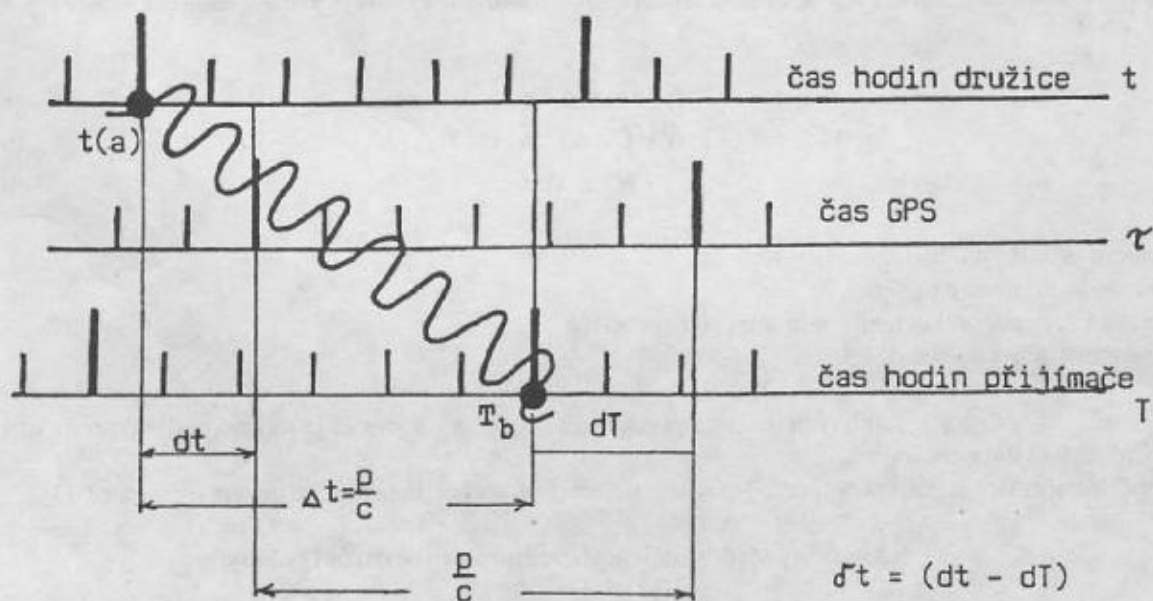
Z obr. 4 je zřejmé, že základní měřenou veličinou je rozdíl mezi časem t vyslání kódu družicí a časem T jeho příjmu přijímačem, vyjádřený vztahem:

$$\Delta t = t - T. \tag{11}$$



Obr. 4

Odvození rovnice určované pseudovzdálenosti družice - přijímač je možné nalézt např. v [1], a proto zde není uváděno. Pro představu je na obr. 5 znázorněno šíření družicového signálu ve vztahu k času GPS a k času hodin, družice a přijímače, ve kterém jednotlivé veličiny představují:



Obr. 5.

kde

- $\Delta t = t_a - T_b$ – rozdíl časů hodin přijímače a hodin družice (doba) průchodu družicového signálu vzdáleností družice - přijímač,
 dt – časová odchylka hodin družice od etalonu času GPS,
 dT – časová odchylka hodin přijímače od etalonu času GPS.

Podle např. [1] je možné úplnou obecnou rovnicí určované pseudovzdálenosti vyjádřit ve tvaru:

$$p_i^k = |r^k - R_i| + c\delta t + dp + d_{io} + d_{tr}, \quad (12)$$

kde

- r^k – geocentrický polohový vektor k -té družice,
 R_i – geocentrický polohový vektor i -tého přijímače,
 dp – korekce z vlivu chyb efemerid družice,
 d_{io} – korekce z vlivu ionosféry na určovanou vzdálenost,
 d_{tr} – korekce z vlivu troposféry na určovanou vzdálenost,
 δt – časový posun stupnic hodin přijímače a družice vyjádřený vztahem $\delta t = (dt - dT)$.

Řešením soustavy 4 rovnic vyjádřených pomocí vztahu (12) lze určit neznámé souřadnice vektoru $R_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ polohy přijímače a časový posun δt . Zjednodušený postup řešení soustavy nelineárních rovnic je možné řešit podle vztahů (6) až (10).

4.5. Fázová metoda, rovnice pro určování polohy

Některé doposud vyráběné přijímače (např. GEOTRACER 100, dodaný do TS Čs. armády) umožňují měřit kromě času Δt fázový rozdíl mezi nosnou vlnou generovanou oscilátorem přijímače (referenční) a přijímaného družicového signálu, který lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$\varphi_i^k = \varphi^k(t) - \varphi_i(T), \quad (13)$$

kde

- $\varphi^k(t)$ – fáze nosné vlny signálu vyslaného k -tou družicí v čase t hodin družice,
 $\varphi_i(T)$ – fáze generované nosné vlny signálu i -tého přijímače v čase T hodin přijímače.

Základní rovnicí měřeného fázového posunu Φ_i^k , vyjadřující vztah mezi časem hodin družice t a přijímače T , s uvážením doby průchodu signálu po dráze družice - přijímač, lze podle [1] vyjádřit v délkových jednotkách ve tvaru:

$$\Phi_i^k = p_i^k + c(dt - dT) - d_{io} + d_{tr}. \quad (14)$$

Vztah (14) vyjadřuje pouze měřenou tzv. „zbytkovou fázi“ vyjádřenou v délkových jednotkách.

Měřená vzdálenost sestává:

- z měřené zbytkové fáze Φ_i^k ,
- z počtu N_i^k celých vlnových délek nosné vlny signálu, obsaženého v určované vzdálenosti, násobeného vlnovou délkou λ a lze ji vyjádřit vztahem:

$$p_i^k = |r^k - R_i| + c\delta t + \lambda N_i^k + dp - d_{io} + d_{tr}. \quad (15)$$

Rovnice (15) je srovnatelná s rovnicí (12). Z jejich srovnání je vidět, že se navzájem liší pouze o člen λN_i^k a opačným znaménkem u korekčního členu d_{io} . Obě jsou využívány, je-li současně zpracováváno jak měření fází, tak i pseudovzdáleností.

Největším problémem fázové metody je určení počtu celých vlnových délek λN_i^* v určované vzdálenosti. Lze jej řešit různými způsoby, nejčastěji užitím obou měřených veličin, fází a pseudovzdáleností, ve výpočetním postupu. Pseudovzdálenosti jsou ve výpočetním postupu využívány k přibližnému určení polohy určovaného bodu a pro přibližné určení počtu celých vlnových délek v určované vzdálenosti. Následně je různými výpočetními postupy zpracování (např. filtrací) jednoznačně určen počet N_i^* celých vlnových délek.

Fázová metoda, založená na možnosti měřit fázi nosné vlny, je mnohem přesnější ve srovnání s metodou pseudovzdáleností, řádově až 3krát. Při přesných metodách určování polohy, řádově s přesností centimetr a vyšší, musí být vždy užívána fázová metoda. Této podstatně vyšší přesnosti je dosaženo možností měřit fázi nosné vlny o vlnové délce přibližně 20 cm s přesností řádově 1 : 400, což při uvedené vlnové délce představuje asi 0,5 mm.

Poznámka: Vlnová délka C/A kódu je 300 m, což při přesnosti měření 1 : 400 představuje asi 1 m.

4.6. Zdroje chyb při určování polohy s využitím systému GPS

Přesnost určení polohy s využitím systému GPS je závislá na mnoha faktorech, jako např. na konstelaci družic, znalosti přesných efemerid, synchronizaci hodin družic a přijímačů, na prostředí šíření družicového signálu, použité metodě měření apod. Zdroje chyb mající vliv na přesnost určení polohy lze obecně rozdělit do tří skupin, a to:

- chyby způsobené družicí,
- chyby způsobené přijímačem,
- chyby způsobené šířením družicového signálu.

Chyby družice vznikají využíváním ne zcela přesných parametrů dráhy družic (to je chyb ve vysílaných efemeridách) a z nesynchronizace hodin družic vzhledem k etalonu času GPS. Uvedené chyby ovlivňují stejnou měrou jak kódová, tak i fázová měření a závisejí na údajích poskytovaných správcem systému GPS. Mohou způsobit chyby 20 i více metrů ve vypočtené poloze. Znalost přesných efemerid je nutná zejména při určování „tzv. absolutní“ polohy pouze jediným přijímačem. Čím přesněji budou známy efemeridy, tím přesněji bude určena absolutní poloha. U diferenciálních metod jsou vlivy aplikace nepřesných efemerid i nesynchronizace hodin výrazně eliminovány.

Chyby přijímače vznikají odlišným chodem hodin přijímače a jejich nesynchronizací vzhledem k etalonu času GPS. Stejnou měrou ovlivňují přesnost určení polohy pomocí fázových i kódových měření a dosahují hodnot asi v rozmezí 10 m a více. Opět při využití diferenciálních (relativních) metod jsou uvedené vlivy výrazně redukovány.

Chyby způsobené šířením družicového signálu vznikají převážně při průchodu družicového signálu atmosférou. Atmosféra obklopující Zemi vlivem různorodého a značně proměnlivého prostředí, vedle dalších příčin, ovlivňuje šíření družicových signálů, čímž vznikají chyby v určované poloze. Přesnost určovaných délek družice - přijímač je závislá na znalosti rychlosti šíření signálů, přesnosti určení časového intervalu průchodu signálu touto vzdáleností a na přesnosti měření veličin. Rychlost šíření je proměnlivá a je funkcí vlnové délky nosné vlny, tlaku, teploty a vlhkosti vzduchu.

Nejvýznamnější složkou atmosféry je ionosféra, složená z několika vrstev, jejichž výška se mění a kolísá s denní a roční dobou. Průchodem signálů jednotlivými vrstvami ionosféry dochází k tzv. ionosférické refrakci, která způsobuje zpoždění signálů, jehož následkem vznikají chyby v určované poloze až kolem 50 m. Vzhledem k tomu, že ionosféra má vliv na frekvenci v ní se šířícího signálu, je možné eliminovat její vliv měřením na obou frekvencích při využití dvoufrekvenčních přijímačů nebo vhodným matematickým postupem ve výpočtu.

Průchodem signálů různými vrstvami troposféry dochází také, jako u ionosféry, ke zpoždění signálů, jejichž vliv může způsobit chyby až do 20 m. Je třeba upozornit, že při vertikálním průchodu signálů troposférou je její vliv na zpoždění signálů výrazně snížen, a způsobená chyba tak může dosáhnout hodnoty asi kolem 2 m. Vliv troposféry je možné pomocí různých modelů modelovat s využitím meteorologických dat zaváděných do výpočtu.

Většina zdrojů chyb (viz obr. 6) může být eliminována, případně redukována pomocí diferenciálních (relativních) metod určování polohy, případně vhodnými výpočetními postupy.

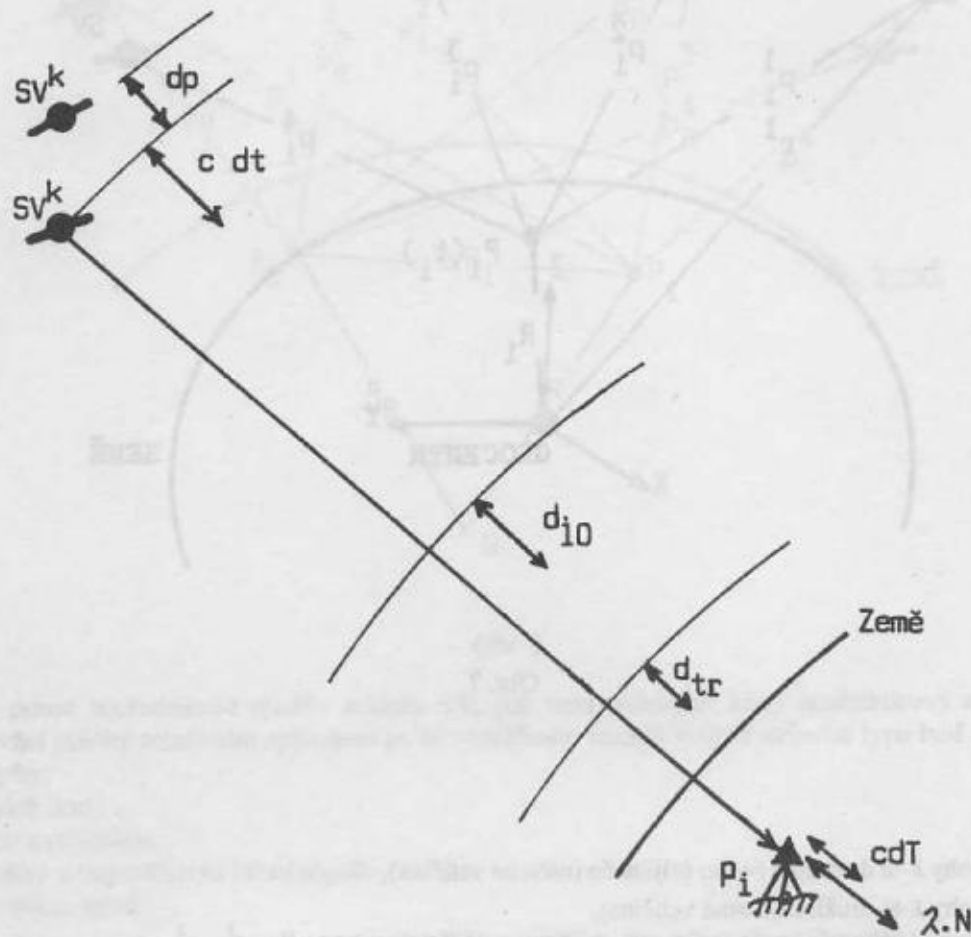
4.7. Určování absolutní a relativní polohy

Určování polohy s využitím systému GPS umožňuje zcela novými metodami a postupy určovat tzv. absolutní nebo relativní polohu v prostoru měření pomocí shora uvedených dvou veličin. Volba metod a způsobů měření bude záviset na disponibilních přijímačích GPS, požadované přesnosti a dalších okolnostech (např. druhu měřené veličiny apod.).

4.7.1. Určování absolutní polohy

Absolutní polohou bodu P_i (v čase t_i), viz obr. 7, rozumíme takovou polohu, která je definována vzhledem ke vhodně zvolenému, umístěnému a orientovanému geocentrickému souřadnicovému systému, jehož počátek (GEOCENTR) se

shoduje s hmotným středem Země. Systém GPS užívá souřadnicový systém označovaný jako WGS 84 (World Geodetic System), který je jednoznačně definován podle BIH.



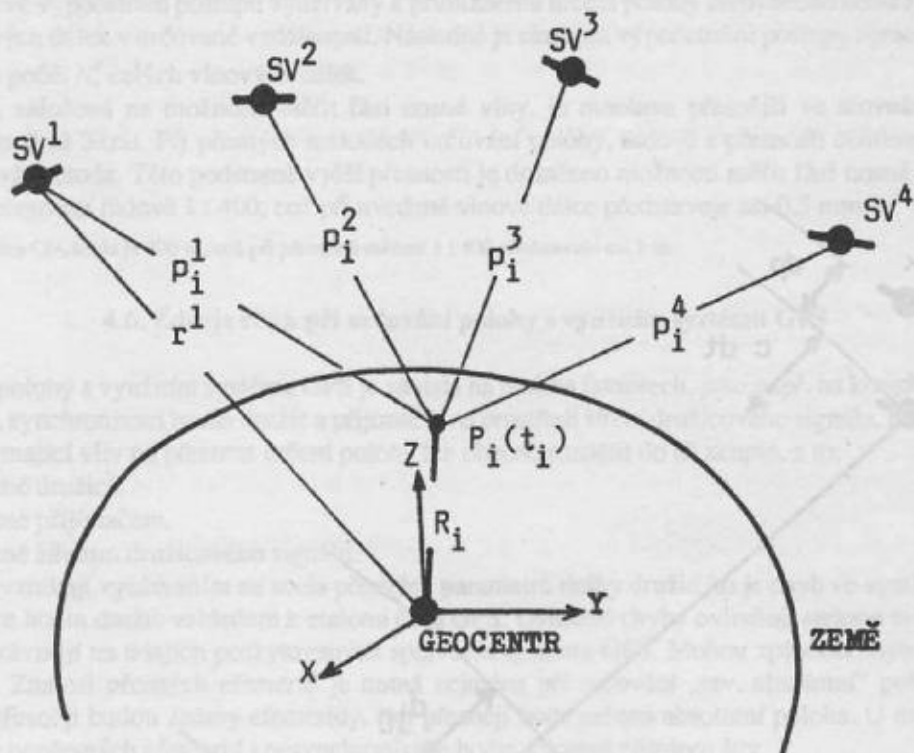
Obr. 6

Veličiny zobrazené na obr. 6 značí chyby, způsobené:

- dp – nepřesnou znalostí efemerid družice,
- cdt – hodinami družice,
- d_{io} – vlivem ionosféry,
- d_{tr} – vlivem troposféry,
- cdT – hodinami přijímače,
- λN – nepřesným určením počtu N celých vlnových délek λ v určované vzdálenosti družice - přijímač.

Souřadnice absolutní polohy každého určovaného bodu jsou vždy vztaheny ke středu (geocentru) geocentrického systému a jsou vždy určeny pouze z družicových údajů. To znamená, že do výpočtu souřadnic polohy nejsou zahrnovány žádné terestrické měřené veličiny.

Výhodou určování absolutní polohy je, že k měření dostačuje pouze jediný přijímač GPS. Naopak velkou nevýhodou je, že měřené veličiny jsou zatíženy poměrně velkými chybami způsobenými působením různých, výše uvedených vlivů, které nelze z měření a ani z výpočtů zcela vyloučit.



Obr. 7

Na obr. 7 značí:

- p_i^k – vektor polohy k -té družice z i -tého přijímače (měřená veličina),
- r^k – vektor polohy k -té družice (známá veličina),
- R_i – vektor polohy i -tého přijímače (určovaná veličina) vyjádřený ve tvaru $R_i = r^k - p_i^k$.

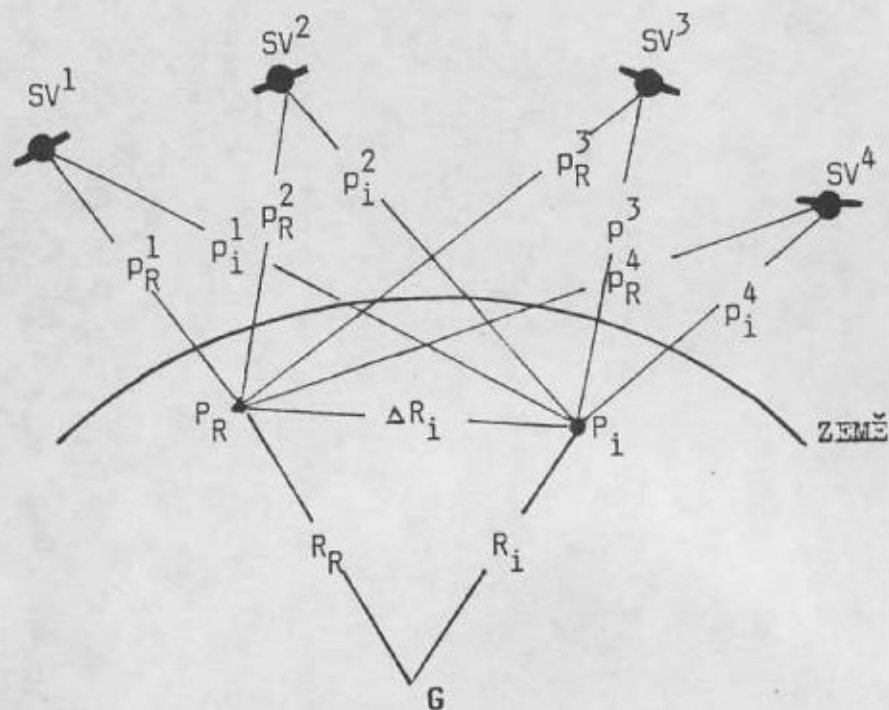
4.7.2. Určování relativní polohy

Relativní polohou bodu P_i (viz obr. 8) rozumíme takovou polohu, která je vztažena k jinému danému bodu (souřadnicově známému, ne k počátku zvoleného souřadnicového systému), např. k bodu určenému v lokálním souřadnicovém systému P_r . Princip určování polohy relativním způsobem je založen na zjišťování rozdílů souřadnicových složek vektoru $\Delta R_i = (\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i)$, který je dán vztahem:

$$\Delta R_i = R_r - R_i = p_i^k - p_r^k,$$

(16)

- kde
- R_r – geocentrický vektor k danému bodu P_r ,
 - R_i – geocentrický vektor k bodu P_i ,
 - $i = 1, 2, \dots, n$ – číslo určovaného bodu P_i ,
 - $k = 1, 2, \dots, n$ – počet družic,
 - p_i^k – vektor polohy k -té družice z i -tého přijímače (měřená veličina),
 - p_r^k – vektor polohy k -té družice z r -tého přijímače, umístěného na daném (referenčním) bodě P_r .



Obr. 8

Určujeme-li pouze souřadnicové rozdíly vektoru ΔR_i , pak není podstatné, který souřadnicový systém používáme. Výhodou určování polohy relativním způsobem je, že vytvářením rozdílů měření stejného typu buď eliminujeme, nebo redukuje chyby:

- v efemeridách družic,
- hodin družic a přijímače,
- vlivu ionosféry a troposféry na šíření signálu,
- měřených veličin apod.

Z uvedeného je zřejmé, že přesnost určování polohy relativním způsobem bude podstatně vyšší (řádově 3krát vzhledem k metodě určení absolutní polohy, což představuje dosažení až milimetrových přesností).

Literatura:

- [1] WELLS, D. a kol.: Guide to GPS Positioning. Fredericton (Canada), Canadian GPS Associates 1986.
- [2] KOPCHENOVA, N. V. - MARON, I. A.: Computation Mathematics. Moscow 1990.
- [3] DMA, Department of Defense World Geodetic System 1984. Its definition and relationships with local geodetic systems. [DMA Technical Report 8350.2.] Washington, D. C., Defense Mapping Agency 1987.
- [4] HOFMANN-WELLENHOF, B. - LICHTENEGGER, H.: GPS von der Theorie zur Praxis. In: Mitteilungen der Geodätischen Institute der Technischen Universität Graz. Graz, TU 1988.
- [5] LANGLEY, R. B.: Why is the GPS signal so complex? GPS Wld, 1990, V/VI, s. 56 - 60.
- [6] KLEUSBERG, A.: Precise differential positioning and surveying. GPS Wld, 1992, VII/VIII, s. 50 - 52.
- [7] BOBBE, T.: Real-time differential GPS for aerial surveying and remote sensing. GPS Wld, 1992, VII/VIII, s. 18 - 22.
- [8] MATONOHA, J. - JANUS, P.: Metodika měření s GPS. Metodická pomůcka. Dobruška, VTOPÚ 1992.
- [9] MATONOHA, J.: Navigační systém VECTOR. In: Sbor. topogr. Služby, 1992, č. 2, s. 40 - 42.
- [10] TŮMA, M. - JONÁŠ, V. - MATONOHA, J.: Zavádění technologie GPS v TS ČSA. [Výzkumná zpráva.] Dobruška, VTOPÚ 1992.

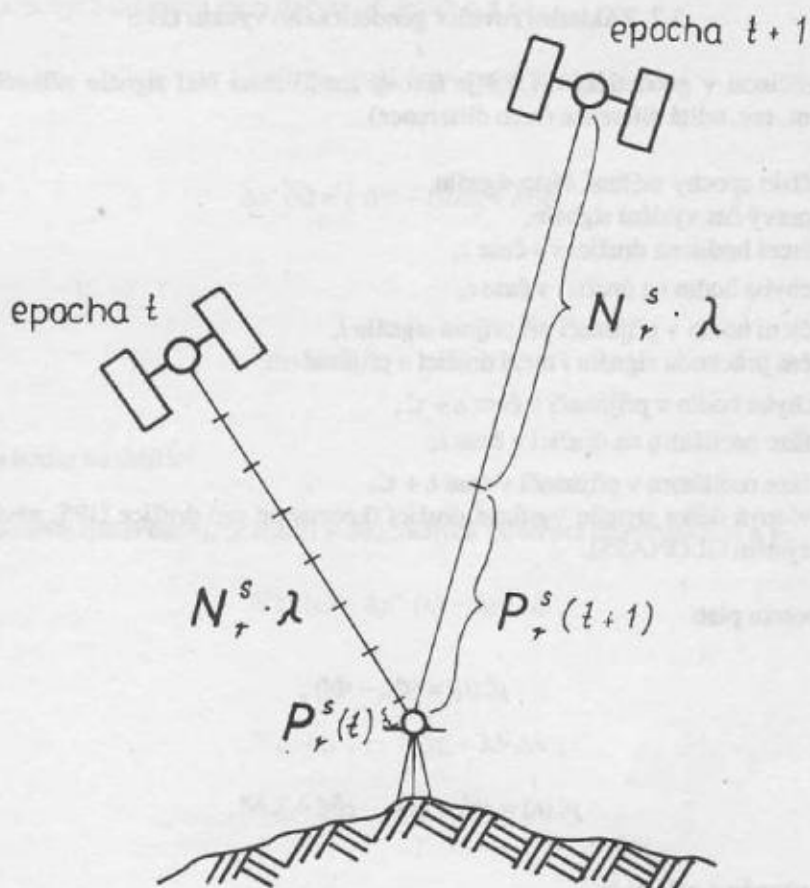
- [11] KARSKÝ, G.: Jak pracuje družicový systém GPS? Geod. a kartogr. Obz., 36, 1990, č. 8.
[12] ŠIMEK, J.: Geodetické využití systému NAVSTAR-GPS a jeho perspektivy. Geod. a kartogr. Obz., 36, 1990, č. 11.

Došlo 2. 12. 1992

5. Využití technologie GPS pro geodetické účely

5.1. Základní princip geodetického využití GPS

Základní myšlenku geodetického využití GPS uvádí zjednodušený případ. Předpokládá se, že měření nejsou ovlivněna žádnými chybami a je měřena přímo fáze signálu přicházejícího od družice. Princip je patrný z obr. 1.



Obr. 1

Zde λ je vlnová délka vyslaného signálu (pro GPS asi 20 cm). Jednotlivé vlny jsou znázorněny úsečkami na spojnici družice - přijímač. Vzdálenost přijímače k družici v čase t je tedy podle obr. 1 dána

$$\rho_r^s(t) = p_r^s(t) + N_r^s \cdot \lambda, \quad (1)$$

kde

$p_r^s(t)$ – přijímačem měřená fáze signálu v čase t ,

N_r^s – počet celých vlnových délek obsažených ve vzdálenosti ρ_r^s nazývaný „ambiguita“.

V tomto čase $t+1$ měří přijímač „úsek“ $p_r^s(t+1)$, čili dokáže určit změnu celého počtu vlnových délek. N_r^s je konstantou (zatím neznámou) pro danou družici. Rovnice (1) se přepíše do tvaru, kde na levé straně bude měřená veličina a na pravé straně členy obsahující neznámé

$$p_r^s(t) = \sqrt{(X^s(t) - X_r)^2 + (Y^s(t) - Y_r)^2 + (Z^s(t) - Z_r)^2} - \lambda N_r^s. \quad (2)$$

Vzdálenost p_r^s je vyjádřena prostřednictvím Pythagorovy věty,
 X^s, Y^s, Z^s - kartézské souřadnice družice,
 X_r, Y_r, Z_r - kartézské souřadnice přijímače.

Souřadnice družice mohou být získány z informace vysílané družicí. Z měření na čtyři družice se sestaví soustava čtyř rovnic o sedmi neznámých (3 neznámé souřadnice přijímače + členy N_r^s pro každou družici). Tuto soustavu nelze jednoznačně řešit. Situace se podstatně změní, bude-li měřeno na tyto čtyři družice např. ve třech epochách. Takto se získá soustava 12 (4 x 3) rovnic o 7 neznámých, která je již jednoznačně řešitelná (při přítomnosti chyb při měření např. metodou nejmenších čtverců).

5.2. Základní rovnice geodetického využití GPS

Základní měřenou veličinou v geodetickém GPS je fázový rozdíl mezi fází signálu přijatého a fází kopie signálu generovaného přijímačem, tzv. nultá diference (zero difference).

Podle označení v [1]:

i	- číslo epochy měření, číslo signálu,
t_i	- pravý čas vyslání signálu,
t_i^s	- čtení hodin na družici s v čase t_i ,
$\delta t_i^s = t_i^s - t_i$	- chyba hodin na družici v čase t_i ,
t_{ri}	- čtení hodin v přijímači při příjmu signálu i ,
τ_{ri}^s	- čas průchodu signálu i mezi družicí a přijímačem,
δt_{ri}^s	- chyba hodin v přijímači v čase $t_i + \tau_{ri}^s$,
Φ_i^s	- fáze oscilátoru na družici v čase t_i ,
Φ_{ri}^s	- fáze oscilátoru v přijímači v čase $t_i + \tau_{ri}^s$,
λ	- vlnová délka signálu vysílaná družicí (konstantní pro družice GPS, závislá na čísle družice pro systém GLONASS).

Pro nultou diferenci potom platí

$$p_r^s(t_i) = (\Phi_{ri}^s - \Phi_i^s), \quad (3)$$

nebo

$$p_r^s(t_i) = c\tau_{ri}^s + c\delta t_{ri}^s - c\delta t_i^s + \lambda N_r^s, \quad (4)$$

kde

N_r^s je opět ambiguita, tj. neznámé celé číslo.

Souřadnice přijímače jsou obsaženy ve členu $c\tau_{ri}^s$

$$c\tau_{ri}^s = |r^s(t_i) - R_r(t_i + c\tau_{ri}^s)| - d_{ri, ion}^s + d_{ri, trop}^s$$

kde

$r^s(t)$	- polohový vektor družice v čase t ,
$R_r(t)$	- polohový vektor přijímače v čase t ,
$d_{ri, ion}^s, d_{ri, trop}^s$	- korekce z vlivu ionosféry, resp. troposféry (viz kapitolu 5.4).

Rovnice podobná rovnici (4) platí i pro měření pseudovzdáleností. Rozdíl spočívá ve členu N_r^s , který u pseudovzdálenosti není přítomen, a v opačném znaménku v korekci z vlivu ionosféry (rozdílá fázová a grupová rychlost v disperzní ionosféře). Rovnice (4) vzhledem k souřadnicím přijímače [obsaženy v $R_r(t)$] se řeší iteracemi.

Rovnice (4) je podobná rovnici (2), která byla odvozena pro zjednodušený případ. Jak je z rovnice (4) patrné, při skutečném měření působí řada chyb, jejichž neuvážením může hrubě zkreslit výslednou polohu. Tyto chyby je možno modelovat pomocí určitých modelů (polynomy vyšších stupňů pro chyby hodin, atmosférické modely atd.) a koeficienty těchto modelů určovat jako neznámé při výpočtu. V geodetické praxi je tento problém řešen tvořením rozdílů rovnice (4) pro různé přijímače, družice či měřické epochy, čímž se vliv podstatné části chyb vyloučí nebo podstatně omezí. Jedná se o tyto difference:

a) **Jednoduchá difference (single difference)**, tj. rozdíl (4) pro dva přijímače r_1 a r_2 .

Pro zjednodušení symboliky zavedeme další symboly,
kde

∇ vyjadřuje rozdíl jednoduchých diferencí pro družice s_1 a s_2 ,

Δ vyjadřuje rozdíl jednoduchých diferencí mezi dvěma přijímači r_1 a r_2 :

$$\Delta p^r(t_i) = (p_{r_1})^r(t_i) - (p_{r_2})^r(t_i),$$

tj.

$$\Delta p^r(t_i) = c \Delta \tau_i^r + cd\Delta t_i + \lambda \Delta N^r,$$

kde

$$\Delta \tau_i^r = (\tau_{r_1})_i^r - (\tau_{r_2})_i^r,$$

$$d\Delta t_i = (dt_{r_1})_i - (dt_{r_2})_i,$$

$$\Delta N^r = (N_{r_1})^r - (N_{r_2})^r.$$

Tím je vyloučena chyba hodin na družici.

b) **Dvojitá difference (double difference)**, tj. rozdíl jednoduchých diferencí pro družice s_1 a s_2 :

$$\nabla \Delta p(t_i) = \Delta p^{s_1}(t_i) - \Delta p^{s_2}(t_i),$$

tj.

$$\nabla \Delta p(t_i) = c \cdot \nabla \Delta \tau_i + \lambda \nabla \Delta N,$$

kde

$$\nabla \Delta \tau_i = \Delta \tau_i^{s_1} - \Delta \tau_i^{s_2},$$

$$\nabla \Delta N = \Delta N^{s_1} - \Delta N^{s_2}.$$

Ve dvojité difference je vyloučena chyba hodin v přijímači.

c) **Trojitá difference (triple difference)**, tj. rozdíl double diferencí pro dvě různé měřické epochy:

$$\nabla \Delta p(t_i, t_j) = \nabla \Delta p(t_i) - \nabla \Delta p(t_j),$$

tj.

$$\nabla \Delta p(t_i, t_j) = c \cdot \nabla \Delta \tau_{i,j},$$

kde

$$\nabla \Delta \tau_{i,j} = \nabla \Delta \tau_i - \nabla \Delta \tau_j.$$

Ve trojité difference je vyloučen člen s ambiguitou.

d) **Jednoduchá delta diference (single delta difference)**, tj. rozdíl jednoduchých diferencí pro dvě různé epochy:

$$\Delta p^s(t_i, t_j) = \Delta p^s(t_i) - \Delta p^s(t_j),$$

tj.

$$\Delta p^s(t_i, t_j) = c \cdot (\Delta \tau^s)_{i,j} + c \cdot (d\Delta t)_{i,j},$$

kde

$$(\Delta \tau^s)_{i,j} = \Delta \tau_i^s - \Delta \tau_j^s,$$

$$(d\Delta t)_{i,j} = d\Delta t_i - d\Delta t_j.$$

U rozdílových metod nejsou jenom vyloučeny chyby v chodu hodin, ale též značně sníženy atmosférické vlivy, vliv SA atd.

Výpočet u firemního softwaru probíhá podle následujícího pořadí:

1) předzpracování dat pomocí „triple difference“; výhodou „triple difference“ je právě nezávislost na členu N ; proto je využita k přibližnému určení základny a odstranění tzv. „cycle slip“, tj. skoků, způsobených přerušáním signálu od družice různými překážkami;

2) výpočet pomocí „double difference“, kdy výsledkem jsou reálná čísla pro členy $\nabla \Delta N$ (ambiguity);

3) přiřazení odpovídajících celých čísel jednotlivým ambiguitám; tato část je nejcitlivějším místem zpracování měření GPS; přiřazením chybného celého čísla ambiguitě je možno přesnost výsledného vektoru značně snížit; v praxi existuje řada postupů pro určení ambiguit, např. viz [5];

4) pokud byla spolehlivě určena odpovídající celá čísla pro členy $\nabla \Delta N$, potom probíhá závěrečný výpočet souřadnicových rozdílů pomocí „double difference“, kde tyto členy vystupují jako známé hodnoty. Pokud není možno z nějakého důvodu spolehlivě „zaokrouhlit“ ambiguity na celá čísla (velký měřický šum, krátká doba měření, velký počet „cycle slip“, potom za výsledný vektor je brán výsledek výpočtu z bodu 2, tj. s reálnými ambiguitami.

Pro dlouhé základny asi 100 km, kdy není možno spolehlivě odstranit „cycle slip“, je vhodné použít jenom řešení z „triple difference“.

5.3. Metody měření při geodetických aplikacích

V této kapitole budou popsány základní metody měření při geodetických aplikacích a základní terminologie používaná v GPS. Východiskem jsou dvě základní dvojice [5]



absolutní - souřadnice jsou dány v geocentrickém systému WGS 84,

relativní - souřadnice jsou vztaheny k určitému referenčnímu bodu,

statická - přijímač se při sběru dat nepohybuje,

kinematická - některé přijímače se při sběru dat mohou přesunovat.

Kombinací členů z prvního rámečku se členy z druhého rámečku dostáváme 4 základní kombinace měření:

absolutní - statická - metoda určení absolutních souřadnic jednoho bodu, kdy anténa se během měření nepohybuje; výhodou je možnost průměrování měření z určitého časového intervalu, používá se zvláště v navigačních aplikacích;

absolutní - kinematická - metoda používaná při klasické navigaci pohybujících se objektů;

relativní - statická - základní metoda pro geodetické aplikace; souřadnice jedné stanice jsou předem známy, souřadnice druhé stanice jsou určovány měřením GPS vzhledem k daným souřadnicím první stanice;

relativní - kinematická - metoda používaná při určování dráhy pohybujícího se objektu, např. určení souřadnic středu objektu komory při fotogrammetrických aplikacích; měření jsou prováděna současně dvěma přijímači, přičemž jeden je umístěn na známém bodě a druhý se pohybuje v okolí tohoto bodu; v porovnání s absolutní - kinematickou metodou je tato metoda přesnější vzhledem ke schopnosti eliminace chyb při použití dat z referenční stanice.

V absolutních metodách jsou převážně využívána kódová měření. Fázových měření je využíváno výjimečně, např. u tzv. „pseudorange-smoothing“ pro filtraci kódových měření.

Použití pouhých kódových měření při relativních metodách vede k tzv. diferenční navigaci, viz např. [8]. Pro přesné geodetické práce se využívají relativní metody založené na fázových měřeních. Kódových měření se zde využívá pro získání efemerid družic a jako pomocných měření při určování ambiguit. Proto budou dále popisovány pouze metody **relativní**. V geodetických aplikacích jsou používány 4 základní metody, které lze rozdělit do dvou skupin:

Metody měření, při kterých tzv. ambiguita vystupuje jako neznámá veličina:

Klasická statická metoda - jeden přijímač je umístěn na bodě o předem známých souřadnicích a další přijímač na bodě určovaném. Konají se současná pozorování na obou bodech, přičemž doba pozorování je závislá na délce základny, počtu viditelných družic a podmínkách měření a trvá přibližně jednu až dvě hodiny. Takto dlouhá doba pozorování je u této metody nezbytná pro spolehlivé určení ambiguit (změní se geometrická konstelace družic a základny). Dlouhá doba měření poskytuje výhody i v odstranění některých dlouhoperiodických chyb ("multipath", pohyb fázového centra atd.). Z tohoto důvodu bývá používána v geodetických pracích vyžadujících vysokou přesnost (měření v geodetických sítích, geodynamická měření atd.).

Pseudostatická metoda - jeden přijímač je umístěn na bodě o známých souřadnicích, druhý vykonává (společně s prvním přijímačem) měření asi 10 minut v závislosti na počtu viditelných družic a délce základny. Další měření na tomto určovaném bodě (asi 10 minut) se vykonají po jedné či více hodinách po změně geometrické konstelace družic a základny. V době mezi těmito měřeními je možno analogicky určovat souřadnice dalších bodů. Při čtyřech určovaných bodech (body č. 1 až 4) vykoná druhý přijímač měření v pořadí bod č. 1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4. První přijímač po celou tuto dobu provádí měření na souřadnicově známém bodě. Po dobu přesunu **nemusí** druhý přijímač provádět měření na družice. Tato metoda je při malých lokalitách efektivnější než klasická statická metoda. Při větších lokalitách začínají převyšovat nevýhody způsobené vyššími dopravními nároky této metody. Některé starší softwarové produkty, např. TRIMVEC verze D (firma TRIMBLE), vyžadovaly stejné družice a stejnou výšku antény při opakovaném měření na bodě, čímž se efektivnost metody snižovala (nutnost návratu na bod při stejných družicích). U novějších verzí je tento nedostatek již odstraněn.

Rychlá statická metoda (rapid static technique) - tato metoda je analogická klasické metodě, ale vzhledem k matematickým způsobům zpracování (použitím statistických hypotéz při určování ambiguit) je možno pro krátké vzdálenosti asi do 15 km určit ambiguitu, a tím i vektor základny z měření trvajících pouze několik minut. Tato metoda je velice perspektivní a v kombinaci s pseudokinematickou metodou si začíná nalézat uplatnění například i při měření v katastru. Zásahu na zavedení této metody má švýcarská firma Leica, jejíž výzkumní pracovníci ve spolupráci s univerzitou v Bernu tuto metodu vyvinuli [1], [3]. V současné době je přebírána dalšími firmami, např. Trimble, Ashtech atd.

Jak bylo ale výše uvedeno, pro měření velmi vysoké přesnosti a pro měření dlouhých základen zůstává role klasické statické metody neotřesená.

Metoda, při níž jsou ambiguita v výchozí základně známy a za předpokladu kontinuálního měření na družice při přesunu na neznámý bod jsou přenášeny na tento bod:

Pseudokinematická metoda (někdy též metoda stop and go): První přijímač je opět umístěn na souřadnicově známém bodě, např. A. Druhý začíná měřit na bodě B asi 5 až 10 minut (ambiguita pro základnu AB jsou známy, viz dále). Poté se druhý přijímač přesune na další určovaný bod. Po dobu přesunu **musí být zabezpečena kontinuální viditelnost na nejméně 4 družice**. Na tomto neznámém bodě provede měření asi 1 až 2 minuty a přesune se na další bod atd. V případě přerušování příjmu signálu pro budovy, porost je nutno se vrátit na předchozí určený bod a měření opakovat. Oproti pseudostatické metodě postačuje pouze jedna observační relace na bodě, ale při přesunu je tedy vyžadován příjem signálu. Tato metoda je velmi praktická při zaměřování odkrytých lokalit, kde je zabezpečen stálý příjem signálu. Přerušování příjmu signálu, a tudíž nutnost návratu na předchozí bod mohou tuto metodu učinit neefektivní. Jak již bylo řečeno, tato metoda vyžaduje výchozí souřadnicově známou základnu AB. Ta může být získána např. ze známých souřadnic bodů A a B (pokud byly dříve určeny) pomocí klasické statické metody či pomocí tzv. techniky výměny antén ("antena swap"). Při této technice měří (asi 5 minut) první přijímač na bodě A a druhý na bodě B vzdáleném od bodu A několik metrů. Poté se antény vymění, tzn. první přijímač měří na bodě B a druhý na bodě A (opět asi 5 minut). Následuje závěrečná výměna antén a měření.

Praktické zkušenosti s těmito metodami (vyjma rychlé statické, kterou přijímač Geotracer 100 a jeho softwarové vybavení neumožňují) včetně výsledků testovacích měření vykonaných ve VTOPÚ jsou uvedeny v [18].

5.4. Přesnost relativního GPS

Jak již bylo uvedeno, teoretická přesnost v měření fáze nosné vlny se pohybuje okolo 1 mm. Jaká je však reálná přesnost v určení základny?

Chybu v určení základny lze popsat vztahem podle [7]

$$\sigma_{1,2}^2 = a^2 + b^2 \cdot s^2, \quad (5)$$

kde

$s = |R_2 - R_1| = \sqrt{(\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2)}$ je délka základny $\sigma_{1,2}^2 = \sigma_{\Delta X}^2 + \sigma_{\Delta Y}^2 + \sigma_{\Delta Z}^2$,

σ^2 – střední kvadratická odchylka,

X, Y, Z – geocentrické kartézské souřadnice.

Člen a v rovnici (5) v sobě zahrnuje chyby pro danou základnu, které nezávisí na její délce, zejména chyby v centraci, v určení výšky antény, v pohybu fázového centra antény, dále chybu způsobenou odrazem signálu od reflexních ploch nacházejících se poblíž antény (tzv. multipath) a chybu z diferenciální troposféry.

Člen b zahrnuje chyby způsobené atmosférou (tj. troposférickou a ionosférickou refrakci) a nepřesnou znalostí polohy družic. Podrobný rozbor těchto chyb i s praktickými příklady bude uveden v [11].

Stručný popis chyb a odhad jejich vlivu:

5.4.1. Chyby nezávislé na délce základny - člen a

a) Chyba z centrace a určování výšky antény

Tato chyba je známa z klasických geodetických měření a pohybuje se okolo 1 až 3 mm v závislosti na značení bodu a metodě centrace. Při přesných testovacích měřeních či při geodynamických měřeních je vhodné použít metodu nucené centrace a tuto chybu eliminovat.

b) Chyba z pohybu fázového centra antény

Měření samotné je vztaheno k tzv. fázovému centru antény, tj. středu poloměru křivosti ekvifázových křivek. Vzhledem k výrobním nepřesnostem nejsou středy křivosti totožné pro všechny části této křivky, tzn., že poloha fázového centra závisí na úhlu, pod kterým pozorujeme družici, přičemž se při změně konstelace družic mění. Toto fázové centrum není tedy obecně totožné s geometrickým centrem antény. Umístění, příp. změna, fázového centra antény závisí na typu antény a může nabývat hodnot až několika centimetrů. Pro velmi přesné práce je tudíž vhodné kalibrovat antény na kalibrační základně a centraci a výšku antény vztáhnout k určenému fázovému centru. U nejnověji vyráběných antén je většinou zabezpečena vysoká míra totožnosti geometrického a fázového centra. Například rozdíl mezi geometrickým a fázovým centrem u antén přijímačů GEOTRACER 100 (antény TRIMBLE SST) nepřesáhl hodnotu několika milimetrů a nebyl statisticky významný [18]. Při používání antén vyrobených stejným výrobcem je možno předpokládat systematické nepřesnosti v ekvifázových křivkách. Při stejné orientaci antén na obou koncích základny se tato chyba při rozdílových metodách téměř eliminuje.

c) Chyba „multipath“

Chyba multipath je způsobena interferencí dvou či více signálů vysílaných stejným zdrojem, ale šířících se rozdílnými cestami. Rozdílné cesty mohou být způsobeny buď odrazem od družice, tzv. „satellite multipath“, nebo odrazem od reflexní plochy umístěné v blízkosti antény, tzv. „receiver multipath“. Pro krátké základny v lokálních sítích bude efekt „satellite multipath“ shodný pro oba přijímače a vyloučí se rozdílovou metodou zpracování. Fázový posun způsobený „receiver multipath“ může dosáhnout hodnot od několika milimetrů až do několika centimetrů s periodou od několika minut do několika hodin, závisící na geometrii anténa - reflexní plocha - družice. Multipath může být velmi nepříjemná chyba zvláště při rychlé statické a pseudokinematické metodě, kde vzhledem ke krátkým pozorovacím dobám nemůže být vyloučena měřením delším než perioda této chyby. Může být odhalena například při současném měření dvou základen vycházejících ze společného bodu a ze značné korelace reziduí obou základen. Při měření jedné základny může pro odhalení této chyby posloužit analýza výsledků měření na obou frekvencích, L1 a L2. Jediným spolehlivým vyloučením této chyby je odstranění reflexních překážek z blízkosti antény.

Blízkost vodivého materiálu způsobuje chybu podobnou pohybu fázového centra antény (tzv. „imaging“). Tato chyba nebyla dosud podrobněji analyzována.

Vliv diferenciální troposféry

Šíření signálu vzhledem k horizontálnímu gradientu tlaku, teploty a vlhkosti a výškovým rozdílům mezi stanicemi neprobíhá v homogenním prostředí. Zpoždění signálu v troposféře (viz dále), tzv. troposférickou refrakci, je možno modelovat pomocí různých modelů atmosféry (Saastamoinenův, Hopfieldův, Mariniho atd.). V lokálních sítích s velkými převýšeními a rozdílnými meteorologickými podmínkami (údolí versus hřeben) však modely nepostihují realitu a neuvážení těchto meteorologických podmínek způsobí systematickou chybu v určení výšky až několik centimetrů. Naopak, při měření v lokální síti, kde nejsou extrémní klimatické rozdíly, použijeme ve výpočtu přímo měřená meteorologická data na každém bodě sítě, potom chyby v odečtení a chyby z kalibrace meteorologických přístrojů vytvoří neodpovídající „mode-

lovou“ troposféru a způsobí výše uvedenou systematickou chybu v určení výšky. V naší praxi se pro lokální sítě osvědčilo nezavádět při výpočtu základen meteorologická data.

Stochastické metody, které byly úspěšně použity při analýzách měření VLBI (dlouhozákladnové interferometrie), se stávají nyní předmětem zájmu i v GPS. Dá se předpokládat, že při úplné konstelaci systému GPS, kdy bude možný nepřetržitý příjem signálů z více družic GPS, bude např. Kalmanova filtrace dobrým pomocníkem při redukci atmosférických vlivů.

5.4.2. Chyby závislé na délce základny - člen b

Vliv troposférické refrakce

Na rozdíl od diferenciální troposféry, kde se projevují vlivy meteorologických gradientů dané lokality, se jedná o chybu způsobenou celou troposférou (konstantní chyba na obou koncích základny), tj. částí atmosféry sahající do výšky asi 50 km. Zpoždění signálu v troposféře nezávisí na vlnové délce signálu, a nelze jej tudíž eliminovat měřením na obou frekvencích. V praxi je proto používáno modelů troposféry (viz výše). V případě příčně homogenní troposféry lze měřítkovou chybu způsobenou troposférickou refrakcí odhadnout na asi $0,5 \cdot 10^{-6}$ či menší.

Vliv ionosférické refrakce

Ionosféra je část atmosféry, rozprostírající se přibližně od výšky 50 km do výšky 1000 km a obsahující volné ionty. Nekorigovaná ionosférická refrakce je jedním z hlavních faktorů limitujících přesnost jednofrekvenčních přijímačů. Vzhledem k disperznímu charakteru ionosférické refrakce (tj. závislosti zpoždění signálu v ionosféře na jeho frekvenci) je možno vliv ionosféry eliminovat pomocí lineární kombinace měření na obou frekvencích, L1 a L2 (označení L1/L2). Jelikož pro přesná měření jsou k dispozici dvoufrekvenční přijímače (v ČSFR je v současné době - listopad 92 - 12 dvoufrekvenčních přijímačů a pouze 2 přijímače jednofrekvenční), je často tento efekt opomíjen. Problém je poněkud komplikovanější, protože:

- 1) jednofrekvenční přijímače jsou téměř o polovinu lacinější než přijímače dvoufrekvenční;
- 2) vzhledem k zákonu hromadění chyb a většímu vlivu multipath při L1/L2 kombinaci je tato chyba zatížena asi 3krát větším šumem než samotné měření na L1;
- 3) fázové centrum pro L1 je obecně odlišné od fázového centra pro L2.

Zvláště bod 2 je třeba při zpracování měření GPS brát v úvahu. Automatické používání kombinace L1/L2 pro krátké základny (asi do 15 km) může dávat horší výsledky než použití měření pouze na L1 (vliv ionosféry je pro krátké základny odstraněn rozdílovým způsobem zpracování, avšak nevýhody způsobené více „zašuměným“ signálem na L1/L2 se zvýrazní).

Pokud je při měření k dispozici alespoň jeden dvoufrekvenční přijímač, je možno „měření na L2“ u jednofrekvenčních přijímačů modelovat softwarově, např. softwarem TRIMVEC pro přijímače Trimble.

Měření na obou frekvencích jsou na druhé straně vzhledem k určité nadbytečnosti a možnosti dalších vhodných kombinací těchto měření velmi vhodná při řešení základního problému v GPS, tj. při určování ambiguity.

Při nemodelování ionosféry a použití měření pouze na L1 dosahuje měřítková chyba hodnot od $0,2 \cdot 10^{-6}$ až po $7 \cdot 10^{-6}$ v závislosti na sluneční aktivitě, denní době, zeměpisné šířce atd. Modelování ionosféry pomocí modelů, např. Klobucharova či Bentova, a použití informací o ionosféře vysílaných družicemi může zmírnit tuto chybu asi o 75 %, tj. na $2 \cdot 10^{-6}$. S lokálními kalibračními technikami je možno zmírnit tento vliv až na $1 \cdot 10^{-6}$. Při měření na L1/L2 je efekt ionosféry eliminován (resp. eliminován jeho první hlavní člen), ale je nutno počítat s větším měřítkovým šumem.

Chyby v poloze družice

Vliv nepřesné znalosti polohy družice na přesnost určení vektoru základny je dán známým vztahem

$$\frac{|db|}{|b|} = \frac{|dr|}{|r|},$$

kde

- b – vektor základny,
- db – vektor chyb ve složkách základny,
- r – vektor přijímač - družice,
- dr – vektor chyb v poloze družice.

Poněkud optimističtější vztah uvedený v [19] uvažuje pouze chybu v délce základny.

Při využití vysílaných efemerid C/A (přesnost asi 10 m, při SA asi 40 až 50 m) platí

$$\frac{|db|}{|b|} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ až } 2,5 \cdot 10^{-6}.$$

Přesnost tzv. přesných efemerid (P) je přibližně totožná s přesností vysílaných efemerid neovlivněných SA. Pro vysoce přesné práce a při zpracování dlouhých základen je vhodné využít efemerid přesnějších, určených z celosvětové sítě stanic GPS, využívajících vedle kódových měření i měření fázová. Další možností je zpřesňování informací o poloze družic GPS během samotného výpočtu základen.

Matematickou, nikoli fyzikální podstatu má chyba způsobená nepřesnou znalostí souřadnic výchozího bodu. Tato nepřesnost se plně promítne do souřadnic koncového bodu základny a současně bude touto nepřesností ovlivněn samotný vektor základny. Tuto chybu je možno odstranit např. určením přibližné polohy výchozího bodu pomocí pseudovzdáleností.

5.4.3. Přesnost základen měřených pomocí GPS

Vzhledem k vlivu výše uvedených chyb pak pro jednotlivé členy platí:

$a \approx \langle 5, 30 \rangle$ mm – závisí na diferenciální troposféře,

$b \approx \langle 0,1, 2 \cdot 10^{-6} \rangle$ – závisí převážně na typu použitých efemerid a na vlivu ionosféry.

Z výše uvedeného vyplývá, že základnu dlouhou 100 km je možno technologií GPS změřit s přesností asi 5 cm. Základny, pro které se podaří spolehlivě určit celý počet vlnových délek, budou obecně přesnější než základny s reálnými ambiguitami (při dvojí diferenci).

5.5. Využití GPS v geodetických základech a v běžné geodetické praxi

V běžné geodetické praxi je řešena úloha určení souřadnic neznámého bodu. Podmínkou je, že v okolí tohoto bodu jsou k dispozici body, jejichž souřadnice jsou známy v lokálním systému (národním systému), tj. systému, ve kterém chceme určit souřadnice neznámého bodu:

a) Je znám transformační vztah mezi lokálním systémem a geocentrickým systémem.

Měřením pomocí jedné z metod uvedených v kapitole 5.3 určíme souřadnicové rozdíly $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{WGS 84}$ mezi známým bodem a bodem určovaným. Tyto souřadnicové rozdíly se převedou pomocí transformačního vztahu na souřadnicové rozdíly $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{lok}$ v lokálním souřadnicovém systému. Tyto souřadnicové rozdíly se podle potřeby převedou na rozdíly geodetických souřadnic $\Delta B, \Delta L, \Delta H$, tj. elipsoidických šířek, délek a výšek. Pokud je znám průběh kvazigeoidu, potom se opraví H o rozdíl ve výškách kvazigeoidu $\Delta \zeta$. Normální výška H^a neznámého bodu je pak $H^a = H - \Delta \zeta$ a ze známých souřadnic výchozího bodu a souřadnicových rozdílů se určí souřadnice bodu určovaného. V případě nadbytečného počtu měření je možno použít např. metody nejmenších čtverců.

b) Není znám transformační vztah mezi lokálním systémem a geocentrickým systémem, v němž probíhá měření GPS.

V tomto případě je nutno zaměřit v dané lokalitě síť identických bodů, tj. bodů o známých souřadnicích v obou systémech. Pomocí souřadnic těchto identických bodů je možno určit lokální transformační klíč a dále postupovat podle bodu a). Pokud není v dané lokalitě znám průběh kvazigeoidu, je možné pro malá území asi 10 x 10 km použít místo elipsoidických výšek v lokálním systému výšky normální. Při transformaci jsou poté určovány přímo rozdíly normálních výšek (viz kapitolu 5.6). Tohoto postupu bylo použito například při určování vlčovicových bodů pro analytickou aerotriangulaci ve VTOPÚ Dobruška [18].

Oproti klasickým geodetickým měřením není při měření GPS nutná viditelnost mezi body. Měření je možné provádět za téměř všech povětrnostních podmínek (mlha, déšť, sněžení), přičemž je vyžadována pouze viditelnost na družice.

Vzhledem k vysoké přesnosti základen GPS i pro velké vzdálenosti je možno s výhodou použít GPS i v geodetických základech, tj. pro kontrolu souřadnic klasických sítí a při jejich zhušťování. V blízké době budou pro většinu trigonometrických bodů (využitelných pro GPS) k dispozici jak souřadnice v národním systému, tak v systému WGS 84. Tyto údaje je možno využít například pro analýzu deformací sítí. Po transformaci do jednoho systému je možno provést analýzu náhodnosti odchylek těchto souřadnic pomocí chí-kvadrát testu

$$\Delta x^T C_{\Delta x}^{-1} \Delta x \leq \xi \chi_{\mu, 1-\alpha}^2,$$

kde Δx je vektor, skládající se z odchylek mezi souřadnicemi na „identických bodech“, $C_{\Delta x}$ je matice vzniklá součtem kovariančních matic souřadnic v obou systémech (po transformaci do jednoho systému), $\xi \chi_{\mu, 1-\alpha}^2$ je hodnota chí-kvadrát rozdělení s μ stupni volnosti na hladině významnosti α . Nesplnění tohoto kritéria vypovídá, že rozdíl mezi oběma systémy

není náhodný s pravděpodobností α a vzhledem k předpokládané kvalitě sítě GPS je pravděpodobně způsoben deformacemi lokální sítě (pozn.: je vhodné testovat zvlášť horizontální a vertikální složku - role kvazigeoidu). Pro síť v lokálním systému lze také spočítat tenzor deformace atd. Podrobnosti deformační analýzy přesahují rozsah tohoto příspěvku a nebudou dále diskutovány, viz [18].

5.5.1. Kombinace klasických terestrických měření s měřeními GPS

Při praktickém používání GPS je nutno řešit otázku kombinace klasických terestrických měření (délková, úhlová měření atd.) s měřeními GPS. Tuto kombinaci lze provádět klasickou metodou nejmenších čtverců nebo metodou tzv. integrované geodézie, která úlohu řeší jako komplexní problém, kde vstupními mohou být i tíhová či astronomická měření. Funkcionální model integrované geodézie může být zapsán v maticovém vztahu

$$l = Ax + Rt + n, \quad (6)$$

kde

- l – vektor pozorování (vektory GPS, délková a úhlová měření, tíhová, astronomická měření atd.),
- x – vektor neznámých,
- A – matice koeficientů pro tyto neznámé (parciální derivace l podle x),
- t – tzv. signální vektor (vektor signálu),
- R – matice koeficientů pro poruchový potenciál a jeho derivace,
- n – vektor bílého šumu.

Vektor x se může např. skládat z následujících typů neznámých

$$x = x(B_1, L_1, H_1^a, \dots, B_n, L_n, H_n^a, wx, wy, wz, k, o, r),$$

kde

- B, L – elipsoidická šířka a délka určovaných bodů,
- H – normální výška,
- wx, wy, wz – neznámé rotační parametry,
- k – měřítkový faktor,
- o – orientační neznámé,
- r – refrakční neznámé.

Vektor t se skládá:

$$t = t(T; \xi, \eta; \Delta g),$$

kde

- T – poruchový potenciál,
- ξ, η – složky tížnicové odchylky,
- Δg – tíhové anomálie.

Maticová rovnice (6) je řešena za podmínky

$$n^T C_{n,n}^{-1} \cdot n + t^T K_{t,t}^{-1} t = \min., \quad (7)$$

kde

- $C_{n,n}$ – kovarianční matice měření,
- $K_{t,t}$ – kovarianční matice signálu.

Volba matice $K_{t,t}$ je citlivou záležitostí a je jí nutno věnovat zvýšenou pozornost. Chybně zvolená matice $K_{t,t}$ může vést až k nestabilitě řešení, viz [10]. Výsledné rovnice řešící soustavu (6) za podmínky (7) jsou uvedeny např. v [13].

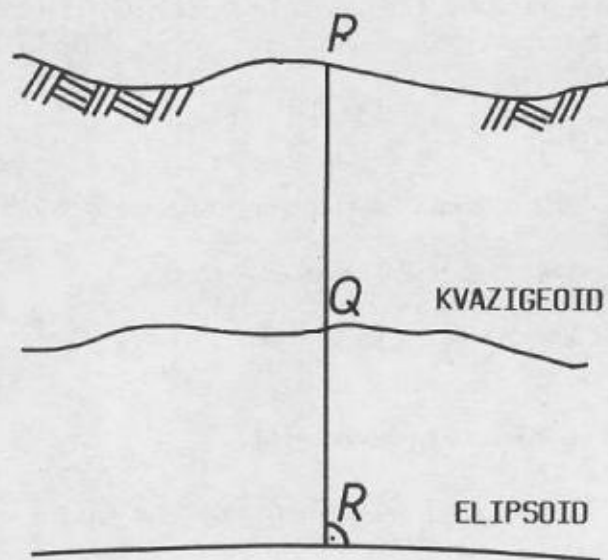
5.6. Určování výšek pomocí GPS a role kvazigeoidu

Znalost přesného průběhu kvazigeoidu je v technologiích GPS nezbytná ze dvou hlavních důvodů:

- a) pro určení transformačního vztahu mezi lokálním systémem a systémem WGS 84;
 b) pro určování výšek pomocí GPS.

ad a) Pro určení transformačního vztahu je nutno znát kartézské souřadnice bodů v obou systémech, což vyžaduje znalost elipsoidické výšky, čili je nutno „opravit“ normální výšku H o výšku kvazigeoidu, tj. $H = H^a + \zeta$ (viz obr. 2).

Poznámka: Při výpočtu lokálních transformačních klíčů pro malá území asi 10 x 10 km, kde můžeme předpokládat lineární průběh kvazigeoidu, je možno použít místo elipsoidických výšek přímo výšky normální. Náklon kvazigeoidu v dané oblasti postihnou dva rotační parametry a absolutní výšku kvazigeoidu postihne měřítkový faktor.



Obr. 2

- $PR = H$ – elipsoidická výška bodu P ,
 $PQ = H^a$ – normální výška bodu P ,
 $QR = \zeta$ – výška kvazigeoidu pro bod P .

ad b) Vzhledem k vysoké přesnosti určování rozdílů elipsoidických výšek je možno využít měření GPS pro kontrolu přesnosti nivelačních sítí či určování výšek bodů nových. Výšky H^a používané v praxi nejsou však vztaženy k ploše elipsoidu, nýbrž k ploše kvazigeoidu, a je tudíž nutno opravit měřený rozdíl elipsoidických výšek ΔH o rozdíl výšek kvazigeoidu:

$$\Delta H^a = \Delta H - \Delta \zeta.$$

Vzhledem k výše uvedené přesnosti měření GPS je kladen na určení převýšení kvazigeoidu vysoký požadavek.

Pro určení výšek kvazigeoidu je možno použít řady metod:

- astrogravimetrickou nivelaci podle Moloděnského [14],
- klasickou numerickou integraci Stokesova integrálu s Moloděnského korekčními členy [4],
- rychlou Fourierovu transformaci [9],
- kombinované řešení (kolokace MNC) [13] atd.

Stručně o výhodách a nevýhodách jednotlivých metod je pojednáno např. v [17].

Na druhé straně kombinace nivelace a měření GPS může poskytnout přesné informace o výškách kvazigeoidu v diskretních bodech a úlohu určení kvazigeoidu je možno chápat jako úlohu interpolace takto určeného „diskretního“ kvazigeoidu do dalších bodů. Jako doplňující informace mohou sloužit tíhová data či astronomická měření [10].

V současné době probíhají teoretické a programátorské práce na určení „přesného kvazigeoidu“ ve VÚGTK Zdiby a VTOPÚ Dobruška. Ve VTOPÚ Dobruška je v současné době zatím k dispozici program GEOHARM, který umožňuje počítat geoid pomocí modelů gravitačního pole Země vysokých stupňů, a program GEOSTOK, který vedle modelů

gravitačního pole Země využívá i středních hodnot tíhových anomálií. Program GEOSTOK řeší Stokesův integrál v Ostachově - Meisslově či Moloděnského modifikaci.

5.7. Další aplikace GPS

Vedle aplikací GPS v geodetických základech a při budování lokálních sítí je nutno připomenout další možné aplikace této vysoce perspektivní technologie. Jedná se zejména o:

- určování souřadnic objektu komory při letecké fotogrametrii, čímž je možno výrazně snížit náklady na dosud nutné zaměřování vřícovacích bodů; řada geodetických přijímačů GPS (Trimble, Ashtech atd.) je v současné době uzpůsobena tomuto použití (pps výstup, interval měření 0,5 s), viz např. [2];

- začlenění metod GPS do sběru dat pro GIS (Geografický Informační Systém), kde zejména kinematické metody mohou sehrát významnou úlohu;

- sledování globálních a kontinentálních geodynamických jevů (určování rotačních parametrů, sledování pohybu zemských desek atd.).

Literatura:

- [1] BEUTLER, G. - BAUERSIMA, I. - FANKHAUSER, S.: GPS software principles, concepts, and experiences. In: Proceedings of the International Seminar on GPS in Central Europe. Péc 1991.
- [2] ENGELS, Y.: GPS for photogrammetry. In: Proceedings of the 43rd Photogrammetric Week. Stuttgart 1991.
- [3] FREI, E.: Rapid Differential Positioning with the Global Positioning System (GPS). [Disertace.] Bern 1991.
- [4] HEISKANEN, W. - MORITZ, H.: Physical Geodesy. San Francisco 1967.
- [5] HOFMANN-WELLENHOF, B. - LICHTENEGGER, H.: Methods to Resolve GPS Phase Ambiguities. In.: 10th General Assembly of IUGG. Vídeň 1991.
- [6] HOFMANN-WELLENHOF, B.: The concept of static and kinematic GPS and look into the future. In: Supplement of the International Seminar on GPS in Central Europe. Péc 1991.
- [7] JANES: Error budget in relative GPS. Surveying and Mapping, 1991.
- [8] JONÁŠ, V.: Družicové navigační systémy. Referát na semináři VVLŠ v Košicích. Košice 1991.
- [9] JONÁŠ, V.: Rychlá Fourierova transformace a její aplikace při určování kvazigeoidu. In: Teoretické a praktické aspekty určování lokálního kvazigeoidu. Dobruška 1991.
- [10] JONÁŠ, V.: Geoid from GPS Measurements and Gravity Data Using Harmonic Kernel Functions. In: Proceeding from the First International Workshop about Geoid in Central Europe. Praha 1992.
- [11] JONÁŠ, V.: Atmosférické vlivy a další chyby v relativním GPS. Geod. a kartogr. Obz., 39, 1993. - V tisku.
- [12] KARSKÝ, G.: Jak pracuje družicový systém GPS? Geod. a kartogr. Obz., 36, 1990, č. 8.
- [13] MORITZ, H.: Advanced Physical Geodesy. Karlsruhe 1980.
- [14] PICK, M. - PÍCHA, J. - VYSKOČIL, V.: Úvod ke studiu tíhového pole Země. Praha, Academia 1973.
- [15] SLEDZINSKI, J. a kol: Reports on GPS Works Performed at the Institute of Geodesy and Geodetical Astronomy. In: Reports on Geodesy. Warsaw, Warsaw University of Technology 1990.
- [16] ŠIMEK, J.: Geodetické využití systému NAVSTAR-GPS a jeho perspektivy. Geod. a kartogr. Obz., 36, 1990, č. 11.
- [17] ŠIMEK, J.: Podrobné plochy kvazigeoidu - jejich vytváření a přesnost. In: Teoretické a praktické aspekty určování lokálního kvazigeoidu. Dobruška 1991.
- [18] TŮMA, M. - JONÁŠ, V. - MATONOHA, J.: Zavádění technologie GPS v TS ČSA. [Výzkumná zpráva.] Dobruška, VTOPÚ 1992.
- [19] ZIELINSKI, J.: GPS baseline error caused by the orbit uncertainty. Ma. geod., 1989, s. 117 - 124.

Došlo 25. 11. 1992

6. Využití systému GPS v navigaci a TGZ

6.1. Navigace pohyblivých objektů

Znalost navigačních prvků (polohy, rychlosti a směru pohybu) pohyblivých objektů, jako letounů, lodí, dopravních prostředků apod., je jedním ze základních předpokladů a nezbytnou podmínkou jejich navigace. Navigace pohyblivých objektů tedy vyžaduje, aby byly pokud možno v co nejkratších časových intervalech opakovaně poskytovány věrohodné navigační informace v reálném čase, zejména o jejich poloze, které jsou nezbytné pro jejich navigaci do určených prostor či na stanovené cíle. Tento požadavek splňuje systém GPS-NAVSTAR, umožňující navigaci objektů s využitím družic GPS. Systém GPS-NAVSTAR je prvním navigačním systémem, který je aplikovatelný i pro navigaci rychle se pohybujících objektů včetně družic a raket, což doposud jiné navigační systémy, např. TRANSIT, neumožňovaly a neumožňují.

Cílem a úkolem navigace je poskytovat časté a věrohodné informace o poloze, případně rychlosti a směru pohybu objektů, tj. lidí, dopravních či jiných prostředků a zařízení, a pokud možno bezpečně a optimálně je vést (navigovat) z místa určení do stanoveného cíle. Jinak řečeno, korigovat polohové odchylky, které jsou dány rozdíly mezi stanovenou (plánovanou) a okamžitou dráhou pohybujícího se objektu. Úspěšnost navigace je podmíněna nejen rychlostí poskytování navigačních informací o navigovaném objektu, ale i četností jejich obnovy. Rychlost obnovy navigačních informací bude zpravidla stanovena uživatelem v závislosti na rychlosti navigovaného objektu.

Je nutné podotknout, že určujícím požadavkem pro navigaci rychle se pohybujících objektů bude rychlost a četnost poskytování navigačních informací, nikoliv znalost přesných prvků navigace. Rychlý pohyb navigovaného objektu způsobí v důsledku působení rušivých vlivů větší odchylky od správných parametrů dráhy, a tudíž vyžaduje rychlejší reakce na tyto změny.

Velkou předností družicového navigačního systému GPS-NAVSTAR vedle shora uvedených skutečností je, že zabezpečuje:

- navigaci v libovolném místě na Zemi a v jejím okolí;
- autonomní určování doplňkových navigačních prvků;
- možnost navigace v kteroukoliv denní či noční dobu;
- odolnost systému vůči případnému rušení;
- navigaci různých druhů objektů pohybujících se různými rychlostmi.

6.2. Určování navigačních prvků s využitím systému GPS

Určování navigačních prvků s využitím systému GPS je možné realizovat početně na základě známých informací o poloze družic GPS získaných z přijímaných družicových signálů a měřených veličin (pseudovzdáleností, fází nosné vlny družicového signálu, případně jiných). Postup určení navigačních prvků s využitím systému GPS lze rozdělit do následujících etap:

- a) měření navigačních veličin (vzdáleností družice - přijímač);
- b) určení okamžité polohy uživatele, rychlosti, směru jeho pohybu v družicovém navigačním systému řešením soustavy složitých nelineárních rovnic obsahujících:
 - neznámé veličiny (souřadnice bodů uživatele a jejich časové změny),
 - známé měřené veličiny;
- c) transformace určených souřadnic polohy uživatele do souřadnicového systému užívaného uživatelem;
- d) výpočet dalších požadovaných prvků (azimutů, vzdáleností, sklonů apod.) z vlastních určených souřadnic a známých souřadnic cílového bodu.

Určování navigačních prvků (polohy, rychlosti, vzdáleností a jejich azimutů, času apod.) je závislé vedle znalosti parametrů dráhy družic (efemerid) a měřených veličin na typu užívaného přijímače GPS a jeho softwarovém vybavení, jež mohou případně rozšířit možnosti využití navigačního systému GPS uživatelem. Protože určení polohy družice, jejíž pohyb se děje v gravitačním poli Země a na kterou působí další síly, jako např. přitažlivost Měsíce a dalších planet, odpor atmosféry, zemské slapy, relativistické efekty apod., je značně složité, není účelné je zde uvádět. Podrobnější informace lze získat v např. [1].

6.2.1. Určení polohy uživatele

Souřadnice polohy uživatele lze určit v družicovém souřadnicovém systému výpočtem ze známých poloh družic a dalších měřených veličin (pseudovzdáleností, fázových rozdílů). Hledané (určované) souřadnice jsou s využitím neli-

neárních rovnic vztaženy k měřeným veličinám a známým souřadnicím poloh družic. Soustava nelineárních rovnic je řešena metodou postupných aproximací pomocí vztahu

$$x^{(p+1)} = x^{(p)} - W^{-1}(x^{(p)}) f(x^{(p)}), \quad (1)$$

kde $x^{(p)}$ je vektor neznámých po p -té aproximaci. Vektor x^0 volíme na základě přibližných informací o neznámých (přibližné souřadnice atd.). $W(x)$ je tzv. Jacobiho matice funkcí f_1, \dots, f_n , a $f(x)$ je vektor obsahující jednotlivé funkce

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))^T. \quad (2)$$

Poznámka: Řešení předpokládá, že matice W je regulární, tj., že funkce f_1, f_2, \dots, f_n jsou lineárně nezávislé. Vektor neznámých x můžeme vypočítat pomocí vztahů:

$$x = x^0 + \delta x, \quad (3)$$

$$\delta x = (A^T C^{-1} A)^{-1} A^T C^{-1} l^0, \quad (4)$$

$$l_i^0 = f_i(x) - l_i, \quad (5)$$

kde

- x^0 – vektor přibližných hodnot neznámých,
- C – kovarianční matice měření,
- A – matice derivace funkcí podle jednotlivých neznámých,
- l_i – vektor měřených veličin.

Index 0 značí, že hodnoty jednotlivých derivací počítáme v „bodě“ x^0 . Výpočet je možno podle potřeby opakovat se zpřesněnými hodnotami neznámých.

Podrobnější informace o postupu výpočtu lze nalézt v libovolné učebnici numerické matematiky, např. [2].

6.2.2. Určení rychlosti pohybu uživatele

K určení rychlosti pohybu uživatele jsou systémem GPS využívány: tzv. Dopplerův jev a kódová data, která jsou modulována v družicovém signálu s využitím časových změn poloh družic v prostoru. Výpočet relativní rychlosti pohybu uživatele v , představující časovou změnu vektoru dp (vzdálenost družice - přijímač) za časový okamžik dt , je znázorněn na obr. 1 a vede k rovnici:

$$v = dp/dt. \quad (6)$$

Rychlost pohybu uživatele v lze v případě znalosti polohy a rychlosti družice a polohy uživatele v reálném čase určit řešením soustavy složitých nelineárních rovnic, které jsou uvedeny v [1].

6.2.3. Určení korekčních a doplňkových prvků navigace

Určení korekčních a doplňkových prvků navigace je zřejmé z obrázků 2 a 3. Na obr. 2 je znázorněn princip určení vodorovné vzdálenosti, azimutu a příčné odchylky od skutečného směru pohybu uživatele z určeného místa do místa určení, u kterého je využívána:

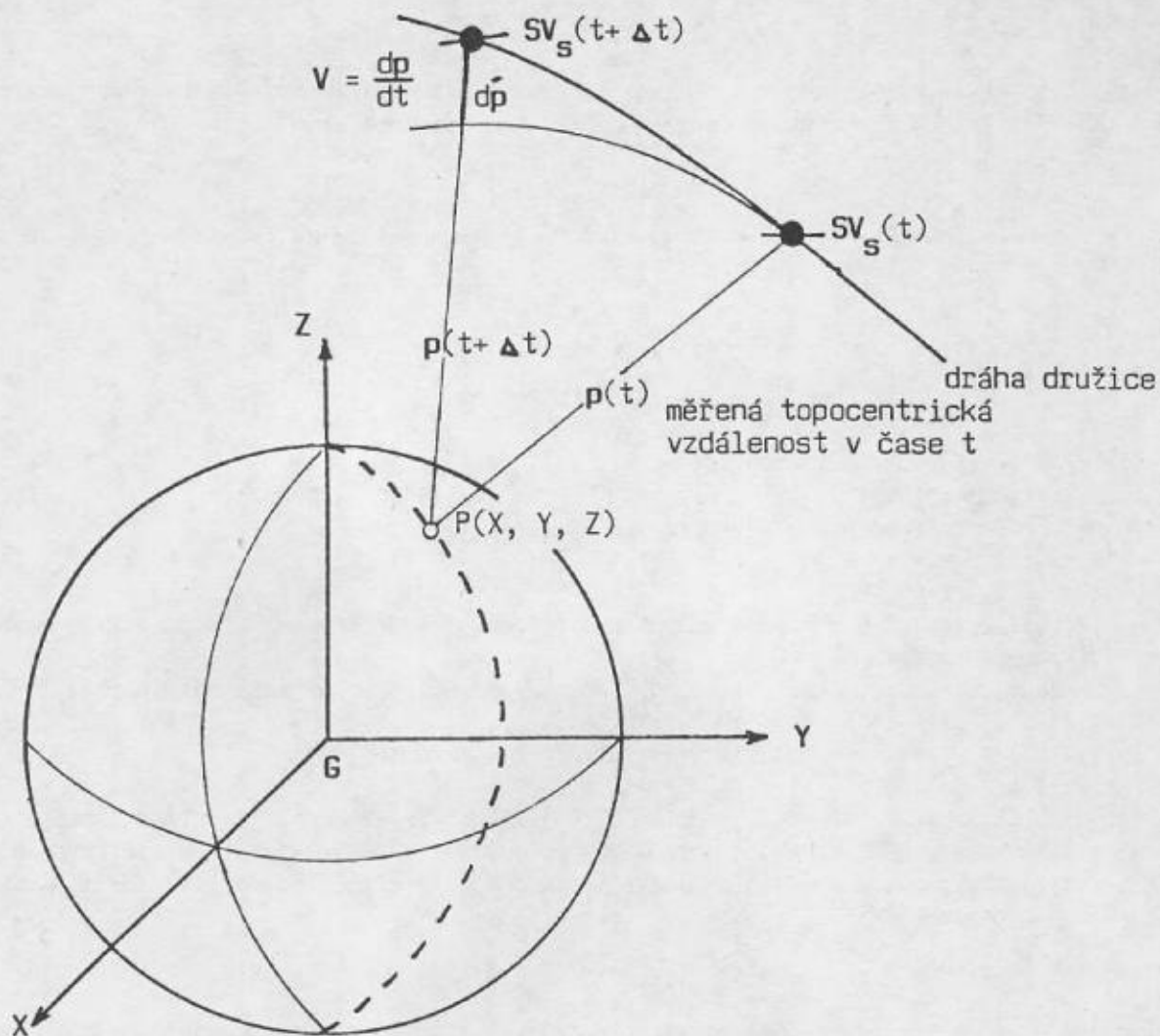
- současná zjištěná poloha k určení vodorovné vzdálenosti a azimutu do místa určení a pro určení příčné odchylky (kolmé vzdálenosti) od zjištěné polohy ke spojnici výchozí bod - místo určení;
- známá (určená) rychlost pohybu uživatele k určení odchylky (úhlu) od skutečného směru pohybu do místa určení.

Na obr. 3 je znázorněn princip určení převýšení, šikmé vzdálenosti a výškového úhlu (případně odchylky mezi skutečným a požadovaným úhlem) s využitím údajů o poloze, výšce a rychlosti pohybu uživatele.

Výpočet rozmanitých prvků a parametrů navigace je závislý na tom, zda je, nebo není přijímač GPS vybaven odpovídajícím softwarem schopným řešit tyto úkoly, a může probíhat **buď** v **přijímači** (s využitím přímo zabudovaného softwaru), **nebo** odděleně ve **výpočetní jednotce** (počítači).

6.3. Typy navigace a zabezpečení navigačních systémů GPS

Řešení úkolů navigace z hlediska praktických potřeb různých druhů vojsk, užívajících různé typy navigačních systémů a prostředků, je závislé na:



Obr. 1

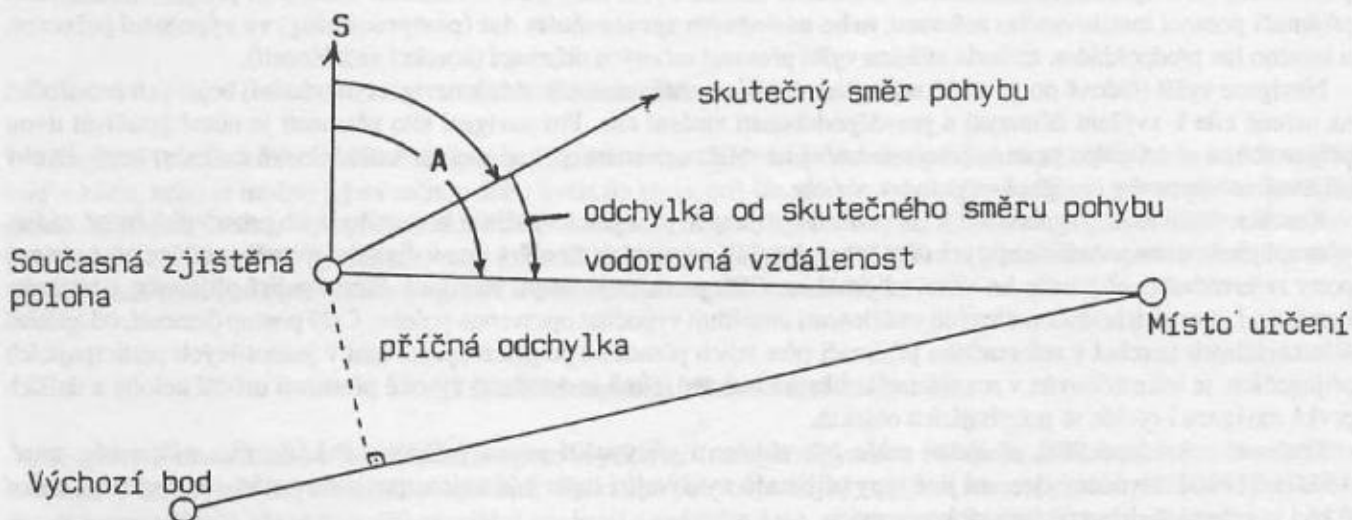
- požadované přesnosti navigace;
- užívaných typech navigačních prostředků (přijímačů GPS);
- softwarovém zabezpečení

a lze je členit z hlediska přesnosti na tyto typy navigace:

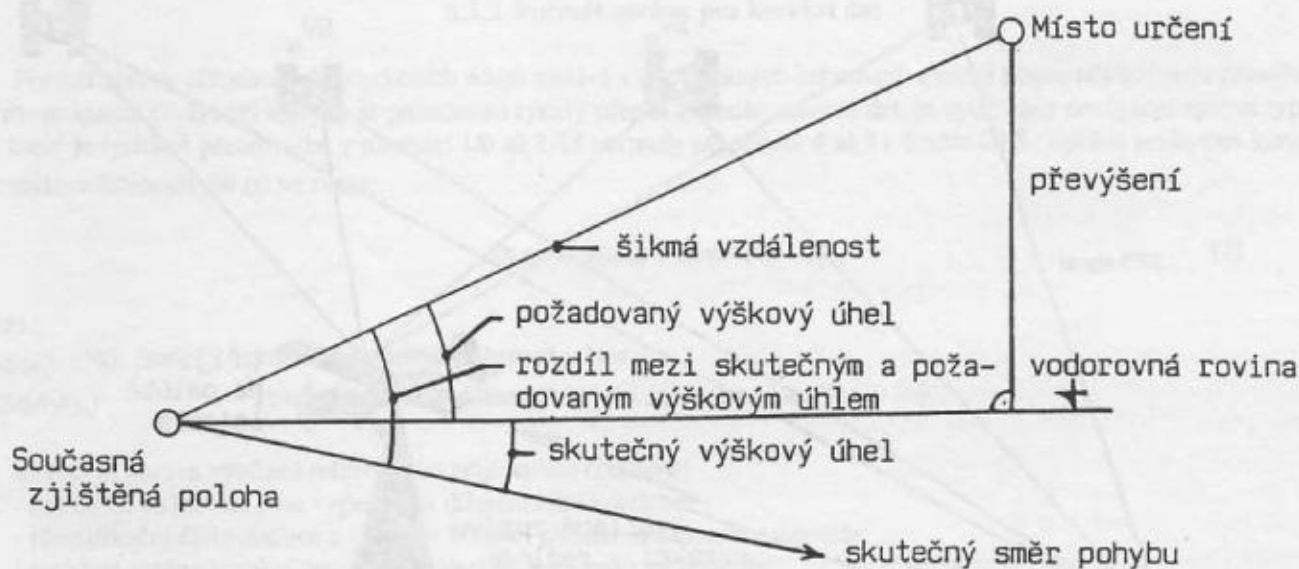
- **navigace nižší přesnosti** (přesnost určení polohy uživatele od řádově několika desítek metrů do několika stovek metrů);
- **navigace vyšší přesnosti**, tzv. diferenciální navigace (přesnost určení polohy uživatele od řádově několika metrů do několika desítek metrů).

6.3.1. Navigace nižší přesnosti

Navigace nižší přesnosti zpravidla dostačuje pro navigaci osob, případně dopravních, bojových či jiných prostředků do místa určení. Určení polohy uživatele v dolní hranici uvedené přesnosti lze realizovat využitím pouze **jediného C/A-kódového přijímače**. Jsou-li požadovány přesnosti v horní hranici uvedené přesnosti a je-li k dispozici pouze jediný C/A-kódový přijímač GPS, je zpravidla nutné určovat polohu v klidovém stavu, a to buď: opakovaným zjištěním (měřením) polohy určovaného bodu v průběhu určitého krátkého časového intervalu, nebo měřením v různých denních



Obr. 2



Obr. 3

dobách (není-li potřeba okamžitých údajů o poloze). Určovaná poloha je pak dána průměrnou hodnotou měřených údajů. Takto určená poloha nemůže být považována za polohu určenou v reálném čase. Jediným možným způsobem, jak zvýšit přesnost určení polohy v reálném čase, je oprava okamžitých určených hodnot polohy o předem známé korekce.

6.3.2. Navigace vyšší přesnosti - diferenciální navigace

Požadavky některých uživatelů na získávání okamžitých, spolehlivých a pokud možno přesných navigačních informací jsou ve většině případů uspokojovány pouze aplikacemi diferenciální navigace.

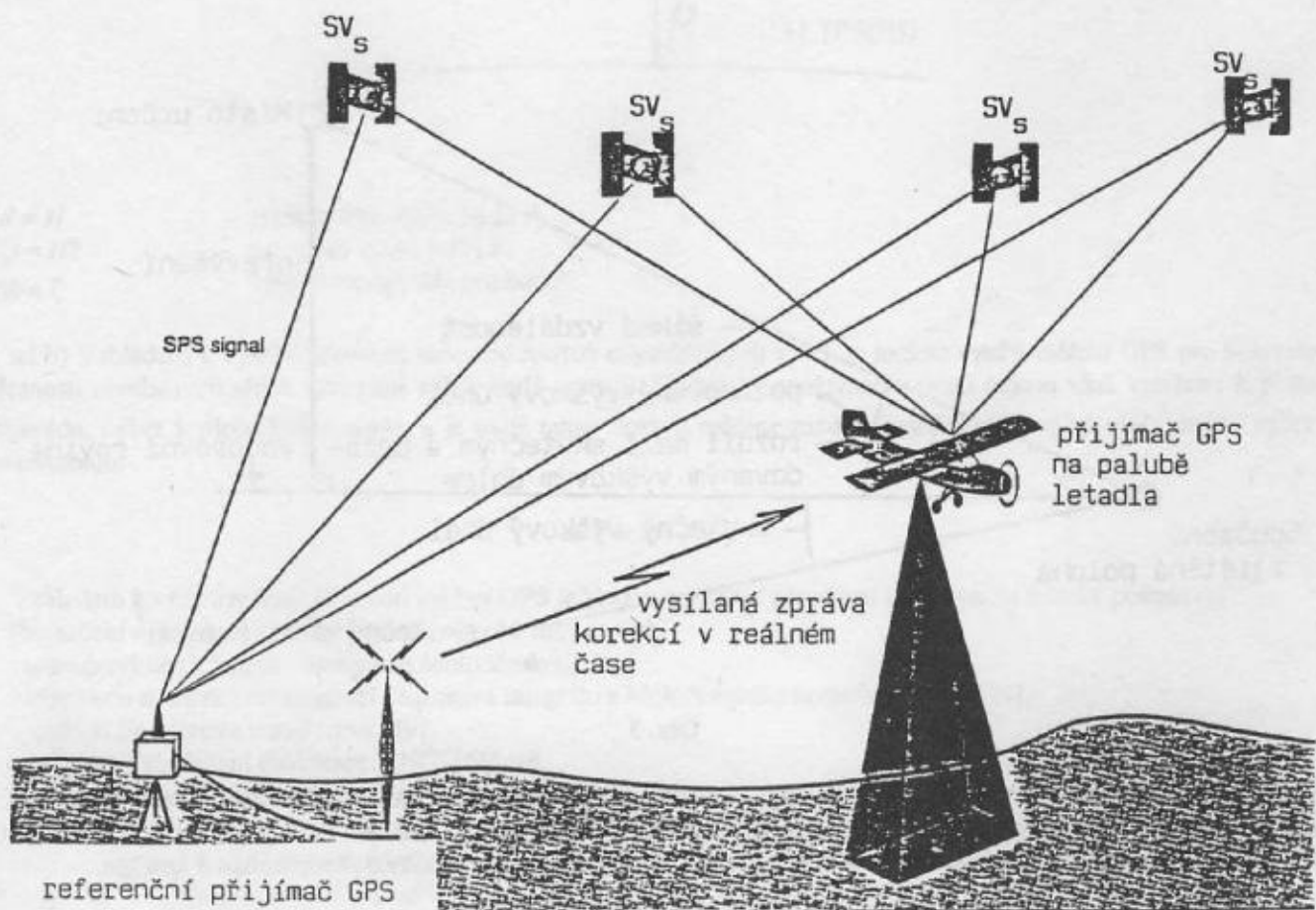
Podstata diferenciální navigace spočívá v určování diferencí mezi vypočítanými pravými vzdálenostmi k jednotlivým družicím s využitím znalosti přesné polohy stanoviště referenčního přijímače a poloh družic a vzdálenostmi měřenými přijímačem GPS (pseudovzdálenostmi). Diference mohou být určeny buď v reálném čase, a to přímo v referenčním přijímači pomocí instalovaného softwaru, nebo následným zpracováním dat (postprocessing) ve výpočetní jednotce, u kterého lze předpokládat, že bude získána vyšší přesnost určených diferencí (korekcí vzdáleností).

Navigace vyšší (řádově do 10 až 15 m) bude zpravidla požadována zejména k navigaci (navádění) bojových prostředků na určené cíle k zvýšení účinnosti a pravděpodobnosti zničení cíle. Pro navigaci této přesnosti je nutné používat dvou přijímačů, z nichž jeden pracuje jako referenční na stálém, pevném, pokud možno souřadnicově známém bodě. Druhý přijímač určuje prvky navigace za pohybu, viz obr. 4.

Korekce vzdáleností, vypočítané v referenčním přijímači, jsou pak s využitím komunikačních prostředků (např. rádiovým spojením nebo s využitím jiných přenosových médií schopných přenášet data v digitální formě) vysílány přes sériové porty referenčního přijímače ke všem přijímačům GPS participujícím při navigaci. Participující přijímače odečtením korekcí od vlastních hodnot měřených vzdáleností umožňují vypočítat opravenou polohu. Celý postup činností, od zjištění diferenciálních korekcí v referenčním přijímači přes jejich přenos až po jejich zpracování v jednotlivých participujících přijímačích, je uskutečňován v rozmezí několika milisekund, čímž je dosaženo vysoké přesnosti určení polohy a dalších prvků navigace i rychle se pohybujících objektů.

Přesnost v uvedené třídě přesnosti může být získána i při využití pouze jediného P-kódového přijímače, např. ASHTECH XII. Uvedený typ, ani jiné typy přijímačů využívající tento kód nejsou pro naše potřeby k dispozici, neboť P kód je výhradně určen pro americkou armádu.

Hlavním požadavkem, mluvíme-li o diferenciální navigaci v reálném čase, je tedy možnost komunikace a současně přenosu dat a korekčních zpráv mezi referenčním a pohybujícím se přijímačem.



Obr. 4

Diferenciální navigace může být aplikována dvěma způsoby, jako:

- statická;
- kinematická.

6.3.2.1. Statická diferenciální navigace

Při aplikaci statické diferenciální navigace je při určování navigačních prvků navigovaný objekt (přijímač - ne referenční) buď v klidu, nebo je možno jej na určitou dobu uvést do klidu, což lze aplikovat ve většině případů pozemní navigace. Za těchto okolností mohou být příslušné korekce dat aplikovány k danému času, a to buď po všech měřeních v tzv. **postprocessing** (následné zpracování dat), nebo ukládány pro jejich pozdější přenos a následné zpracování. Z uvedených důvodů není potřebné udržovat spojený a přenášet data v průběhu celého měření.

6.3.2.2. Kinematická diferenciální navigace

Při aplikaci kinematické diferenciální navigace se přijímač (navigační systém), určující s určitou periodou času polohu uživatele v reálném čase, po celou dobu měření nepřetržitě pohybuje. Je tedy zřejmé, že není možné následné zpracování dat. V tomto případě jde vždy o **diferenciální navigaci v reálném čase**, při které nejdůležitějším požadavkem je:

- nutnost výběru vysoce spolehlivých prostředků pro přenos dat určených k okamžitému zpracování;
- zabezpečení nepřetržitého toku informací korekčních údajů obsažených v přenášené zprávě.

Spolehlivost přenosu dat mezi přijímači je závislá na zvoleném typu přenosového zařízení, na vzdálenosti přenosu dat, na počtu užívaných přijímačů apod. Je nutné podotknout, že v současné době řada navigačních přijímačů GPS (např. ASHTECH XII) umožňuje vzájemný přenos dat a korekčních údajů s využitím radiokomunikačního spojení.

6.3.3. Formát zprávy pro korekci dat

Formát zprávy přenášených korekčních údajů sestává z 16 rozdílných informací, z nichž pouze některé jsou přenášeny. Pro navigační účely, při kterých je požadován rychlý přenos aktualizovaných dat, je využívána navigační zpráva typu I, u které je rychlost přenosu dat v rozmezí 1/6 až 1/15 sekundy při příjmu 4 až 11 družic GPS. Zpráva poskytuje korekce pseudovzdáleností $d\Phi(t)$ ve tvaru:

$$d\Phi(t) = d\Phi(t_0) + d\delta\Phi/\delta t (t - t_0), \quad (7)$$

kde

- $d\Phi(t_0)$ – korekce pseudovzdálenosti v čase t_0 ,
- $d\delta\Phi/\delta t(t_0)$ – korekce pseudovzdálenosti během časového okamžiku $(t - t_0)$.

Korekční zpráva vyslaná referenčním přijímačem obsahuje:

- čas GPS, ve kterém jsou vypočítány diferenciální korekce;
- identifikační číslo družice a hodnoty korekcí pseudovzdáleností v metrech;
- rychlost změny korekcí pseudovzdáleností v metrech za sekundu;
- identita užívaných efemerid (identifikační kód);
- odhadované diferenciální chyby uživatele.

Zabezpečení navigačních systémů musí být voleno tak, aby byl po celou dobu jejich činnosti zajištěn nepřetržitý přenos korekčních zpráv jak po stránce technické, tak i provozní. Při výběru systému musí být vždy zváženo, zda je určen pro poskytování navigačních informací a korekčních zpráv v reálném čase, nebo pro jejich následné zpracování. Je-li určen pro zpracování dat v reálném čase, je nutné vždy zabezpečit nepřetržitý přímý přenos korekčních údajů k uživatelům navigovaných objektů.

Vzhledem k tomu, že poloha družic i vliv prostředí se mění s časem, je zřejmé, že diferenciální korekce se také mění. Z této skutečnosti vyplývá hlavní a podstatný požadavek: využívat identickou verzi orbitálních drah jak referenčním, tak i participujícími přijímači. Pro tento účel korekční zpráva obsahuje kromě diferenciálních korekcí identifikační kód užívaných parametrů dráhy. Liší-li se uvedený kód od kódu v participujícím přijímači, korekce nejsou zaváděny.

6.4. Navigační zabezpečení velitelských, zbraňových a průzkumných systémů

Princip činnosti, vysoká přesnost, spolehlivost a celosvětové pokrytí družicovým navigačním signálem vytvářejí předpoklady širokého využití systému GPS ve vojenské oblasti. V současném období je rozvoj technických prostředků a bojové techniky spojován s využitím systému GPS pro navigační zabezpečení velitelských, zbraňových a průzkumných systémů s možnostmi poskytovat prakticky nepřetržitou trojrozměrnou informaci o jejich poloze s relativně vysokou přesností.

Přímým zavedením systému GPS nebo v úzké součinnosti s dalšími navigačními a řídicími systémy velitelských, zbraňových a průzkumných systémů se podstatně zvýší přesnost a spolehlivost navádění, pravděpodobnost zjištění a v konečném důsledku i účinnost ničení pozemních a vzdušných cílů. Předpokládá se vybavení některých druhů vysoce přesných zbraňových systémů (střely a pumy dalekého dosahu, zbraňové a palebné systémy RVD apod.) přijímači GPS, čímž bude zabezpečeno navádění prostředků na cíle s vysokou přesností (od několika metrů do několika desítek metrů).

Navigační zabezpečení shora uvedených systémů přijímači GPS umožní:

- určit polohu vlastního stanoviště v reálném čase;
- navigovat vlastní systém do určených prostor (na určené cíle) prakticky bez možnosti ztráty orientace, zejména za snížené viditelnosti a v noci;
- na základě předávání informací o poloze dalších systémů účelně organizovat a koordinovat bojovou činnost, přesuny do určených prostor, zejména v neznámém terénu.

Vybavením mobilních středisek automatizovaných systémů řízení, velení a zabezpečení palby přijímači GPS se na různých stupních velení značně zjednoduší a urychlí proces topografického připojení palebných prostředků různých druhů vojsk.

V plném operačním provozu (předpokládaném do roku 1994) bude systém GPS schopen poskytovat nejen základní informace o poloze a pohybu navigovaného objektu, ale plnit i řadu komplexních úkolů v zabezpečení velitelských, zbraňových a průzkumných systémů. K nejdůležitějším z nich patří:

- navigační zabezpečení letounů a vrtulníků po trase letu i v prostorech bojové činnosti, včetně řízení sestupu a přistání na leteckých základnách za ztížených povětrnostních podmínek, ve dne i v noci i při nízké (nulové) viditelnosti;
- navigace a navedení zbraní a prostředků ničení dalekého dosahu (např. řízených střel, střel s plochou dráhou letu apod.) s vysokou přesností na plošné i bodové cíle;
- určování polohy zejména mobilní bojové techniky, protiletadlových systémů, průzkumných prostředků, automatizovaných systémů řízení palby apod.;
- navigace jednotek speciálního určení a jednotek různých druhů průzkumů, zejména v týlu nepřítelů, určování poloh zjištěných objektů a bojové techniky a jejich orientace za snížené viditelnosti a v noci;
- možnost poskytování údajů o jednotném čase uživatelům vybaveným přijímači GPS;
- zabezpečení speciálních vojenských služeb v TGZ při měřeních v terénu apod.

6.5. Navigační technika GPS, možnosti plánování tras, přesnost

Pro potřeby navigace, zejména pro vojenské účely, vyrábí řada výrobců různé typy přijímačů GPS v závislosti na potřebách a požadavcích uživatelů. Největším světovým výrobcem navigačních přijímačů je americká firma TRIMBLE NAVIGATION vyrábějící zejména přijímače pro vojenské aplikace. Přehled současně a v budoucnu vyráběných navigačních přijímačů a termín jejich zavedení do výroby je uveden v tabulce 1.

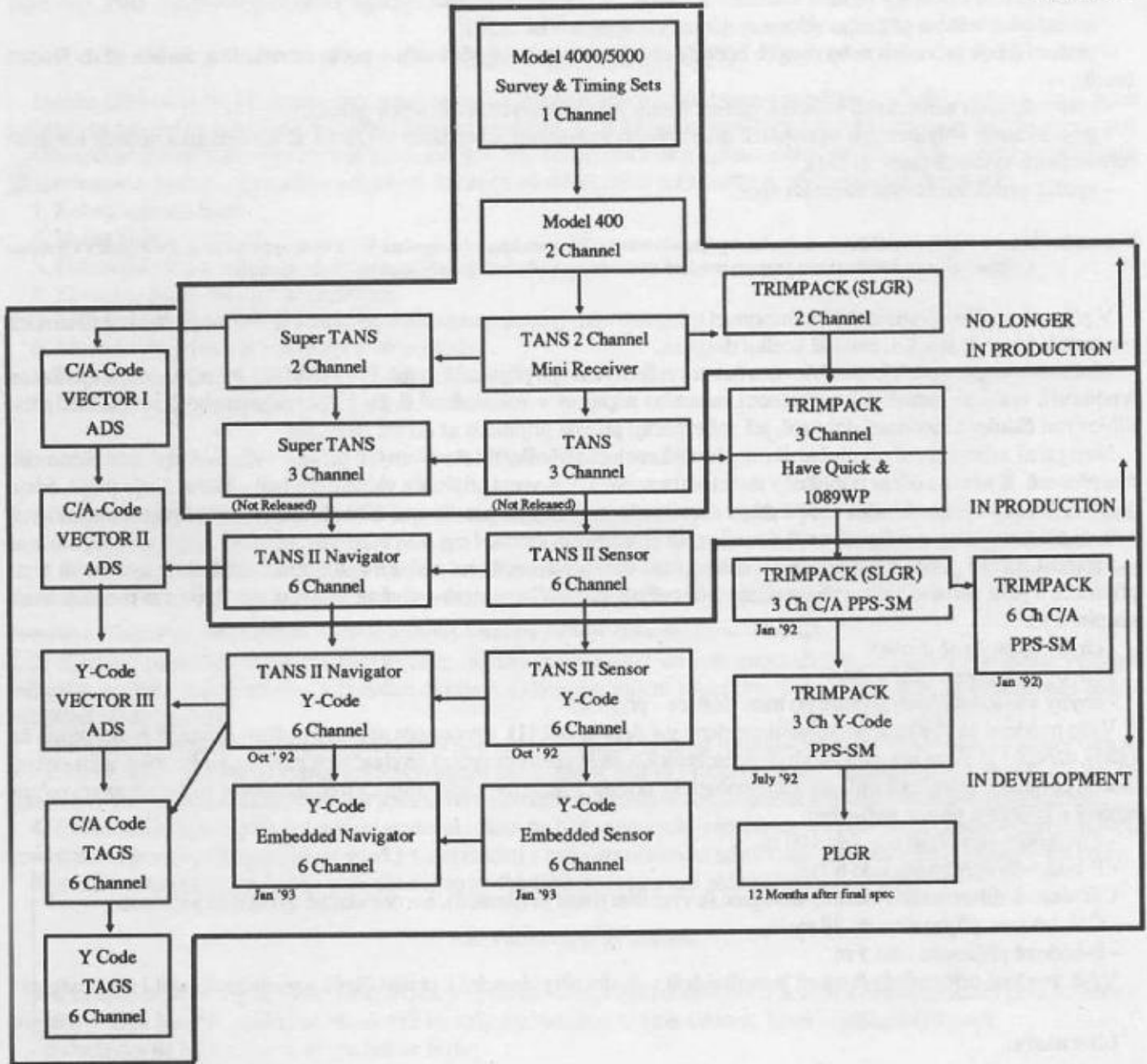
V tab. 2 jsou uvedeny současně vyráběné navigační přijímače, které jsou využívány ve vojenských aplikacích různých druhů vojsk k zabezpečení navigace osob, ale i shora uvedených systémů s vysokou spolehlivostí a přesností, řádově od několika metrů do několika desítek metrů.

Navigační přijímače umožňují opakovaně určovat se standardní periodou (dá se případně volit) asi 1 sekundy prostorové polohy uživatelů (navigovaných objektů) v reálném čase prakticky kdekoli na Zemi nebo v jejím okolí s ohledem na možnosti jejich využití v různých bojových a povětrnostních podmínkách i v prostředí se silnými ořesy, vysokou prašností a vlhkostí. Funkčnost přijímačů je zabezpečena v teplotních rozmezích přibližně od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výrobce zaručuje provozní spolehlivost přijímačů na více než 15 000 hodin.

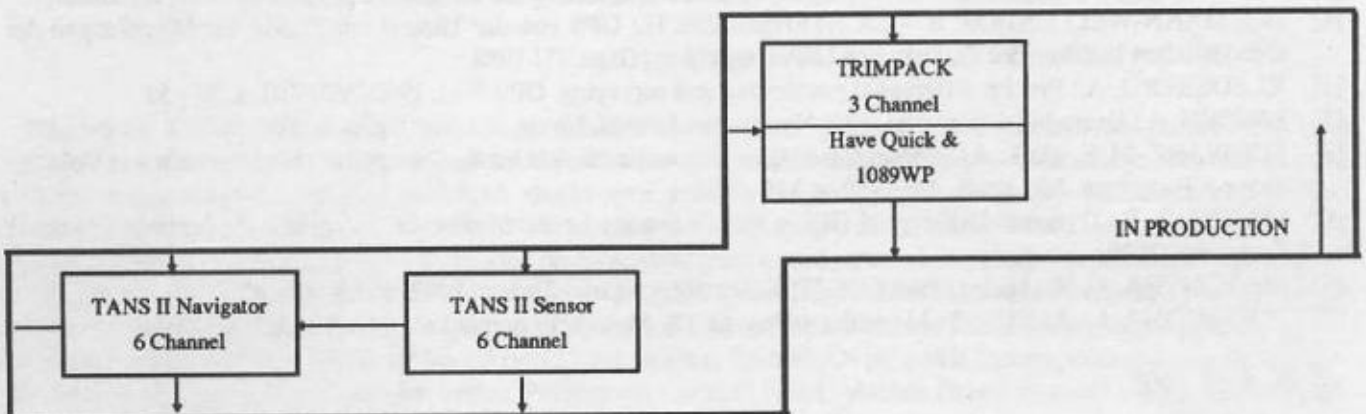
Konstrukce přijímačů je volena tak, aby umožnila jejich snadnou a rychlou obsluhu i možnost rychlé volby z řady navigačních funkcí přijímače, mezi které mohou patřit v závislosti na softwaru zabudovaném v přijímači i tyto možnosti:

- určení polohy a výšky v reálném čase s intervalem opakování asi 1 sekunda při rychlostech pohybu navigovaného objektu až do 500 m/s;
- určení vzdálenosti a azimutu z určené polohy na stanovený cíl;
- určení převýšení, šikmé vzdálenosti a výškového úhlu;

Tabulka 1



Tabulka 2



- určení příčné odchylky (kolmé vzdálenosti z určeného místa na spojnici výchozí - koncový bod);
- určení podélného a příčného sklonu systému (viz systém VECTOR);
- uložení údajů určených nebo daných bodů (waypoints) do paměti přijímače v počtu od několika desítek až do řádově tisíců;
- volby různých metrických jednotek měření (úhlových, délkových) i časových pásem;
- transformace zobrazených výstupních údajů přímo v přijímači ze systému WGS 84 až do několika desítek místních referenčních systémů (např. UTM);
- využití pro diferenciální navigaci apod.

Poznámka: Žádný z doposud vyráběných navigačních přijímačů neumožňuje transformaci ze systému WGS 84 do systému 1942. Po dohodě s výrobcem a příplatně je možné instalovat program uvedené transformace v přijímači prostřednictvím TS Čs. armády.

V případě potřeby podrobnějších informací o jednotlivých typech navigačních přijímačů je možné je získat z firemních prospektů, kterých je v Čs. armádě vcelku dostatek.

Možnost navigace osob je umožňována řadou vyráběných typů přijímačů (např. TRIMPACK), které se vyznačují nízkou hmotností, malými rozměry i možnostmi interního napájení v rozmezí od 9 do 32 V, napájeného buď Ni-Cd, nebo lithiovými články s možností dobíjení, jež zabezpečují provoz přijímače až do asi 20 hodin.

Navigační zabezpečení při plnění úkolů přesunů osob či techniky do stanovených prostor vyžaduje většinou plánování tras přesunů. K tomuto účelu je možné v rámci softwarového vybavení přijímače vkládat předem zjištěné údaje (např. údaje o poloze bodu určené měřením nebo z mapy - tzv. waypoint) do jeho paměti a na základě měřených, případně vkládaných hodnot plánovat trasy a doby přesunů do určených prostor.

Přesnost určení prvků navigace je závislá na řadě okolností, např.: na počtu a konfiguraci družic, na zvoleném typu přijímače a jeho softwarovém vybavení, metodě měření apod. Vlivy, které ovlivňují přesnost navigace, lze rozdělit do tří skupin, a to:

- chyby způsobené družicí;
- chyby způsobené přijímačem;
- chyby vzniklé šířením signálu po trase družice - přijímač.

Výše uvedené chyby jsou podrobněji uvedeny v 4.6, případně [1], a proto zde nejsou uváděny. Je nutné podotknout, že každý uživatel si musí být vědom vlivů způsobujících nižší přesnost určení navigačních prvků a podle toho volit pokud možno optimální technické zařízení a technologický postup. Přesto lze v souhrnném vlivu orientačně uvést přesnosti určení polohy s využitím **pouze jediného**:

- C/A-kódového přijímače - do 100 m;
- P-kódového přijímače - do 60 m.

Užíváme-li diferenciální metody navigace (s využitím **dvou přijímačů**), lze orientačně uvést tyto přesnosti:

- C/A-kódové přijímače - do 20 m;
- P-kódové přijímače - do 5 m.

Výše uvedené orientační přesnosti je možné brát v úvahu při plánování a plnění úkolů a podle nich volit i typ navigace.

Literatura:

- [1] WELLS, D. a kol.: Guide to GPS Positioning. Fredericton (Canada), Canadian GPS Associates 1986.
- [2] KOPCHENOVA, N. V. - MARON, I. A.: Computational Mathematics. Moscow 1990.
- [3] LINKWITZ, K. - HANGLEITER, U.: High Precision Navigation. Berlin - Heidelberg, Springer-Verlag 1989.
- [4] HOFMANN-WELLENHOF, B. - LICHTENEGGER, H.: GPS von der Theorie zur Praxis. In: Mitteilungen der Geodätischen Institute der Technischen Universität Graz. Graz, TU 1988.
- [5] KLEUSBERG, A.: Precise differential positioning and surveying. GPS Wld, 1992, VII/VIII, s. 50 - 52.
- [6] BROWN, A.: Extended differential GPS. Navigation, J. Instit. Navig., 36, 1989, č. 3, s. 268 - 285.
- [7] SCHWARZ, M. E. a kol.: A Comparison of GPS Kinematic Models for the Determination of Position and Velocity along a Trajectory. Ma. geod., 14, 1989, s. 345 - 353.
- [8] HATCH, R. P.: Dynamic Differential GPS at the Centimeter Level. Magnavox, Advanced Products and Systems Company. 2829.
- [9] MATONOHA, J.: Navigační systém VECTOR. In: Sbor. topogr. Služby, 1992, č. 2, s. 40 - 42.
- [10] MATONOHA, J. - JANUS, P.: Metodika měření s GPS. Metodická pomůcka. Dobruška, VTOPÚ 1992.

Došlo 3. 12. 1992

7. Technologie měření GPS

System GPS-NAVSTAR je převratnou technologií v řešení různých úloh moderní geodézie a přináší s sebou i zcela jinou technologii měření ve srovnání s metodami klasické geodézie. Technologie měření GPS klade hlavní důraz na část přípravnou a plánovací a část softwarového zpracování měřických dat. Vlastní observace s přijímačem GPS je z hlediska obsluhy přijímače již nenáročná a do jisté míry pasivní záležitost. Technologii měření GPS lze rozdělit do těchto následujících etap:

1. Rekognoskace bodů.
2. Volba metody měření.
3. Plánování (sestavení plánu měření).
4. Zavedení plánu měření do přijímače.
5. Měření (sběr dat).
6. Převod měřených dat z přijímače do počítače.
7. Polní zpracování výsledků.
8. Definitivní zpracování výsledků a vyrovnání sítě.

7.1. Rekognoskace bodů

Důležitou etapou přípravy měření GPS je pečlivá rekognoskace jednotlivých bodů. Výběr bodů vhodných pro měření GPS je nutné podřídit jiným kritériím, než která platí pro klasická měření. Rekognoskace bodů se provádí podle těchto kritérií:

1. Zenitová hemisféra rekognoskovaného bodu musí umožňovat nerušený příjem družicového signálu. Řídit se pravidlem, co brání průchodu světelného paprsku, nepropustí ani družicový signál.

Poznámka: Z technologického hlediska uvažovat zenitovou hemisféru počínaje výškovým úhlem 10° až 15° .

2. Zjištěné překážky v příjmu družicového signálu zaznamenat do rekognoskačního záznamu. Překážku vymeziť měřením azimutů jejího levého a pravého okraje a výškovým úhlem překážky. Tyto údaje přispějí k sestavení dokonalějšího plánu měření.

3. Při výběru vhodných bodů pro měření GPS se v rámci možností vyhnout nežádoucím rušivým vlivům. Za rušivý vliv se považuje blízkost výkonného vysílače elektromagnetického vlnění, vedení vysokého napětí, velké odrazové plochy, měření na bodě s trvalou signalizací nebo v těsném sousedství frekventované komunikace (zejména železnice, tranzitní komunikace).

4. Z hlediska potřeb plánování měření sledovat i časovou dostupnost rekognoskovaných bodů (bod dostupný příjezdovou komunikací, pouze pěší dostupnost apod.) v souvislosti s celkovou časovou náročností přesunů mezi jednotlivými body. Výsledky rekognoskace terénu jsou důležitým podkladem pro sestavení plánu měření (viz 7.3).

7.2. Volba metody měření

V současné době se v geodetických aplikacích využívá několik metod měření GPS. Jejich charakteristiky jsou podrobně popsány v kap. 5.3. Při výběru nejjvhodnější metody rozhoduje celá řada faktorů. Mezi nejdůležitější patří:

- požadavky na přesnost určení souřadnic bodu;
- konfigurace a hustota bodů;
- závěry rekognoskace terénu;
- hospodárnost (ekonomická i časová).

Aplikace jednotlivých metod v topograficko-geodetickém zabezpečení je podrobněji rozebrána v kap. 9.

7.3. Plánování

Plánování je důležitou etapou, nutně předcházející každému měření. Cílem plánování je sestavení takového plánu měření, který zajišťuje pro zvolenou metodu a charakter okolního terénu optimální observační podmínky a minimalizuje celkovou časovou a ekonomickou náročnost přepravy měřických skupin mezi jednotlivými body. Plánování se provádí na osobním počítači prostřednictvím firemního programu TRIMPLAN. Tento program umožňuje pro danou oblast, datum, vymezené překážky, úhel výškové masky a zvolený časový interval vypočítat předpokládaný počet a konfiguraci všech viditelných družic s udáním hodnoty PDOP (viz obr. 1 a 2), která vyjadřuje tzv. faktor polohového snížení přesnosti (Position Dilution of Precision) a popisuje, jakým způsobem konstelace družic ovlivňuje přesnost určení polohy bodu. Se vzrůstající hodnotou PDOP klesá kvalita a přesnost měření. Na základě těchto hlavních a mnoha dalších informací, které program TRIMPLAN předkládá formou přehledných grafů a tabulek (viz obr. 3 až 6), sestavujeme vlastní plán měření. Pro jednotlivé měřické relace vybíráme časové intervaly s dostatečným počtem



Number of Visible Satellites vs Time

Station : Dobruska

Latitude : 50 17'00"N

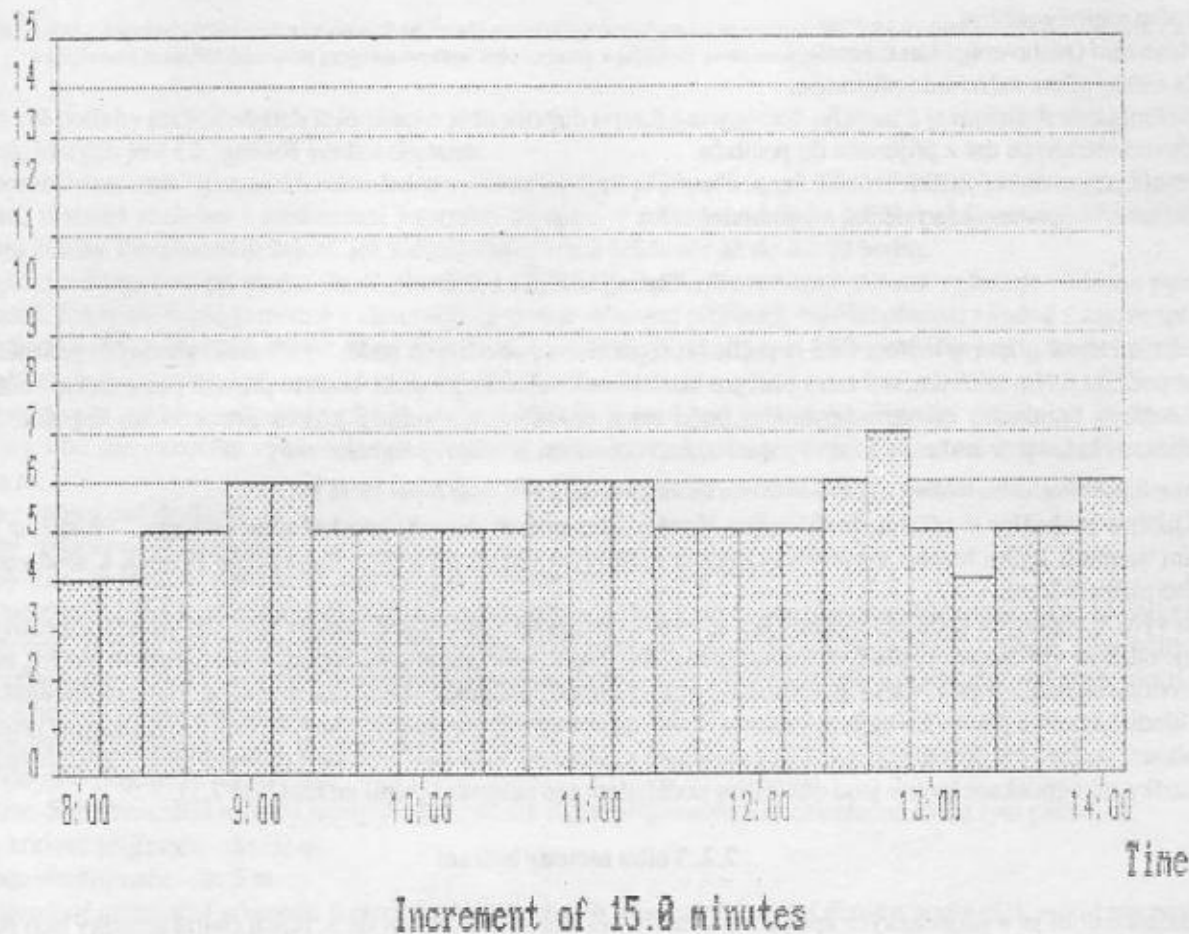
Longitude : 16 10'30"E

Date : 10 Aug 1992

Zone : 2:00

Cut-off Elevation : 10

Number of Satellites



Obr. 1. Graf počtu viditelných družic v závislosti na čase

viditelných družic a příznivou hodnotu PDOP ($PDOP < 10$). Naopak se vyhýbáme časovým intervalům s nedostatečným počtem viditelných družic a s trvale vysokou hodnotou PDOP. Délku observace stanovíme na základě firemního grafu doporučené délky observace v závislosti na počtu viditelných družic a délce základny (viz obr. 7). Přesné výpočty zaručuje program TRIMPLAN pouze s aktuálním almanachem, souborem, který obsahuje informace o dráhách družic. Almanach je nutné obnovovat vždy po uplynutí 3 měsíců. Kompletní almanach získáme ze souboru efemerid, který je součástí každého měření trvajícím déle než 15 minut.

7.4. Zavedení plánu měření do přijímače

Plán měření se do přijímače zavádí zpravidla jen při použití statické metody měření. Využití předem plánovaného měření pro spuštění přijímače je velmi výhodné, neboť zjednodušuje měřické operace. Plán měření se do přijímače zavádí prostřednictvím předního panelu přijímače nebo přímo z počítače s použitím programu T 4000.



All-In-View PDOP vs Time

Station : Dobruska

Latitude : 50 17'00"N

Longitude : 16 10'30"E

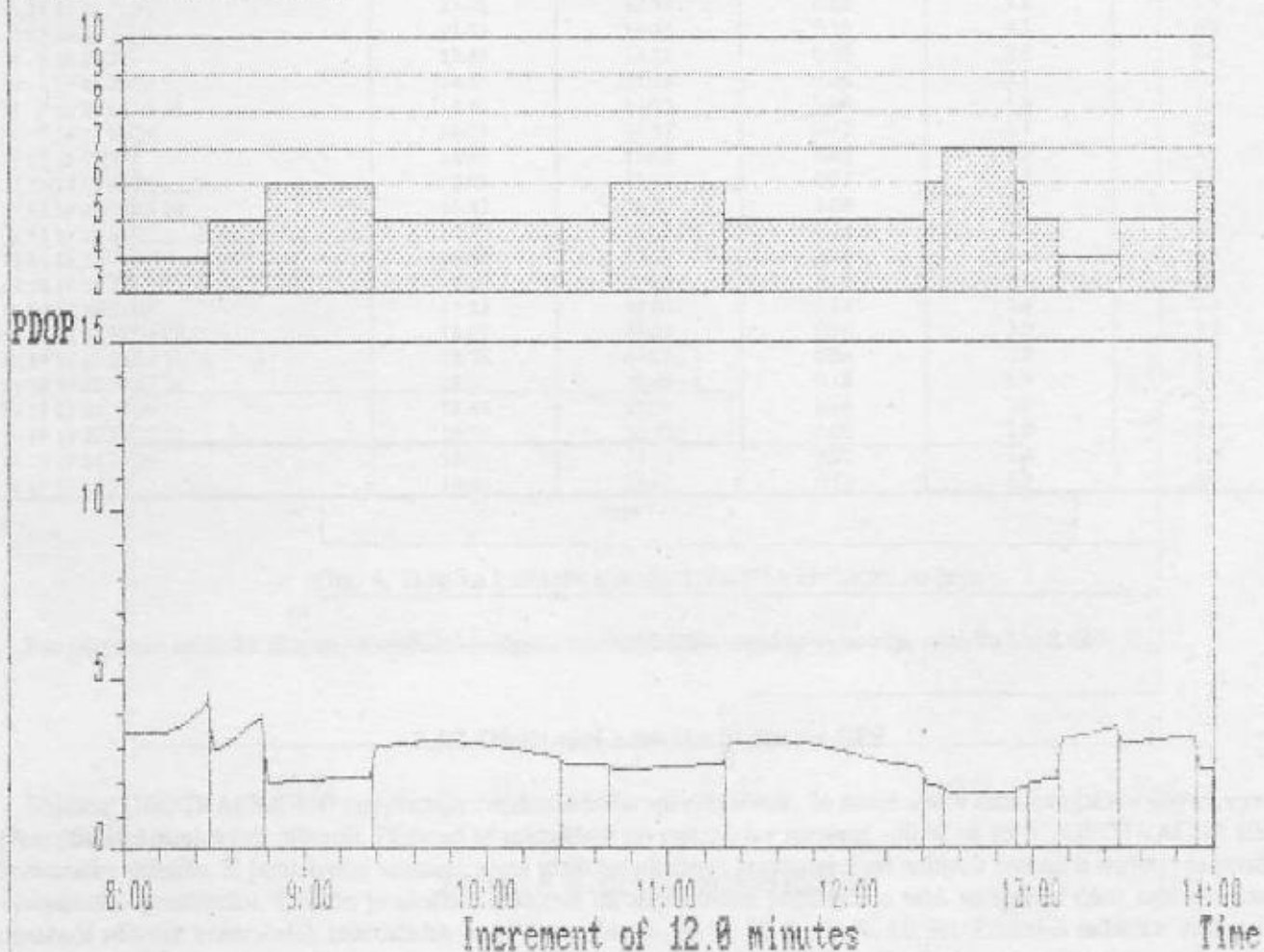
Date : 10 Aug 1992

Zone : 2:00

Cut-off Elevation : 10

Number of Satellites

9 Channel Receiver



Obr. 2. Graf konstelace družic (PDOP) v závislosti na čase

7.5. Měření

Měření na jednotlivých bodech začíná instalací aparatury. Nad měřeným bodem provedeme horizontaci a centraci antény, anténu standardně směřujeme k severu, změříme její výšku s přesností na mm a připojíme anténním kabelem (10 nebo 30 m) k přijímači, přijímač připojíme na zdroj elektrické energie. Obsluha přijímače je velmi jednoduchá. Pokud využíváme předem plánovaného měření, zapneme pouze přijímač a vlastní měření již probíhá automaticky. Přijímač vyhledá všechny družice nacházející se nad zvoleným úhlem výškové masky, provede kalibraci a zahájí sběr dat. Průběh měření zapisujeme do měřického zápisníku, který zpravidla obsahuje identifikátor stanoviště, jeho přibližné souřadnice (pokud jsou známy), typ přijímače a antény, výšku antény (popř. schéma měření výšky antény), začátek a konec měření, informace o počtu a číslech pozorovaných družic, hodnoty PDOP a SNR (okamžitý poměr signálu a šumu) apod. Měření končí vypnutím přijímače a uložením aparatury.



Visible Satellites vs Time

Station : Dobruska

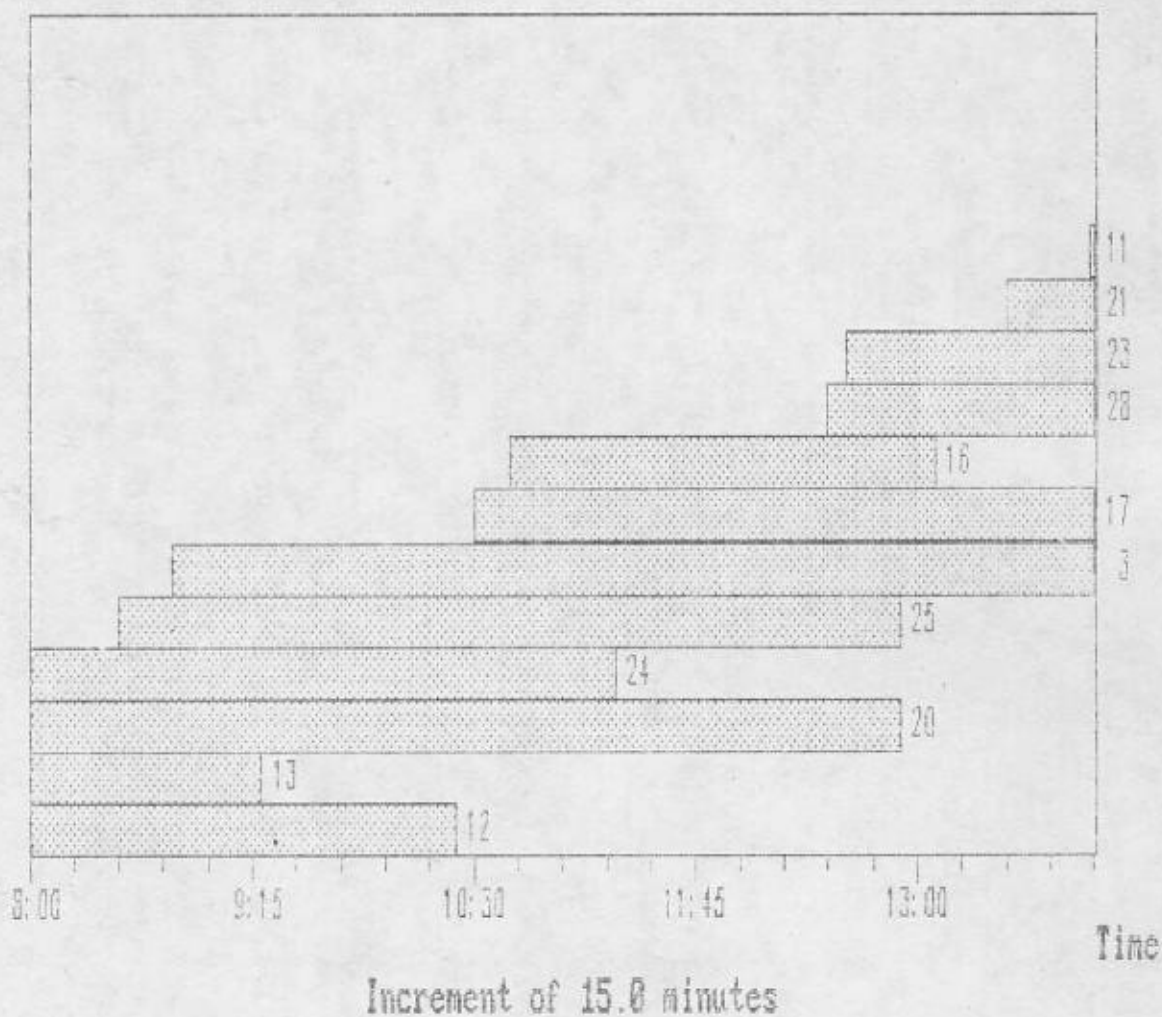
Latitude : 50 17'00"N

Longitude : 16 10'30"E

Date : 10 Aug 1992

Zone : 2:00

Out-off Elevation : 10



Obr. 3. Graf viditelnosti družic v závislosti na čase

7.5.1. Složení měřické skupiny GPS

Na základě technologie měření GPS se měřických prací zúčastňují alespoň 2 měřické skupiny.

Složení měřické skupiny GPS:

- řidič (měřický pomocník);
- měřič (velitel vozu);
- specialista pro zpracování měřických dat (společný pro všechny měřické skupiny) pracuje v kancelářských podmínkách, zpracovává měřická data a na základě výsledků operativně upravuje plán dalšího měření.

All-In-View PDOP for Praha					
Date: 22 Sep 1993		Latitude: 50° 00' 00" N			
Time: 12:00 → 20:00		Longitude: 14° 30' 00" E			
Cut-off Elevation: 15°		Zone: 1:00			
Satellite Constellation	Time Rise	Time Set	dT	PDOP Rise	PDOP Set
1 15 21 23 28 31	12:00	12:21	0:21	2.8	3.1
1 15 21 28 31	12:21	12:33	0:12	4.6	4.7
1 2 15 21 28 31	12:33	12:53	0:20	2.6	2.2
1 2 14 15 21 28 31	12:53	13:11	0:18	1.9	1.8
1 2 14 15 21 31	13:11	13:31	0:20	2.3	2.1
1 14 15 21 31	13:31	13:33	0:02	2.8	2.8
1 14 15 31	13:33	13:43	0:10	4.1	4.0
1 7 14 15 31	13:43	14:13	0:30	2.5	2.3
1 7 14 15 29 31	14:13	14:19	0:06	2.1	2.1
1 7 14 15 25 29 31	14:19	14:25	0:06	1.9	1.9
1 7 14 15 25 29	14:25	14:57	0:32	2.1	2.6
7 14 15 25 29	14:57	15:05	0:08	2.9	3.0
7 13 14 15 25 29	15:05	15:37	0:32	2.7	2.9
7 13 14 15 18 25 29	15:37	16:37	1:00	2.0	1.8
7 13 14 18 25 29	16:37	16:55	0:18	2.5	2.5
13 14 18 29	16:55	17:17	0:22	7.4	6.1
13 14 18 24 29	17:17	17:23	0:06	4.6	4.3
13 14 18 19 24 29	17:23	18:07	0:44	2.1	2.6
13 14 18 19 22 24 29	18:07	18:23	0:16	2.0	1.9
13 14 18 19 22 24 27 29	18:23	18:27	0:04	1.7	1.7
14 18 19 22 24 27 29	18:27	18:45	0:18	1.9	2.0
18 19 22 24 27 29	18:45	18:51	0:06	2.2	2.2
16 18 19 22 24 27 29	18:51	18:53	0:02	2.0	2.0
16 18 19 24 27 29	18:53	19:43	0:50	2.4	2.5
16 18 19 24 27	19:43	20:00	0:17	6.2	3.9

Page 1 of 1

Obr. 4. Tabulka konstelace družic (PDOP) v závislosti na čase

Pro přepravu měřické skupiny a měřické techniky v podmínkách armády vyhovuje vozidlo UAZ 469.

7.5.2. Ošetřování a údržba přijímače GPS

Přijímač GEOTRACER 100 nevyžaduje zvláštní údržbu ani ošetřování. Je nutné s ním zacházet jako s jinými vysoce přesnými elektronickými přístroji. Přijímač se uskládá při teplotách v rozmezí -30 °C až 75 °C. GEOTRACER 100 je hermeticky utěsněn. K pohlcování vlhkosti, která vzniká v přijímači kondenzací při náhlých změnách teploty, se používá vysoušecího prostředku. Sušidlo je uloženo v kazetě na zadní straně přijímače a také ve spodní části antény. Kazeta obsahuje několik kontrolních indikačních bodů (pro vlhkosti 30 %, 40 %, 50 %, 60 %). Změní-li indikace vlhkosti 50 % původní modrou barvu na růžovou, vymění se kazeta se sušidlem za novou. Hermetičnost antény je zajištěna až po zašroubování krytky konektoru.

7.6. Převod měřených dat z přijímače do počítače

Každý den po návratu z terénu je vhodné převést naměřená data z přijímače do počítače, data zálohovat na disketách a uvolnit paměť přijímače pro další měření. Převod dat z přijímače do počítače se provádí prostřednictvím programu T 4000. Každé měření musí obsahovat čtyři soubory: datový soubor (data file), soubor efemerid (ephemeris file), soubor informací o ionosféře (ION file) a informační soubor (message file).

7.7. Polní zpracování výsledků

K polnímu zpracování měřických dat slouží firemní software TRIMVEC-PLUS a lze jej provést na každém osobním počítači (PC) vybaveném matematickým koprocesorem a pamětí RAM 640 KB. Výsledkem polního zpracování jsou vektory spojnic jednotlivých měřených bodů (resp. složky vektoru dX, dY, dZ prostorové vzdálenosti) v systému WGS 84.



Elevation vs Time

Station : Dobruska

Latitude : 50° 17' 00" N

Longitude : 16° 10' 30" E

Date : 10 Aug 1992

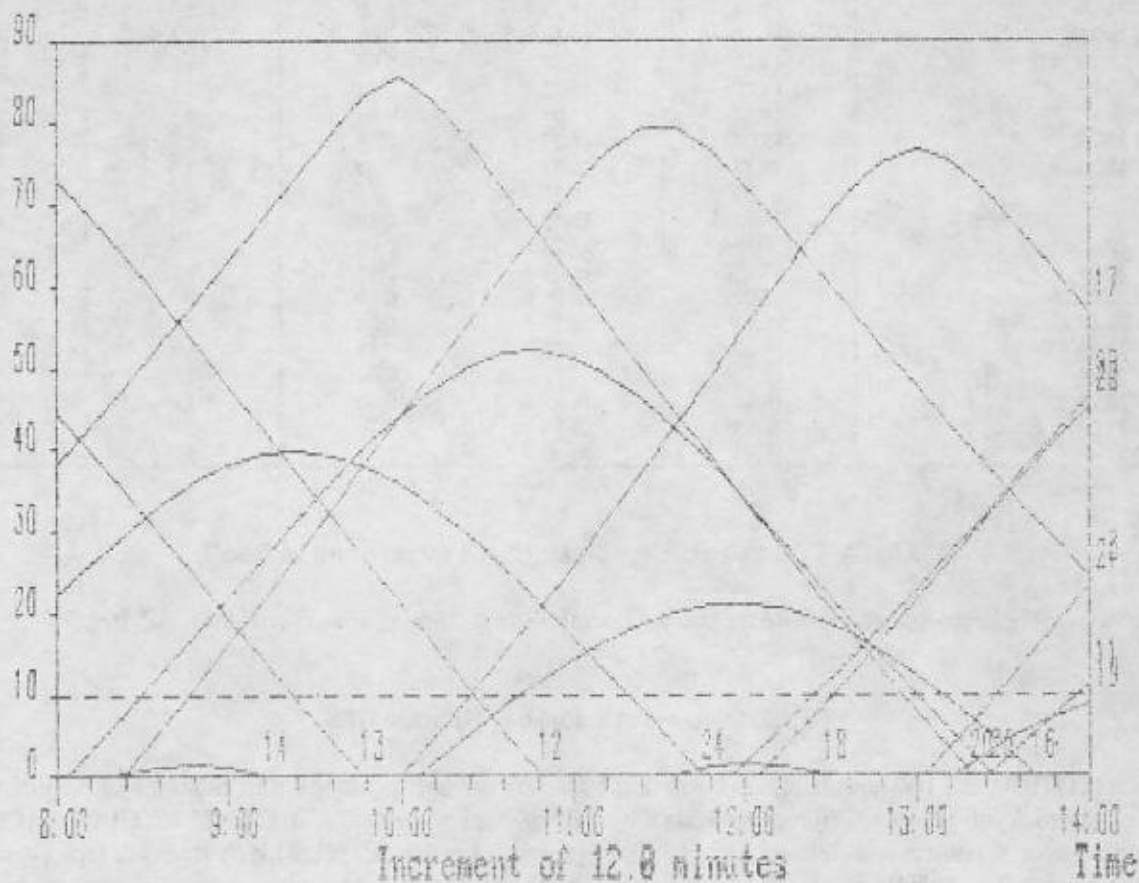
Zone : 2:00

Cut-off Elevation : 10

-- Cut-off Elevation

..... Behind Curtain

Elevation



Sats : 2, 3, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 28

Obr. 5. Graf závislosti výšky družic na čase

Kvalitu měření a přesnost určení vektoru charakterizují hodnoty RMS a Ratio. Součástí každého polního zpracování je výpočet uzávěrů nejčastěji trojúhelníků, které jsou dalším důležitým kritériem pro posouzení kvality měření. Výpočetní soubory opět zálohujeme na disketách. Na základě výsledků a rozborů kvality a přesnosti měření operativně upravujeme plán dalšího měření. Polní kancelář opouštíme až po dokončení všech polních výpočtů a rozborů přesnosti.



Azimuth vs Time

Station : Dobruska

Latitude : 50 17' 00" N Longitude : 16 18' 30" E

Date : 10 Aug 1992

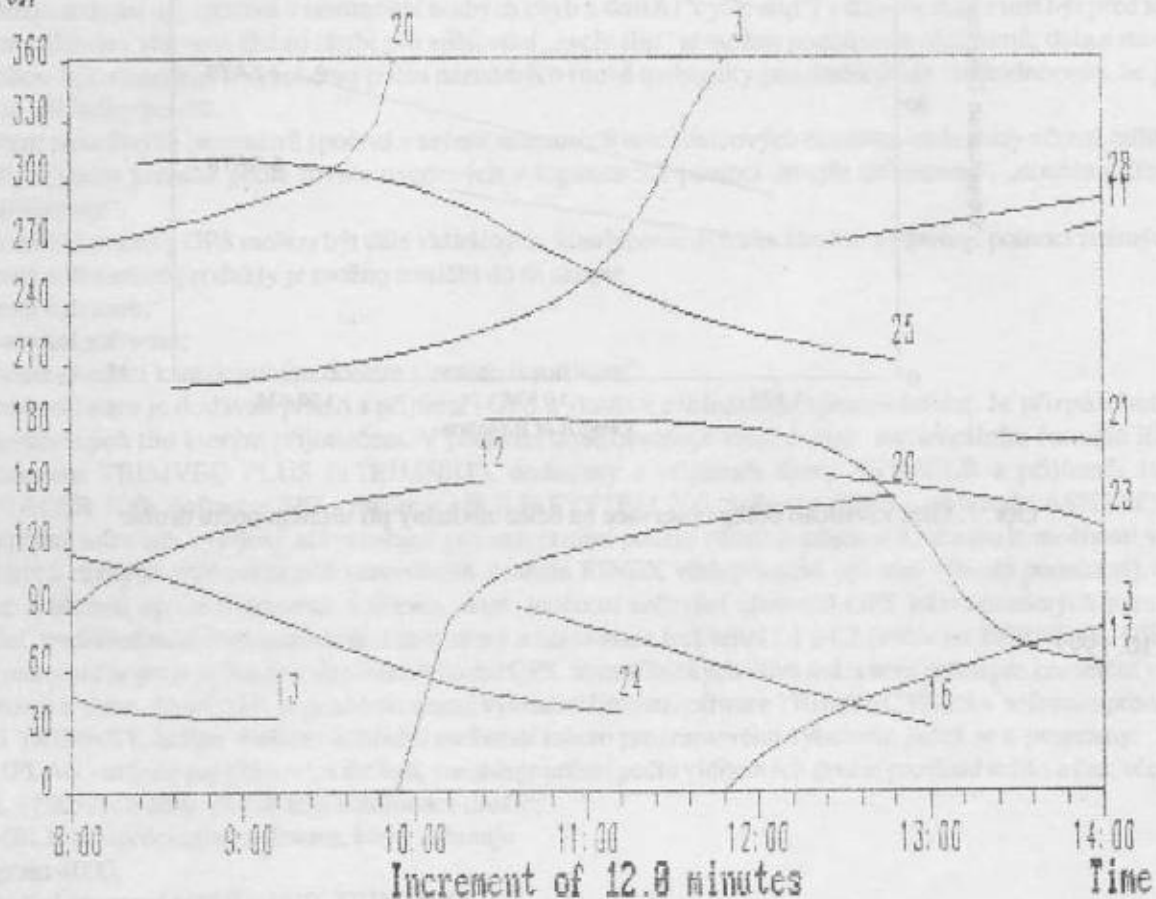
Zone : 2:00

Cut-off Elevation : 10

— Above Cut-off Elevation

..... Behind Curtain

Azimuth

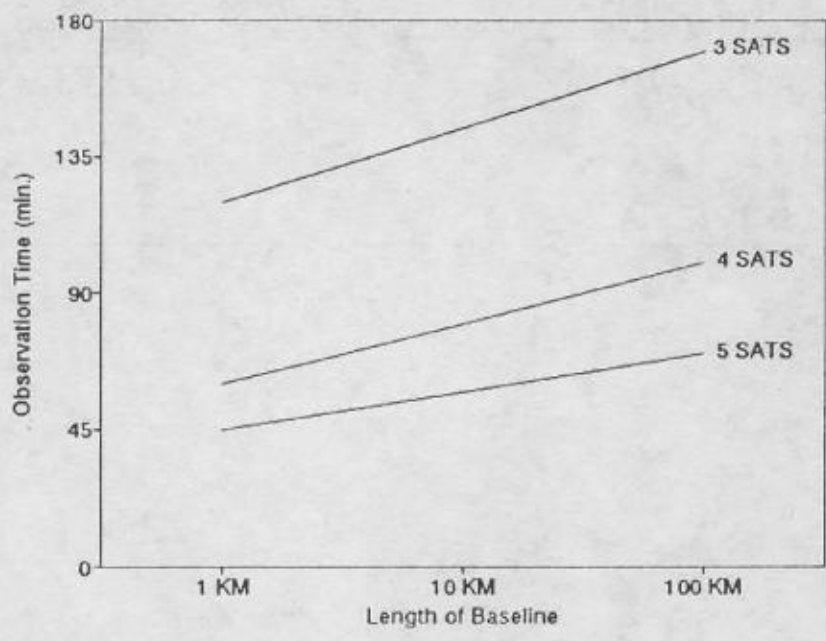


Svs : 2, 3, 6, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 28

Obr. 6. Graf závislosti azimutu družic na čase

7.8. Definitivní zpracování výsledků a vyrovnání sítě

Na základě polního zpracování výsledků jsou určené vektory definitivně zpracovány procesorem MBP-multi a síť vyrovnána programem TRIMNET.



Obr. 7. Graf závislosti délky observace na délce základny při určitém počtu družic

Došlo 2. 10. 1992

8. Zpracování měření GPS a jeho softwarové zabezpečení

Zpracování dat GPS může být rozděleno do tří oblastí

- dekodování dat;
- předzpracování dat;
- určení neznámých parametrů (vyrovnání).

a) Dekodování dat spočívá v převodu dat poskytovaných přijímačem do formátu požadovaného softwarem GPS.

b) Předzpracování dat spočívá v odstranění hrubých chyb a skoků ("cycle slip") v datech; data musí být před samotným výpočtem základny zbavena těchto chyb; pro zjišťování „cycle slip“ je možno použít řadu algoritmů; data s mnoha cycle slipy mohou být vzhledem k vysokému počtu neznámých (nové ambiguity pro družici) tak znehodnocena, že jich nelze k výpočtu základny použít.

c) Určení neznámých parametrů spočívá v určení samotných souřadnicových rozdílů a ambiguity včetně odhadu jejich přesnosti; výpočet probíhá podle rovnic uvedených v kapitole 5.2 pomocí „single difference“, „double difference“ či „triple difference“.

Takto určené vektory GPS mohou být dále vkládány do kombinovaných sítí, které se vyrovnají pomocí známých metod.

Samotné softwarové produkty je možno rozdělit do tří skupin

- firemní software;
- univerzitní software;
- software sloužící k výzkumným účelům ("research software").

Firemní software je dodáván přímo s přijímači GPS a slouží k základnímu zpracování dat. Je přizpůsoben formátu dat poskytovaných tím kterým přijímačem. V poslední době obsahuje vstup i v tzv. univerzálním formátu RINEX, tj. např. software TRIMVEC PLUS (+TRIMNET), dodávaný s přijímači firmy TRIMBLE a přijímači licenčními (GEOTRACER 100), software SKI - přijímače WILD SYSTEM 200, software GPPS - přijímače ASHTECH.

Univerzitní software, vyvíjený univerzitami pro univerzální použití různých přijímačů, obsahuje možnosti vstupu dat ve formátech různých typů přijímačů (zavedením formátu RINEX však přestává být tato výhoda podstatná). Obsahuje rozšířené možnosti oproti firemnímu softwaru, např. možnost určování efemerid GPS jako neznámých parametrů při vyrovnání, rozšířené možnosti modelování atmosféry a kombinace frekvencí L1 a L2 (software BERNESE, GIPSY).

Výzkumný software je určen pro hlubší analýzu dat GPS, atmosférických vlivů atd. a není určen pro komerční využívání.

Vzhledem k tomu, že v ČSFR je používán dosud výhradně firemní software TRIMVEC PLUS + software pro vyrovnání sítí GPS TRIMNET, budou uvedeny základní možnosti tohoto programového vybavení; jedná se o programy:

TRIMPLAN - určený pro plánování měření, umožňuje určení počtu viditelných družic pro dané místo a čas, včetně jejich azimutů, výškových úhlů, PDOP této kombinace družic;

TRIMBLE postprocessing software, který zahrnuje

- program 4000,
- manuální zpracování (TRIM640, TRIMMBP),
- „batch processing“, které dovoluje spouštět programy TRIMMBP, TRIM640 v batch modu.

Program 4000 umožňuje

- nahrávání dat z přijímače do počítače,
- prohlížení datových souborů,
- vytváření a modifikaci plánování relací pro přijímače,
- automatické zpracování měření GPS (TRIM640, TRIMMBP),
- korekci (měřené šikmé) výšky antény,
- prohlížení a sumarizaci výstupních souborů;

TRIM640 - Single-Baseline-Processor umožňuje zpracování dat měřených simultánně dvěma přijímači; vytváří tři výsledkové soubory: „triple difference“ řešení, „double difference float“ (s reálnými ambiguitami) řešení a „double difference fixed“ (s celými ambiguitami) řešení; možnosti v manuálním zpracování jsou obdobné jako u TRIMMBP;

TRIMMBP - Multiple-Baseline-Processor umožňuje:

zpracování dat měřených simultánně několika přijímači; vytváří tři výsledné soubory: „triple difference“ řešení, „double difference float“ řešení a „double difference optimum“ řešení, obsahující buď „double difference float“, nebo „fixed“ řešení.

Tento program umožňuje zároveň

- binární výstup v SSF (Standard Storage File) formátu,
- zpracování kinematických měření (pseudokinematické, spojitě kinematické, pseudostatické),
- grafický výstup měřených dat,

- možnost grafického odstraňování „cycle slip“,
- možnost zpracování na L1, L2, L1/L2 ("iono-free") či L1-L2 ("wide lane"),
- vstup a výstup ve formátu RINEX,
- použití přesných efemerid,
- modelování troposféry (modely Hopfieldův či Mariniho),
- automatické odstraňování „cycle slip“ pro L1 nebo L1-L2 (verze E).

TRIMKIN - umožňuje automatické zpracování dat zaměřených v pseudostatickém, pseudokinematickém a spojitým kinematickém režimu.

TRIMSDB - databázový program, který umožňuje rychlý přístup k informacím o kontrolních bodech produkovaných různými geodetickými institucemi. Umožňuje editovat nevyrovnané souřadnice bodů generované výše uvedenými softwary včetně informací o vektorech GPS;

TCLOSE - umožňuje počítat uzávěry obrazců složených z měřených vektorů GPS;

TMAP - poskytuje grafické informace o vektorech určených výše uvedenými softwary;

Geoid91a - umožňuje počítat výšky geoidu vzhledem k elipsoidu WGS 84 pomocí modelu OSU91a;

TRIMSUM - umožňuje sumarizaci měřených vektorů;

TRIMNET - program umožňuje vyrovnaní sítě vektorů GPS. Tento program automaticky čte výstupy z TRIM640 a binární výstupy z TRIMMBP a konstruuje síť těchto vektorů.

Program kromě editací a prohlížení umožňuje

- vyrovnaní volné a vázané sítě,
- transformace mezi různými souřadnicovými systémy a různými kartografickými zobrazeními (uživatelé definované transverzální Mercatorovo zobrazení UTM, Lambertovo konformní kuželové zobrazení atd.),
- ukládání vyrovnané sítě pro další analýzy,
- výběr váhování jednotlivých měření,
- možnost volby nebo definování rozměrů referenčního elipsoidu.

V současné době je již vyvinut program TRIMNET PLUS umožňující kombinované zpracování (vyrovnaní) měření GPS a terestrických měření.

Přístup k jednotlivým výše uvedeným programům je buď přímo z klávesnice, nebo pomocí menu (v nové verzi E).

Výše uvedené programové vybavení je např. instalováno ve VTOPÚ Dobruška.

Je zřejmé, že zpracování dat vyžaduje od operátora znalosti z problematiky GPS a vyrovnaní geodetických sítí.

V současné době je zainteresovanými institucemi řešena aktuální otázka ukládání a výměny dat GPS.

Došlo 26. 11. 1992

9. Aplikace technologií GPS v topograficko-geodetickém zabezpečení

Jednotlivé technologie měření pomocí aparatur GPS mají své specifické uplatnění v různých druzích topograficko-geodetického zabezpečení vojsk (TGZ) a v geodetické praxi.

Měření ve statickém režimu

Lze ho použít ve všech druzích TGZ. Tato metoda dává dobré výsledky s geodetickou přesností, ale měření je časově náročnější než ostatní technologie měření pomocí GPS.

Tato metoda měření je nejvhodnější pro následující práce v geodetické praxi:

- budování geodetických sítí od lokálních až po síť nultého řádu,
- zhušťování bodového pole při obnově a údržbě trigonometrických sítí,
- zaměřování průběhu státních hranic a jejich připojení k trigonometrické síti,
- určování souřadnic geodetických bodů v systému WGS 84 pro výpočty transformačních vztahů pro převod souřadnic bodů určených GPS do používaných vojenských a civilních souřadnicových systémů,
- určování průběhu geoidu a zpřesnění průběhu kvazigeoidu,
- určování polohy vlčovacíh bodů pro analytickou aerotriangulaci.

V topografickém zabezpečení lze tuto metodu použít pro následující práce:

- připojování prvků sestav druhů vojsk,
- budování speciálních sítí,
- zaměřování bodů na trasách přesunů,
- zjišťování objektů topografického průzkumu,
- navádění střel a zjišťování cílů.

Měření v pseudostatickém režimu

Dává dobré výsledky s geodetickou přesností, je rychlejší než metoda statická, ale je náročnější na přesun přístrojů z bodu na bod, tj. na dopravu. Proto je vhodnější její použití při určování rozdílů souřadnic blízkých bodů.

Tuto metodu lze s úspěchem použít pro doplňování bodového pole a údržbu bodů na státních hranicích.

Měření v kinematickém režimu (metoda STOP and GO a kontinuální)

Je to metoda rychlého určování souřadnic bodů, která je nejvhodnější pro podrobné mapování. Podmínkou je znalost souřadnicových rozdílů výchozí základny na začátku měření.

Je však omezena tím, že v blízkosti zaměřovaných bodů nesmějí být větší překážky (stromy, budovy ...), aby nebyl přerušen signál při přechodu z jednoho bodu na druhý. Z tohoto hlediska je výhodná kombinace měření GPS s klasickým geodetickým měřením pomocí totální stanice, a to ve vybraných místech, kde by mohlo dojít k přerušení signálu.

Této metody lze s výhodou použít pro určování souřadnic vlčovacíh nebo polohopisných bodů, na kterých nelze provádět dlouhodobá měření statickou metodou (např. křižovatky silnic, železniční přejezdy atd.). V těchto případech by se v blízkosti určovaných bodů zaměřily statickou nebo pseudostatickou metodou pomocné excentrické body, z nichž by se vycházelo při kinematickém zaměřování určovaných bodů.

Kinematické metody lze využít i pro další práce, jako např.:

- určování souřadnic objektu kamery v okamžiku expozice v letecké fotogrammetrii,
- určování polohy objektů pro naplňování datové báze geodetického informačního systému,
- zaměřování profilů komunikací atd.

9.1. Praktické zkušenosti a poznatky při využívání systému GPS v TS Čs. armády

Za poměrně krátké časové období používání systému GPS v praxi (asi 7 měsíců, listopad 1992) je možné na základě četných testovacích měření uvést řadu poznatků a zkušeností se zaváděním technologie GPS do geodetické praxe v TS Čs. armády. Lze konstatovat, že zkušenosti získané během tohoto krátkého období potvrdily a potvrzují velké přednosti technologie GPS vzhledem ke klasickým geodetickým metodám, spočívající ve vyšší produktivitě, efektivnosti a účelnosti.

Výsledky zkoušek potvrdily, že při dobrém příjmu družicových signálů se výrazně zvyšuje produktivita práce jak při statické metodě, tak hlavně při možnosti využití kinematických metod a dále při omezených možnostech měření klasickými metodami vlivem špatného počasí (snížení viditelnosti způsobené mlhou, deštěm, sněhem apod.).

Výsledky zkoušek potvrdily, že dosažené přesnosti jsou adekvátní a v řadě případů i lepší než přesnosti získané klasickými geodetickými metodami.

V roce 1992 byly přístroje GPS nasazeny na dva hlavní úkoly:

1. Ve spolupráci s VÚGTK Zdíby, ZÚ Praha, SvF STU Bratislava, GKÚ Bratislava a VÚGK Bratislava byla zabezpečena celostátní měřická kampaň GPS - zaměření sítě nultého řádu - CS-NULRAD-92.

2. Zaměření souřadnic opěrných bodů pro určování souřadnic polohopisných (situačních) bodů analytickou aerotriangulací při tvorbě mapy geodetických údajů.

Zaměření sítě 0. řádu

Na zaměření sítě nultého řádu (viz obr. 2) se TS Čs. armády podílela třemi aparaturami GPS. Při těchto akcích velkého rozsahu se osvědčilo obsadit měřickou skupinu dvěma pracovníky (v podmínkách armády musela být skupina doplněna o řidiče vozidla) vzhledem k tomu, že na body astronomicko-geodetické sítě bylo třeba dopravit množství materiálu, a to zejména těžké akumulátory pro dlouhé denní observace.

Dále se osvědčila důkladná rekognoskace bodů, hlavně z hlediska dopravy na bod a zjištění observačních podmínek na bodě včetně určení překážek, jejich výšky a azimutu. To je důležité pro další plánování observací.

V této kampani použily měřické skupiny TS Čs. armády metodu plánovaného měření s manuálním spuštěním uživatelem. Při tomto způsobu jsou veškeré observace naplánovány do paměti aparatury GPS. Obsluha přístroj na bodě zapne, vyhledá v menu příslušnou naplánovanou relaci a tu spustí. Přístroj začne přijímat data podle naplánovaných časů pro danou relaci.

Tato metoda se osvědčila v tom, že naplánováním všech observací předem v kanceláři a možností kontroly nastavených parametrů se zamezilo vnesení chyb při spuštění přístrojů na bodech. Na bodě po spuštění každé relace musel operátor opravit nastavení hodnoty PDOP (pro měření byla stanovena na 10), protože po spuštění nové relace se hodnota PDOP změnila na standardní nastavení 7.

Zaměření opěrných bodů

Při nasazení aparatur GPS pro zaměřování opěrných bodů se používají také všechny tři přístroje, které má TS Čs. armády k dispozici. Přístroje jsou použity v jedné lokalitě a jednotlivé měřické skupiny mohou spolu úzce spolupracovat.

Zaměření bodů se provádí ve dvou etapách:

1. etapa představuje zaměření souřadnic identických bodů pro určení transformačního vztahu pro převod naměřených souřadnic z WGS 84 do S-1942.

2. etapa spočívá ve vlastním zaměření opěrných bodů a zhuštění bodového pole pro zaměření některých opěrných bodů klasickými metodami tam, kde se nedá použít metod GPS.

Jako identické body pro stanovení transformačního vztahu mezi WGS 84 a S-1942 se využívají trigonometrické body z daného území, přičemž se volí body umístěné přibližně v rozích a ve středu mapy 1 : 50 000. Na plochu zaměřované mapy 1 : 100 000 se tedy volí 13 identických bodů.

Opěrné body se zaměřují v relacích o délce 1,5 hodiny, a to tak, že jedna aparatura GPS (anténa) je umístěna na identickém bodě ležícím většinou nejbližší ke středu mapy 1 : 50 000 a dvě další aparatury GPS jsou postaveny na určované opěrné body. Tak je možno během jednoho dne zaměřit 5 až 8 opěrných bodů.

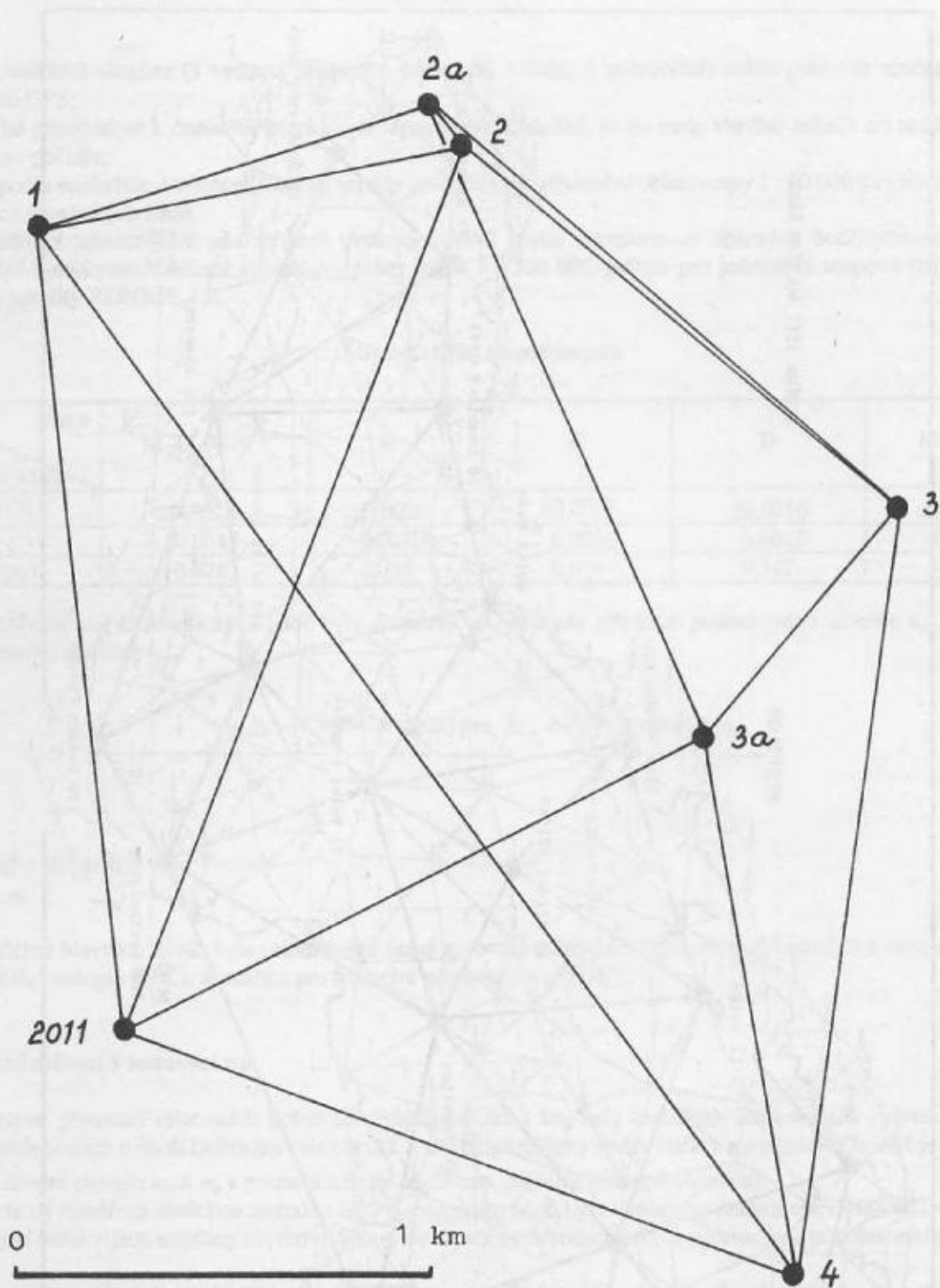
Naměřené hodnoty jsou zpracovávány firemním softwarem TRIMVEC PLUS a dále jsou též transformovány do systému 1942 předem určenými transformačními vztahy. Tyto transformační vztahy platí pro danou lokalitu a jsou využitelné pro další měření v tomto prostoru.

Z měření v terénu vplynuly některé poznatky pro zdokonalení této technologie určování opěrných bodů:

- velkou pozornost je nutno věnovat rekognoskaci bodů tak, aby vyhovovaly podmínkám pro měření; je vhodné se vyhnout bodům, na kterých jsou umělé signály (pyramida atd.);

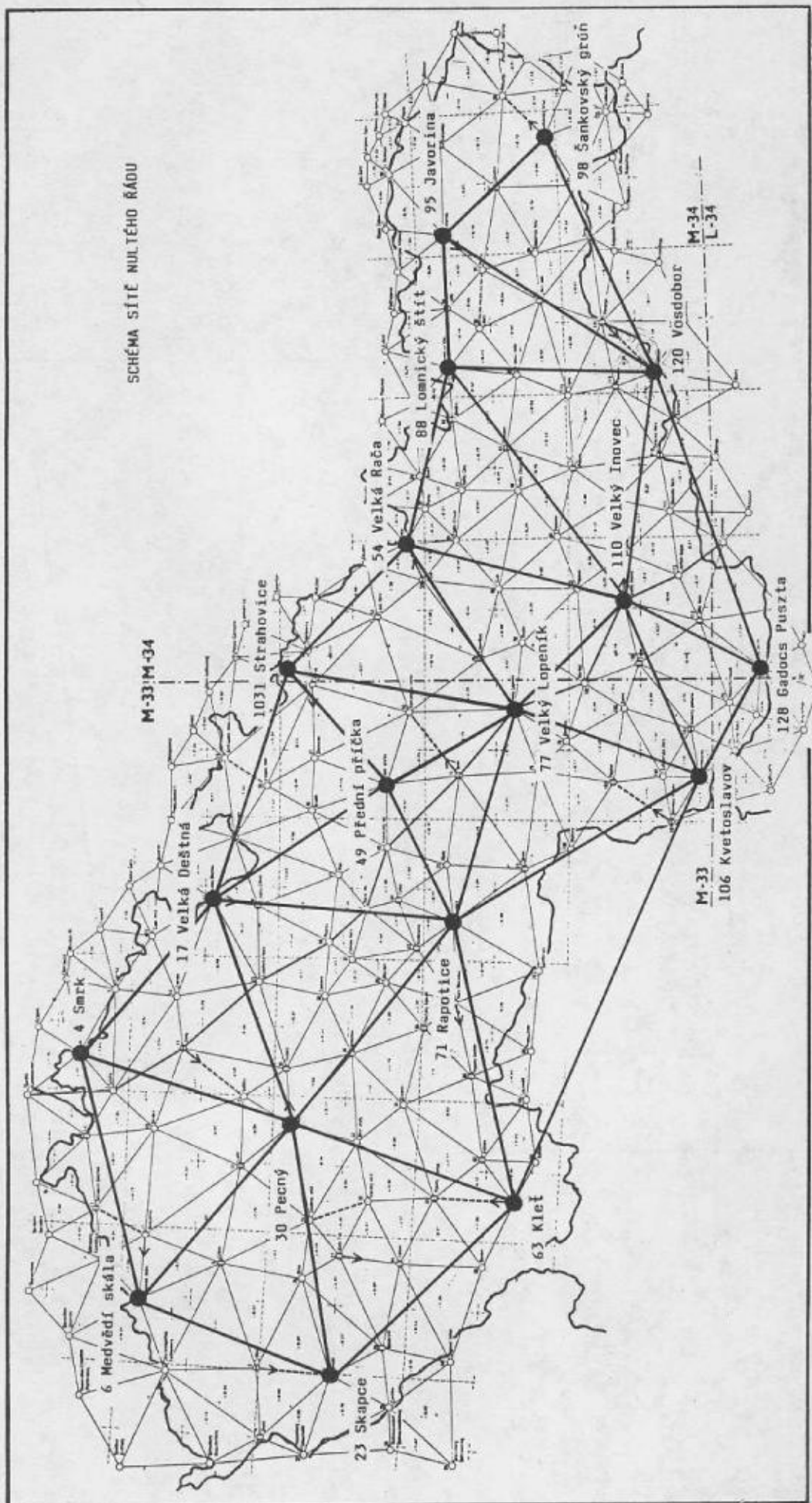
- po rekognoskaci bodu je nutno pečlivě naplánovat jednotlivé relace měření s ohledem na konfiguraci družic, čas měření a návaznost jednotlivých měření;

- v průběhu měření na identických bodech je vhodné stabilizovat pomocné body pro zaměření opěrných bodů a zpracovat místopisy těchto bodů; což je výhodné proto, že mohou na sobě nezávisle pracovat skupiny vybavené klasickou měřickou technikou anebo aparaturou GPS;



Obr. 1. Zkušební testovací síť

SCHÉMA SÍTĚ NULÉHO ŘÁDU



Obr. 2

- jedna měřická skupina (1 vedoucí skupiny - důstojník, 1 řidič, 3 pomocníci) může pracovat současně se třemi aparaturami GPS;

- je nutné přihlídnout k časovým nárokům na zpracování výsledků, proto bude vhodné zařadit do skupiny jednoho pracovníka - počítače;

- při výpočtu souřadnic v systému 1942 se nejvíce osvědčila transformační oblast mapy 1 : 50 000 s využitím všech pěti zaměřených identických bodů.

V následující tabulce jsou jako příklad uvedeny střední chyby transformace opěrných bodů pomocí prostorové podobnostní transformace určené jednak pro celou mapu 1 : 100 000, jednak pro jednotlivé mapové listy 1 : 50 000 v prostoru lokality KONICE.

Střední chyby transformace

Mapa	M-33-94-A	B	C	D	M-33-94
Stř. chyby trf. klíče					
m_B (")	±0,0012	±0,0020	±0,0015	±0,0016	±0,0021
m_L (")	0,0015	0,0030	0,0013	0,0015	0,0023
m_h (m)	0,074	0,035	0,076	0,117	0,142

V zaměřované síti 13 identických bodů byly dosaženy tyto hodnoty středního prostorového uzávěru u_{prost} a středního souřadnicového uzávěru u_{xyz}

$$u_{\text{prost}} = \frac{\sum u_{(\text{prost})i}^2}{n} = \pm 0,031 \text{ m}, \quad u_{\text{xyz}} = \frac{u_{\text{prost}}}{\sqrt{3}} = \pm 0,018 \text{ m},$$

kde

$$n = 10,$$

$$u_{(\text{prost})i}^2 = dX_i^2 + dY_i^2 + dZ_i^2,$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

Vedle těchto hlavních úkolů byla uskutečněna četná testovací měření ke stanovení nevhodnějších metod měření pro standardní technologie TS Čs. armády a pro testování přesnosti metod GPS.

Zkušební měření v testovací síti

Pro analýzu přesnosti relativních poloh na vzdálenosti do 2 km byla zaměřena testovací síť, vytvořená na trigonometrických bodech v okolí Dobrušky (viz obr. 1). V síti byly změřeny směry i délky a souřadnice bodů byly prozatímně určeny se střední chybou m_x a m_y v rozmezí ±3 mm až ±9 mm (síť bude dále zpřesňována).

Dále byla síť zaměřena statickou metodou GPS a souřadnice bodů byly vypočteny softwarem TRIMNET v S-1942/83. V následující tabulce jsou uvedeny zbytkové opravy na identických bodech určené prostorovou podobnostní transformací.

Rozdíly mezi souřadnicemi bodů určených GPS a geodetickým měřením (zbytkové opravy z transformace)

Číslo bodu	Posun dB		Posun dL		Posun dH (mm)
	(mm)	(")	(mm)	(")	
2011	4	0,0001	-2	-0,0001	-3
1	-9	0,0003	-15	-0,0008	7
2	-2	0,0001	6	0,0003	6
3	0	0,0000	3	0,0002	-1
4	9	0,0003	-9	-0,0004	-12
2A	3	0,0001	9	0,0003	-11
3A	-5	-0,0002	11	0,0006	26

Z měření v síti byly dosaženy následující hodnoty středního prostorového uzávěru a středního souřadnicového uzávěru:

$$u_{\text{prost}} = \pm 0,005 \text{ m}, u_{\text{xyz}} = \pm 0,003 \text{ m}$$

pro $n = 8$.

Zkušební měření v testovacím trojúhelníku o středně dlouhých stranách

Cílem měření GPS v trojúhelníku bodů TROJICE - DOBROŠOV - POLOM bylo ověřit přesnost určování relativní polohy s využitím statické metody na středně dlouhých stranách nad 10 km a posoudit vliv ionosféry a troposféry při různých způsobech výpočtů. V tabulce jsou uvedeny střední chyby m_B , m_L , m_h určené z transformace mezi WGS 84 a S-1942/83 a ze souřadnic ve WGS 84, vypočtených třemi způsoby:

1. výpočet na jedné frekvenci L1;
2. „wide-lane“ řešení (částečné vyloučení ionosféry);
3. „iono-free“ řešení (vyloučení ionosféry).

Řešení	m_B (")	m_L (")	m_h (m)
1	$\pm 0,0020$	$\pm 0,0024$	$\pm 0,002$
2	0,0008	0,0013	0,001
3	0,0006	0,0007	0,001

Malé hodnoty středních chyb ve výškách m_h jsou důsledkem toho, že transformační klíč je určen pouze na 3 bodech, kterým se celý model přizpůsobí.

V trojúhelníku byly dosaženy tyto hodnoty prostorového a souřadnicového uzávěru:

Řešení	1	2	3
u_{prost} (m)	$\pm 0,090$	$\pm 0,071$	$\pm 0,055$
u_{xyz} (m)	0,052	0,041	0,032

Zkušební měření v kinematickém režimu

Zkoušky kinematického měření se uskutečnily na testovacím polygonu v blízkosti Dobrušky, který má 11 bodů.

Měření se uskutečnilo s těmito cíli:

- získat praktické zkušenosti s touto metodou;
- ověřit možnost jejího využití v geodetické praxi;
- ověřit její přesnost vzhledem ke geodetické přesnosti;
- porovnat produktivitu kinematické metody s klasickými geodetickými metodami;
- ověřit vliv příjmu signálů a počet měřených epoch na přesnost.

Zkušební měření potvrdila vysokou produktivitu (5x až 10x vyšší než klasická geodetická měření) i přesnost v určování polohy polygonových bodů. V následující tabulce jsou uvedeny prostorové vzdálenosti mezi polygonovými body určené klasickým geodetickým měřením a vypočtené vzdálenosti ze souřadnicových rozdílů určených pomocí GPS v kinematickém režimu.

Rozdíly délek určených geodeticky a GPS v kinematickém režimu

z bodu	Délka na bod	Metoda určení		Rozdíl D – GPS (mm)
		geodeticky (m)	GPS (m)	
1	2	654,310	654,297	13
			,298	12
2	3	288,822	288,841	-19
			,906	-84
3	4	662,964	662,923	78
			,964	37
4	5	577,130	577,128	-2
5	6	449,122	449,164	-42
6	7	444,757	444,742	15
9	10	247,902	247,902	0
10	11	154,383	154,405	-22

Velkým problémem omezujícím širší využití kinematických metod v praxi jsou možné ztráty družicových signálů způsobené terénními překážkami během přesunu z bodu na bod. I při našich testovacích měřeních se vyskytly ztráty signálů. Z uvedených důvodů bude vhodné kombinovat kinematická měření GPS s klasickými geodetickými metodami.

Testovací měření s navigačními přijímači

V nedávné době byla provedena testovací měření se zapůjčenými navigačními přijímači GPS TRIMPACK od firmy TRIMBLE NAVIGATION a GPR 11 od firmy MESIT Uherské Hradiště.

Měření potvrdila výrazné přednosti přijímačů GPS, a tedy i celého systému GPS pro navigační určování polohy, spočívající zejména:

- v možnosti určování polohy v reálném čase,
- ve vysoké spolehlivosti navigačních přijímačů i dostatečné přesnosti určování polohy,
- v komplexním a víceúčelovém využití přijímačů (zejména TRIMPACKU) pro navigaci dopravních a bojových prostředků.

Výsledky testů potvrdily přesnost určování polohy v reálném čase asi do 50 m.

Došlo 20. 9. 1992

10. Určení místních měřítkových a úhlových změn v polohovém bodovém poli

V posledních dvou letech dochází k podstatným změnám ve vývoji základního polohového bodového pole (ZPBP) na území ČSFR. V roce 1991 bylo zahájeno budování moderních geodetických základů družicovými metodami a v r. 1992 byla zaměřena tzv. síť nultého řádu. Přes tento vítaný pokrok je zřejmé, že se bude ještě řadu let používat ZPBP v S-1942/83. Bodové pole se bude udržovat, obnovovat a doplňovat převážně pomocí družicových metod založených na systému GPS-NAVSTAR. Protože jde o spojování dvou různorodých a zcela odlišných metod a geodetických systémů, bude účelné sledovat při začleňování družicových měření do klasicky budovaného ZPBP deformace a rozdíly obou typů bodových polí. Článek se zabývá některými postupy družicových měření a jejich dílčím zpracováním tak, aby mohly být použitelné jak ke spojení se současným bodovým polem, tak ke sledování vývoje bodového pole i k budování samostatné družicové sítě.

10.1. Měřické metody

K zaměřování bodových polí družicovými metodami je možno volit různé postupy v závislosti na požadované relativní polohové přesnosti určovaných bodů a na kvalitě a počtu současně používaných měřických stanic. Značný vliv na postup měření má také druh bodového pole, které se zhušťuje. Jednodušší je patrně budování homogenní družicové sítě než obnova bodů v dosavadním ZPBP v S-1942/83.

Dále jsou uvedeny některé způsoby zaměřování bodového pole v závislosti na počtu společně používaných měřických stanic.

a) Dvě měřické stanice

Na obr. 1 až 5 jsou schematicky znázorněny některé typy zaměřování bodového pole se dvěma stanicemi. Obr. 1 představuje relativně spolehlivé určení 6 bodů z 11 společných měření. Na obr. 2 je spojeno 8 dvojic měření k určení 5 bodů. Síť je připojena ke 3 daným bodům. Na dalších dvou obrázcích, 3 a 4, jsou nakreslena vhodná určení 3 až 4 bodů v daném trojúhelníku a čtyřúhelníku.

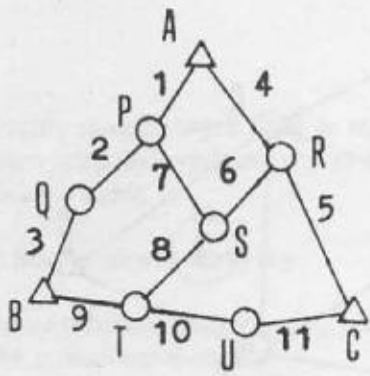
Uvedené způsoby ukazují na různé možnosti určení polohy bodů mezi 3 a 4 danými body staré sítě. Obrázek 5 znázorňuje jen určení jednoho bodu mezi 3 a 4 body. Jde o metody zachovávající homogenitu obnovované části ZPBP.

b) Tři měřické stanice

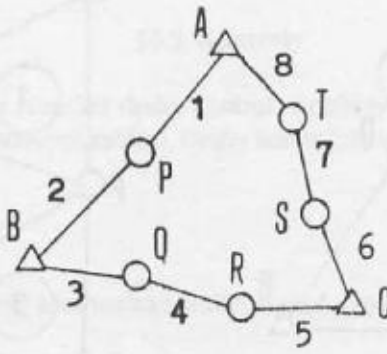
Společné použití tří měřických stanic dává lepší předpoklad k výběru metod a organizaci měřických prací, ale i k dosažení kvalitnějšího určení polohy bodů. Příklady projektů sítí a volba jejich elementárních částí jsou uvedeny na obr. 6 až 11. Skupiny bodů měřené společně jsou označeny čísly v kroužcích. Obr. 6 představuje spolehlivé určení jednoho bodu ze 4 daných bodů ve dvou etapách. Na obr. 7 je určováno pět bodů s celkovým počtem pěti dílčích měřických etap. Síť je přitom navázána na 4 dané body. Obr. 8 znázorňuje určení 3 bodů připojených na 3 dané body ve 3 měřických etapách. Jiné projekty určení tří bodů jsou schematicky zakresleny na obr. 9, 10 a 11. Síť na obr. 9 a 10 jsou jen jinými variantami projektu z obr. 8, kde na každém určovaném bodě je měřická stanice jen jednou. Na obr. 9 jsou měřické stanice umísťovány na určovaných bodech dvakrát a podle projektu na obr. 10 dokonce třikrát. Relativně značně spolehlivé je určení tří bodů ze šesti daných pomocí 4 měřických etap na obr. 11.

c) Čtyři a více měřických stanic

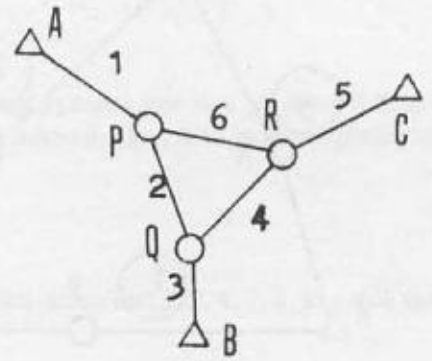
K nasazení čtyř a více měřických stanic nejsou zatím zvlášť výhodné předpoklady. Vznikají značné nároky na společné nasazení většího počtu přístrojů a s tím spojených problémů s počtem vozidel a dokonalou organizací práce. Přesto je pro úplnost uvedeno na obr. 12 až 18 několik schémat projektů sítí skládajících se z elementárních částí společně používaných čtyř nebo pěti měřických stanic. Vesměs jde o projekty určení jednoho až čtyř bodů ze tří až čtyř daných bodů. Nejjednodušší je určení jednoho bodu ze tří daných bodů (obr. 12). Obr. 13 ukazuje určení dvou bodů ze 4 daných ve dvou etapách. Obr. 14 představuje projekt určení tří bodů ze 3 bodů daných ve třech etapách. Na obr. 15 je uvedena možnost postupného určování bodů ze tří daných bodů, na kterých tři stanice jsou umístěny trvale, a jen čtvrtá stanice se přemisťuje na určované body. Obdobný je princip určení jednoho až tří bodů na obr. 16 až 18 pomocí společného nasazení pěti stanic



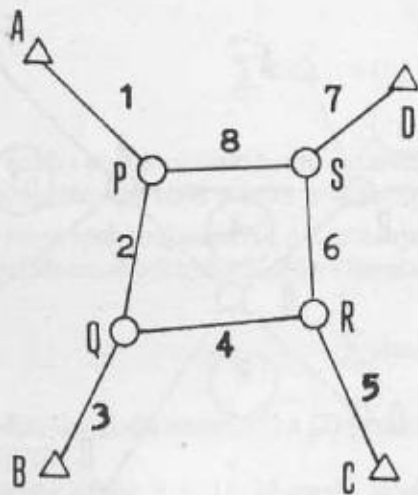
Obr. 1



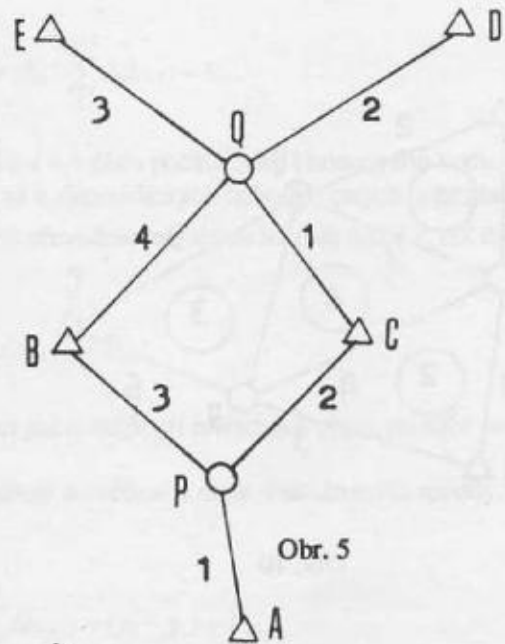
Obr. 2



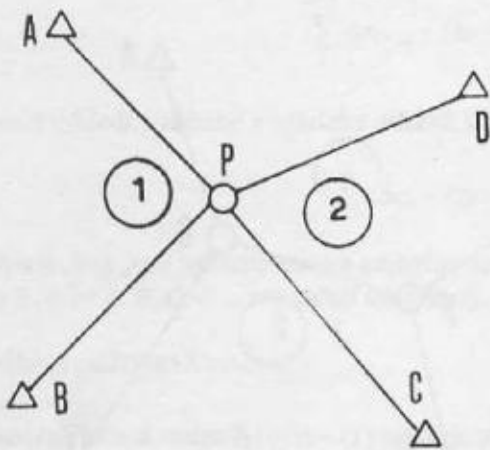
Obr. 3



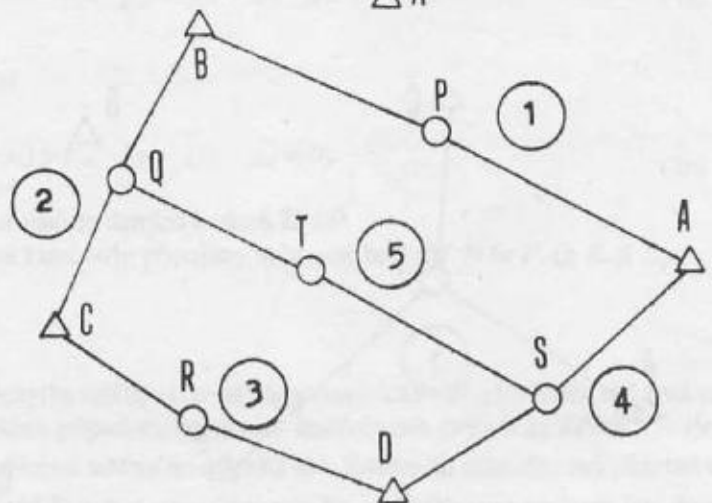
Obr. 4



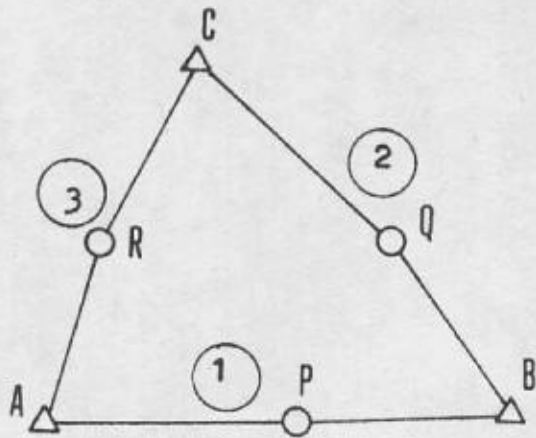
Obr. 5



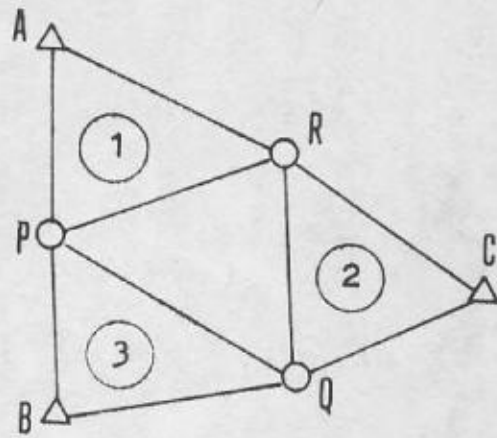
Obr. 6



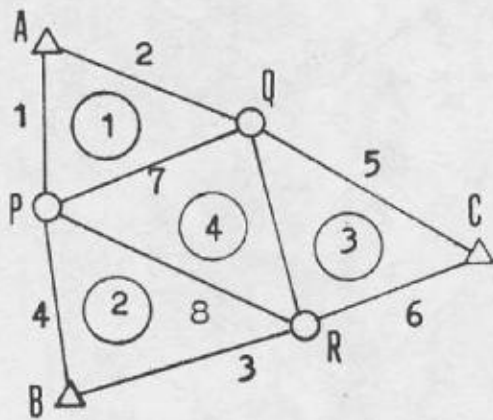
Obr. 7



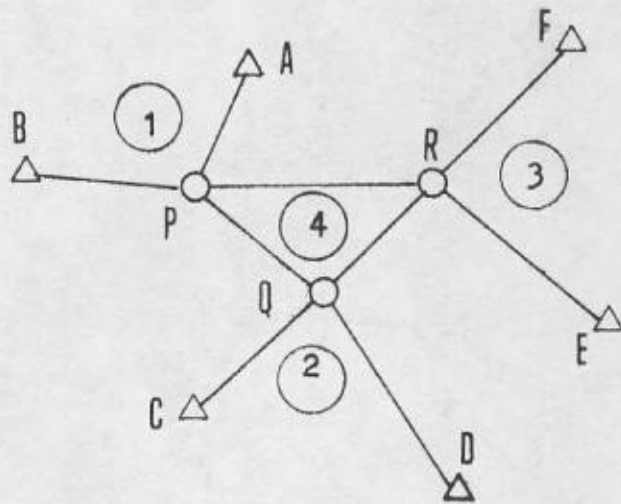
Obr. 8



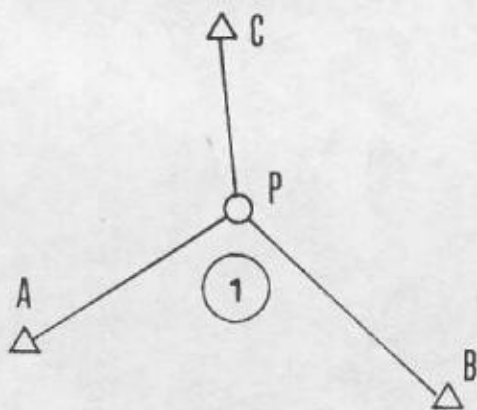
Obr. 9



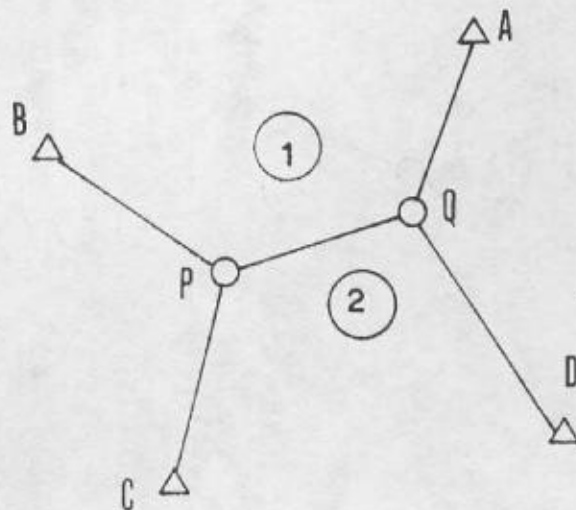
Obr. 10



Obr. 11



Obr. 12



Obr. 13

ve dvou etapách. Všechny body jsou určeny kontrolními měřeními, která dovolují udržovat vysoký stupeň homogenity dané části trigonometrické sítě bodů.

10.2. Kontroly

Kvalita zaměřovaných bodů se testuje různými druhy kontrol. Kontroly mají význam zejména při obnově úhlových a délkových polohových sítí pomocí družicových měření. Druhy kontrol závisí mimo jiné na počtu současně používaných měřických stanic.

a) Souřadnicové odchylky

Pokud určované body vytvářejí uzavřené geometrické obrazce, např. typu částí sítí na obr. 1, 2, 4, 7, 8, je v nich možno sečítat souřadnicové rozdíly

$$\Delta X_{i+1,i} = X_{i+1} - X_i, \Delta Y_{i+1,i} = Y_{i+1} - Y_i, \Delta Z_{i+1,i} = Z_{i+1} - Z_i,$$

získané z měřických výsledků, a zjišťovat souřadnicové odchylky U_x, U_y, U_z

$$\sum_1^{n-1} \Delta X_{i+1,i} = U_x, \sum_1^{n-1} \Delta Y_{i+1,i} = U_y, \sum_1^{n-1} \Delta Z_{i+1,i} = U_z. \quad (1)$$

V rovnicích značí i pořadové číslo bodu v uzavřeném obrazci a $n = 1$ číslo počátečního i koncového bodu.

Při obnově a doplňování bodů v AGS je však lépe vycházet až z elipsoidických nebo rovinných souřadnic. Např. při použití rozdílů rovinných souřadnic $\Delta x, \Delta y$, získaných postupným převodem měřených rozdílů $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ do S-1942/83, se vypočtou souřadnicové odchylky \bar{U}_x, \bar{U}_y v Gaussově rovině

$$\sum \Delta x_{i+1,i} = \bar{U}_x, \sum \Delta y_{i+1,i} = \bar{U}_y. \quad (2)$$

Odvozené odchylky podle rovnic (1) a (2) poskytují informaci jen o velikosti měřických chyb, protože jsou nezávislé na současném ZPBP.

V jiných případech (obr. 7, 8, 11, 13 apod.) se přímo porovnávají naměřené a dané souřadnicové rozdíly. Obecně lze psát pro ně vztahy

$$\sum_1^{i-1} \Delta x_{j+1,j} - (x_K - x_L) = U_x, \sum_1^{i-1} \Delta y_{j+1,j} - (y_K - y_L) = U_y, \quad (3a)$$

zahrnující výsledky získané z několika měření, nebo

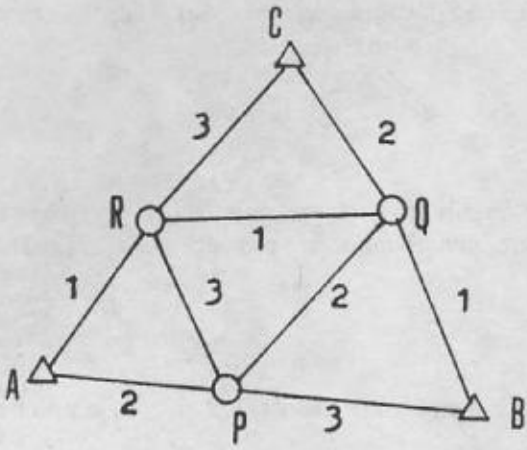
$$\Delta x_{ji} - (x_K - x_L) = U_x, \Delta y_{ji} - (y_K - y_L) = U_y, \quad (3b)$$

pro případy, kdy jsou měřické stanice umístěny současně na daných bodech ZPBP.

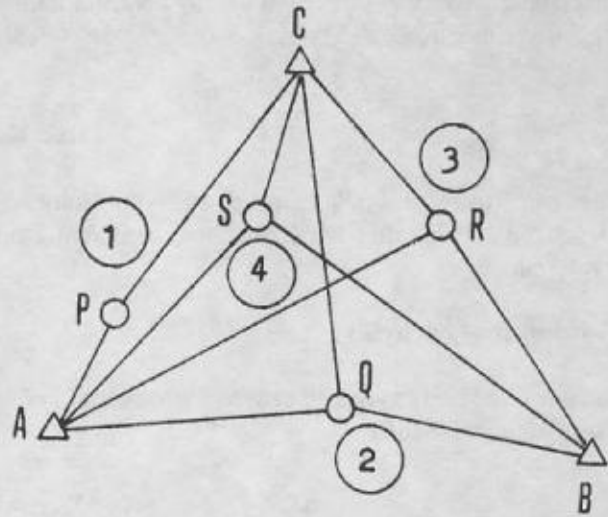
Indexy $K, L (= A, B, C, D \dots)$ označují dané body, na které byly připojeny určované body $M, N (= P, Q, R, S \dots)$.

b) Místní měřítková změna

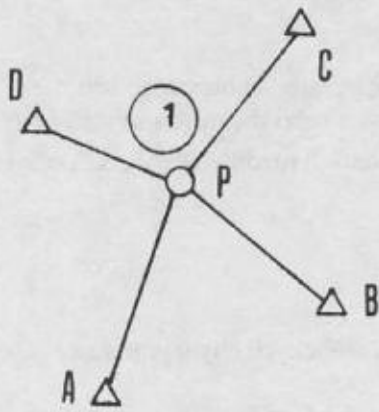
Místní měřítková změna $\delta\mu (= \mu - 1)$ vyjadřuje odchylku měřítka μ dané trigonometrické sítě od měřítka sítě družicových bodů. Měřítkovou změnu je vhodné zjišťovat ve všech případech spojování družicových měření se ZPBP v S-1942/83. K zachování homogenity ZPBP je nutné převést družicová měření do měřítka sítě. Změna $\delta\mu$ místního měřítka sítě vzniká součtem tří základních složek: původní deformací sítě $\delta\mu_1$, časovým faktorem $\delta\mu_2$ a měřítkovou změnou $\delta\mu_3$ družicové části sítě. Odvození vztahů pro výpočet měřítkové změny je uvedeno např. v [3], [4], [5].



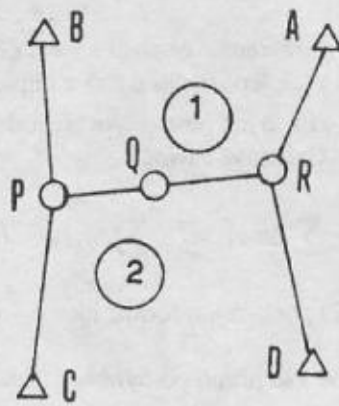
Obr. 14



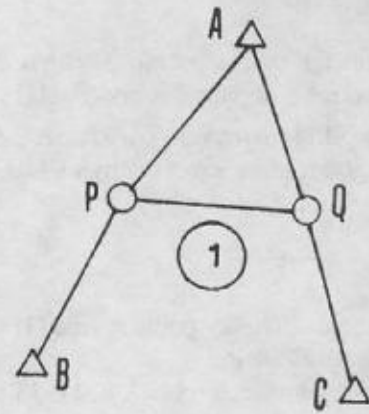
Obr. 15



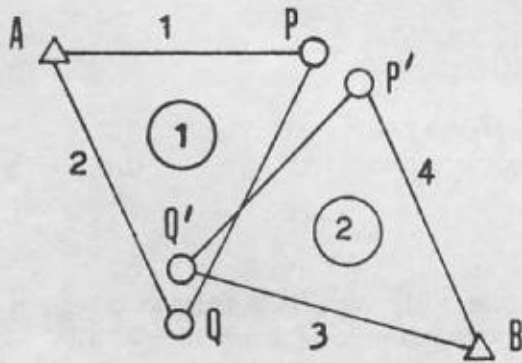
Obr. 16



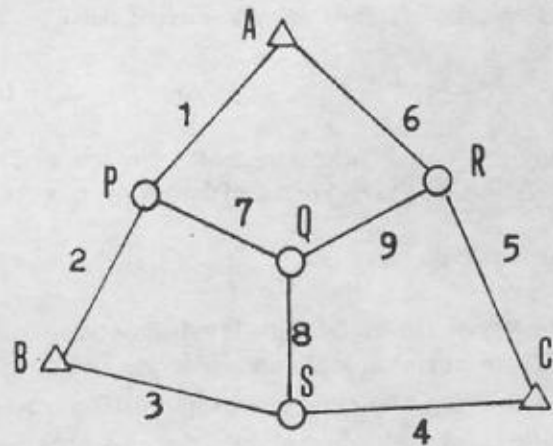
Obr. 17



Obr. 18



Obr. 19



Obr. 20

Nejjednodušší způsob určení místního měřítka sítě μ vychází z porovnání identických délek s_{ij} vypočtených z měřených souřadnicových rozdílů $\Delta x_{ji}, \Delta y_{ji}$ (3b) nebo jejich součtů (3a) a délek S_{ij} odvozených ze souřadnic daných bodů. Pak měřítko μ je dáno výrazem

$$\mu = \frac{1}{n} \sum \frac{S_{ij}}{s_{ij}}. \quad (4)$$

Vzhledem k tomu, že měřítková změna $\delta\mu$ se obecně mění v závislosti na směru, je žádoucí zavést měřítkovou změnu $\delta\mu_\sigma (= \mu_\sigma - 1)$ proměnnou se směrníkem σ . K jednoduchému a dostačujícímu určení měřítka sítě μ_σ lze použít tzv. měřítkové elipsy, odvozené již dříve pro délková měření v úhlových sítích [4]. Obecně je měřítko dáno rovnicí

$$\mu_\sigma = \frac{\mu_a \mu_b}{[\mu_a^2 \sin^2(\sigma - \varepsilon) + \mu_b^2 \cos^2(\sigma - \varepsilon)]^{0,5}}, \quad (5)$$

kde μ_a, μ_b jsou poloosy měřítkové elipsy a ε úhel, který svírá velká poloosa se směrem osy x .

Změnu měřítka $\delta\mu_\sigma$ vyjadřuje rovnice

$$\delta\mu_\sigma = \cos^2 \sigma \delta\mu_x + \sin^2 \sigma \delta\mu_y + \sin \sigma \cos \sigma \delta\mu_v, \quad (6)$$

kde

$$\begin{aligned} \delta\mu_x &= \cos^2 \varepsilon \delta\mu_a + \sin^2 \varepsilon \delta\mu_b, \\ \delta\mu_y &= \sin^2 \varepsilon \delta\mu_a + \cos^2 \varepsilon \delta\mu_b, \\ \delta\mu_v &= \sin 2\varepsilon (\delta\mu_a - \delta\mu_b). \end{aligned}$$

Pomocné parametry $\delta\mu_x, \delta\mu_y, \delta\mu_v$ umožňují linearizovat rovnice oprav pro výpočet parametrů elipsy měřítkového zkreslení.

Vztahy mezi nimi a poloosami $\delta\mu_a, \delta\mu_b$ a úhlem ε mají tvar

$$\begin{aligned} \delta\mu_a &= \frac{1}{2} (\delta\mu_x + \delta\mu_y + \frac{\delta\mu_v}{\sin 2\varepsilon}), \quad \delta\mu_b = \frac{1}{2} (\delta\mu_x + \delta\mu_y - \frac{\delta\mu_v}{\sin 2\varepsilon}), \\ \varepsilon &= \frac{1}{2} \arctg \frac{\delta\mu_v}{\delta\mu_x - \delta\mu_y}. \end{aligned} \quad (7)$$

K určení místního měřítka porovnáváme délky vypočtené v dané oblasti ZPBP a délky vypočtené z rovinných souřadnic družicové sítě. Např. podle obr. 1 jsou to délky s_{AB}, s_{BC}, s_{AC} a podle obr. 4 $s_{AB}, s_{BC}, s_{CD}, s_{AD}$. Rovnice oprav jsou

$$v_{AMN} = -S_{MN} \cos^2 \sigma_{MN} \delta\mu_x - S_{MN} \sin^2 \sigma_{MN} \delta\mu_y - S_{MN} \sin \sigma_{MN} \cos \sigma_{MN} \delta\mu_v + S_{MN} - s_{MN}, \quad (8)$$

kde S_{MN} jsou délky mezi danými body M, N odvozené ze souřadnic ZPBP a s_{MN} odpovídající délky z družicové sítě.

Označíme-li

$$\begin{aligned} a_{AMN} &= -S_{MN} \cos^2 \sigma_{MN}, \quad b_{AMN} = -S_{MN} \sin^2 \sigma_{MN}, \\ c_{AMN} &= -S_{MN} \sin \sigma_{MN} \cos \sigma_{MN}, \quad l_{AMN} = S_{MN} - s_{MN}, \end{aligned}$$

nabývá rovnice oprav známého obecného tvaru

$$v_{AMN} = a_{AMN} \delta\mu_x + b_{AMN} \delta\mu_y + c_{AMN} \delta\mu_v + l_{AMN}. \quad (9)$$

Z rovnice oprav sestavíme normální rovnice

$$[paa] \delta\mu_x + [pab] \delta\mu_y + [pac] \delta\mu_v + [pall] = 0, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} [pab] \delta\mu_a + [pbb] \delta\mu_b + [pbc] \delta\mu_c + [pbl] &= 0, \\ [pac] \delta\mu_a + [pbc] \delta\mu_b + [pcc] \delta\mu_c + [pcl] &= 0. \end{aligned}$$

Váhy p_{MN} se volí zpravidla stejné a rovny jedné. Z rovnic se vypočtou neznámé parametry $\delta\mu_a$, $\delta\mu_b$, $\delta\mu_c$ a z nich podle vztahů (7) délkové změny $\delta\mu_a$, $\delta\mu_b$ ve směrech poloos měřítkové elipsy a úhel pootočení ε velké poloosy μ_a vůči souřadnicové ose x . Při výpočtu úhlu ε je třeba správně volit kvadrant, v kterém leží.

c) Místní úhlová změna

Ze směrníků σ_{MN} spojnic daných bodů M, N v ZPBP a odpovídajících směrníků α_{MN} odvozených ze souřadnic stejných bodů určených družicově se počítají úhlové rozdíly $\delta\sigma_{MN}$ pomocí jednoduchého výrazu

$$\delta\sigma_{MN} = \sigma_{MN} - \alpha_{MN}. \quad (11)$$

Protože rozdíly $\delta\sigma_{MN}$ se mění i v závislosti na velikosti směrníků σ_{MN} , je účelné použít k dosažení potřebné spolehlivosti průběhu úhlových změn opět elipsy úhlového zkreslení, odvozené obdobnými rovnicemi jako při určování měřítkových změn. Opravy $v_{\sigma_{MN}}$ mají obecný tvar

$$v_{\sigma_{MN}} = a_{\sigma_{MN}} \delta\sigma_x + b_{\sigma_{MN}} \delta\sigma_y + c_{\sigma_{MN}} \delta\sigma_z + l_{\sigma_{MN}}, \quad (12)$$

kde

$$\begin{aligned} a_{\sigma_{MN}} &= -\cos^2 \sigma_{MN}, \quad b_{\sigma_{MN}} = -\sin^2 \sigma_{MN}, \quad c_{\sigma_{MN}} = -\sin \sigma_{MN} \cos \sigma_{MN}, \\ l_{\sigma_{MN}} &= \delta\sigma_{MN}. \end{aligned}$$

Výpočet neznámých $\delta\sigma_x$, $\delta\sigma_y$, $\delta\sigma_z$ a z nich parametrů elipsy úhlových změn $\delta\sigma_x$, $\delta\sigma_y$ a ε probíhá shodně s rovnicemi (10) a (7).

d) Určení měřítkových a úhlových změn při použití tří měřických stanic

V družicových sítích sestávajících z elementárních trojúhelníků, které vznikají při společném měření třemi měřickými stanicemi, se mohou používat speciální metody výpočtu měřítkových a úhlových změn. Podstata společného výpočtu obou druhů změn je vysvětlena na jednoduché síti dvou určovaných bodů P, Q , které jsou připojeny na dva dané body A, B (obr. 19). Ve dvou etapách měření byly určeny souřadnicové rozdíly $\Delta x_1, \Delta y_1; \Delta x_2, \Delta y_2; \Delta x_3, \Delta y_3; \Delta x_4, \Delta y_4$. Čísla indexů jsou shodná s čísly stran na obr. 19. Po převodu do zobrazovací roviny vznikly dva rovinné trojúhelníky A, P, Q a B, P, Q . Vlivem místní deformace sítě ZPBP a měřických chyb není po připojení trojúhelníků na body A, B shodná poloha určovaných bodů P, Q . Malé souřadnicové odchylky $\delta x_P, \delta y_P, \delta x_Q, \delta y_Q$ se odstraní malou změnou měřitek $\delta\mu_1, \delta\mu_2$ obou trojúhelníků a jejich malým úhlovým pootočením $\delta\varepsilon_1, \delta\varepsilon_2$. Jde o podobnostní transformaci (16), jejíž rovnice získáme rozvojem transformačních rovnic v Taylorovu řadu (17)

$$\begin{aligned} \delta x_P &= -\Delta x_1 \delta\mu_1 + \Delta y_1 \delta\varepsilon_1 + \Delta x_4 \delta\mu_2 - \Delta y_4 \delta\varepsilon_2, \\ \delta y_P &= -\Delta y_1 \delta\mu_1 - \Delta x_1 \delta\varepsilon_1 + \Delta y_4 \delta\mu_2 + \Delta x_4 \delta\varepsilon_2, \\ \delta x_Q &= -\Delta x_2 \delta\mu_1 + \Delta y_2 \delta\varepsilon_1 + \Delta x_3 \delta\mu_2 - \Delta y_3 \delta\varepsilon_2, \\ \delta y_Q &= -\Delta y_2 \delta\mu_1 - \Delta x_2 \delta\varepsilon_1 + \Delta y_3 \delta\mu_2 + \Delta x_3 \delta\varepsilon_2. \end{aligned} \quad (13)$$

Řešením rovnic dostáváme neznámé $\delta\mu_1, \delta\mu_2, \delta\varepsilon_1, \delta\varepsilon_2$. Jejich absolutní velikost charakterizuje kvalitu obou určených bodů, samozřejmě společně s velikostí délkové a úhlové odchylky $\delta s_{PQ}, \delta\sigma_{PQ}$ vypočítaných z rovnic

$$\delta s_{PQ} = \cos \sigma_{PQ} (\delta x_Q - \delta x_P) + \sin \sigma_{PQ} (\delta y_Q - \delta y_P), \quad (14a)$$

$$\delta\sigma_{PQ} = \sigma_{PQ} - \sigma'_{PQ}, \quad (14b)$$

kde

$$\sigma_{PQ} = \arctg \frac{y_Q - y_P}{x_Q - x_P}, \quad \sigma'_{PQ} = \arctg \frac{y_Q + \delta y_Q - y_P - \delta y_P}{x_Q + \delta x_Q - x_P - \delta x_P}.$$

Uvedený způsob určení deformací je třeba rozšířit na část družicové sítě na obr. 9 nebo 10, protože připojení sítě na tři dané body A, B, C je mnohem spolehlivější a kvalitnější. Na obrázcích je znázorněno určení tří bodů P, Q, R . Velikost místních deformací se stanovuje zvlášť pro všechny tři trojúhelníky přímo připojené na dané body. Rovnice k výpočtu tří měřítek a tří pootočení trojúhelníků, vedoucích k ztotožnění bodů P, Q, R , mají tvar

$$\begin{aligned} \delta x_P &= -\Delta x_1 \delta \mu_1 + \Delta y_1 \delta \epsilon_1 + \Delta x_4 \delta \mu_2 - \Delta y_4 \delta \epsilon_2, \\ \delta y_P &= -\Delta y_1 \delta \mu_1 - \Delta x_1 \delta \epsilon_1 + \Delta y_4 \delta \mu_2 + \Delta x_4 \delta \epsilon_2, \\ \delta x_Q &= -\Delta x_2 \delta \mu_1 + \Delta y_2 \delta \epsilon_1 + \Delta x_5 \delta \mu_3 - \Delta y_5 \delta \epsilon_3, \\ \delta y_Q &= -\Delta y_2 \delta \mu_1 - \Delta x_2 \delta \epsilon_1 + \Delta y_5 \delta \mu_3 + \Delta x_5 \delta \epsilon_3, \\ \delta x_R &= -\Delta x_3 \delta \mu_2 + \Delta y_3 \delta \epsilon_2 + \Delta x_6 \delta \mu_3 - \Delta y_6 \delta \epsilon_3, \\ \delta y_R &= -\Delta y_3 \delta \mu_2 - \Delta x_3 \delta \epsilon_2 + \Delta y_6 \delta \mu_3 + \Delta x_6 \delta \epsilon_3. \end{aligned} \quad (15)$$

Je nutné poznamenat, že odvozený způsob kontroly změny měřítek a pootočení jednotlivých trojúhelníků není možno v žádném případě zaměňovat za souřadnicové vyrovnání sítě. Jde jen o posouzení kvality daného ZPBP. Kvalita daných bodů je tím větší, čím méně se liší měřítková změna $\delta \mu_k$ a pootočení $\delta \epsilon_k$.

e) Transformace souřadnic

Ke kontrole souhlasu nebo nesouhlasu dané části ZPBP s družicově určenými body lze použít i různých transformačních metod. Pro jednotlivé části sítě obsahující jen několik daných bodů může sloužit i podobnostní transformace [5].

Odvození vychází z předpokladu, že odpovídající část družicové sítě je předběžně převedena do rovinného souřadnicového systému, takže souřadnicové rozdíly společných bodů jsou velmi malé. Pak lze rovnice podobnostní transformace

$$\begin{aligned} x_i &= x_T + (X_{ri} \cos \epsilon - Y_{ri} \sin \epsilon) (1 + \delta \mu), \\ y_i &= y_T + (X_{ri} \sin \epsilon + Y_{ri} \cos \epsilon) (1 + \delta \mu) \end{aligned} \quad (16)$$

rozvinout v Taylorovu řadu a zanedbat členy druhých a vyšších řádů. Rovnice oprav mají tvar

$$\begin{aligned} v_{xi} &= x_i - x_T - \delta x_T + y_{ri}' \delta \epsilon - x_{ri}' \delta \mu, \\ v_{yi} &= y_i - y_T - \delta y_T - x_{ri}' \delta \epsilon - y_{ri}' \delta \mu. \end{aligned} \quad (17)$$

V rovnicích značí x, y souřadnice bodů v nové soustavě (ZPBP), X, Y souřadnice bodů ve staré soustavě (družicová síť převedená do S-1942/83), $x_T = x_T' + \delta x_T$, $y_T = y_T' + \delta y_T$ souřadnice těžiště, $x_{ri}, y_{ri}, X_{ri}, Y_{ri}$ redukované souřadnice k těžišti, $\epsilon, \delta \epsilon$ úhlové pootočení os X, Y vůči osám x, y a $\delta \mu$ měřítkovou změnu.

Použití transformačních rovnic (17) jako rovnic oprav a výpočtu neznámých přírůstků souřadnic těžiště $\delta x_T, \delta y_T$, úhlu pootočení $\delta \epsilon$ a měřítkové změny $\delta \mu$ pomocí MNC je účelné, je-li síť připojena alespoň na tři identické body.

Z vypočtených oprav v_{xi}, v_{yi} daných a transformovaných bodů se mohou odvodit délkové odchylky

$$d_i = (v_{xi}^2 + v_{yi}^2)^{0.5}, \quad (18a)$$

kteří společně se směrníky

$$\sigma_i = \arctg \frac{v_{yi}}{v_{xi}} \quad (18b)$$

slouží k testování kvality připojení družicově určených bodů k ZPBP.

10.3. Vyrovnání družicových sítí v ZPBP

Souřadnicové rozdíly Δx_{ji} , Δy_{ji} , nejsou přímo měřeny, ale vypočteny z prostorových souřadnic x , y , z určených bodů. Prostorové souřadnice každého bodu jsou vyrovnány ze série měřených délek mezi družicemi a pozemní měřickou stanicí. Jednou z cest přibližného odvození vyrovnaných souřadnic určených bodů v ZPBP je považovat za fiktivní měřené veličiny přímo souřadnicové rozdíly Δx_{ji} , Δy_{ji} , získané při společných družicových měřeních pomocí dvou a více měřických stanic. Sítě lze vyrovnávat jak metodou zprostředkujících veličin, tak korelátově.

Protože jde o známé metody vyrovnání, budou v dalším textu jen naznačena praktická řešení některých příkladů vybraných družicových sítí.

a) Zprostředkující vyrovnání

α) Jako první příklad vyrovnání zprostředkujících veličin byla zvolena síť na obr. 20, zaměřená dvojicí družicových aparatur. Souřadnicové rozdíly byly určovány celkem v 9 etapách a sloužily k určení 4 bodů P , Q , R , S , připojených na dané 3 body A , B , C . Počet odpovídajících souřadnicových rozdílů je 18 a počet nutně měřených rozdílů 8. Celkem bylo odvozeno 10 nadbytečných souřadnicových rozdílů. Pro uvedené rozdíly se sestaví 18 rovnic oprav v_{xi} , v_{yi} . Symboly x'_M , y'_M ($M = P, Q, R, S \dots$) značí přibližné hodnoty souřadnic určených bodů.

$$\begin{aligned}
 v_{x1} &= +\delta x_P && + (x'_P - x_A - \Delta x_1), \\
 v_{x2} &= -\delta x_P && + (x_B - x'_P - \Delta x_2), \\
 v_{x3} &= && + \delta x_S + (x'_S - x_B - \Delta x_3), \\
 v_{x4} &= && - \delta x_S + (x_C - x'_S - \Delta x_4), \\
 v_{x5} &= && + \delta x_R + (x'_R - x_C - \Delta x_5), \\
 v_{x6} &= && - \delta x_R + (x_A - x'_R - \Delta x_6), \\
 v_{x7} &= -\delta x_P + \delta x_Q && + (x'_Q - x'_P - \Delta x_7), \\
 v_{x8} &= -\delta x_Q + \delta x_S && + (x'_S - x'_Q - \Delta x_8), \\
 v_{x9} &= -\delta x_Q + \delta x_R && + (x'_R - x'_Q - \Delta x_9), \\
 v_{y1} &= +\delta y_P && + (y'_P - y_A - \Delta y_1), \\
 v_{y2} &= -\delta y_P && + (y_B - y'_P - \Delta y_2), \\
 v_{y3} &= && + \delta y_S + (y'_S - y_B - \Delta y_3), \\
 v_{y4} &= && - \delta y_S + (y_C - y'_S - \Delta y_4), \\
 v_{y5} &= && + \delta y_R + (y'_R - y_C - \Delta y_5), \\
 v_{y6} &= && - \delta y_R + (y_A - y'_R - \Delta y_6), \\
 v_{y7} &= -\delta y_P + \delta y_Q && + (y'_Q - y'_P - \Delta y_7), \\
 v_{y8} &= -\delta y_Q + \delta y_S && + (y'_S - y'_Q - \Delta y_8), \\
 v_{y9} &= -\delta y_Q + \delta y_R && + (y'_R - y'_Q - \Delta y_9).
 \end{aligned} \tag{19}$$

Z rovnic oprav se sestavují normální rovnice, z nich se vypočítávají přírůstky souřadnic, vyrovnané souřadnice a na závěr střední chyby vyrovnaných veličin a jejich funkcí. Znaménka souřadnicových rozdílů Δx_i , Δy_i vyplývají z rozdílů v závorkách a obr. 20.

β) Druhý příklad se zabývá souřadnicovým vyrovnáním jednoduché družicové sítě zaměřené ve 4 etapách trojicí měřických stanic (obr. 10). Síť je připojena na tři dané body A , B , C a slouží k určení tří bodů P , Q , R . Na obr. 10 jsou vyznačeny trojúhelníky bodů měřené společně v jednotlivých etapách a pořadová čísla vypočtených dvojic souřadnicových rozdílů Δx_i , Δy_i , a použitých v sestavených rovnicích oprav.

Jedna základní metoda vychází z předpokladu, že síť je připojena na dané body pomocí malé změny měřítka $\delta\mu$ a malého pootočení $\delta\epsilon$.

$$v_{x1} = +\delta x_P - \Delta x_1 \delta\mu + \Delta y_1 \delta\epsilon + (x'_P - x_A - \Delta x_1), \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
v_{x2} &= +\delta x_R - \Delta x_2 \delta\mu + \Delta y_2 \delta\varepsilon + (x'_R - x_A - \Delta x_2), \\
v_{x3} &= +\delta x_Q - \Delta x_3 \delta\mu + \Delta y_3 \delta\varepsilon + (x'_Q - x_B - \Delta x_3), \\
v_{x4} &= +\delta x_P - \Delta x_4 \delta\mu + \Delta y_4 \delta\varepsilon + (x'_P - x_B - \Delta x_4), \\
v_{x5} &= +\delta x_R - \Delta x_5 \delta\mu + \Delta y_5 \delta\varepsilon + (x'_R - x_C - \Delta x_5), \\
v_{x6} &= +\delta x_Q - \Delta x_6 \delta\mu + \Delta y_6 \delta\varepsilon + (x'_Q - x_C - \Delta x_6), \\
v_{x7} &= +\delta x_P - \delta x_R - \Delta x_7 \delta\mu + \Delta y_7 \delta\varepsilon + (x'_P - x'_R - \Delta x_7), \\
v_{x8} &= -\delta x_P + \delta x_Q - \Delta x_8 \delta\mu + \Delta y_8 \delta\varepsilon + (x'_Q - x'_P - \Delta x_8), \\
v_{y1} &= +\delta y_P - \Delta y_1 \delta\mu - \Delta x_1 \delta\varepsilon + (y'_P - y_A - \Delta y_1), \\
v_{y2} &= +\delta y_R - \Delta y_2 \delta\mu - \Delta x_2 \delta\varepsilon + (y'_R - y_A - \Delta y_2), \\
v_{y3} &= +\delta y_Q - \Delta y_3 \delta\mu - \Delta x_3 \delta\varepsilon + (y'_Q - y_B - \Delta y_3), \\
v_{y4} &= +\delta y_P - \Delta y_4 \delta\mu - \Delta x_4 \delta\varepsilon + (y'_P - y_B - \Delta y_4), \\
v_{y5} &= +\delta y_R - \Delta y_5 \delta\mu - \Delta x_5 \delta\varepsilon + (y'_R - y_C - \Delta y_5), \\
v_{y6} &= +\delta y_Q - \Delta y_6 \delta\mu - \Delta x_6 \delta\varepsilon + (y'_Q - y_C - \Delta y_6), \\
v_{y7} &= +\delta y_P - \delta y_R - \Delta y_7 \delta\mu - \Delta x_7 \delta\varepsilon + (y'_P - y'_R - \Delta y_7), \\
v_{y8} &= -\delta y_P + \delta y_Q - \Delta y_8 \delta\mu + \Delta x_8 \delta\varepsilon + (y'_Q - y'_P - \Delta y_8).
\end{aligned}$$

Další výpočet postupuje obvyklým způsobem.

Druhou, komplikovanější cestou je souřadnicové vyrovnání, v němž se v každém trojúhelníku zavádí jiné měřítko $\delta\mu_k$ a úhlové pootočení $\delta\varepsilon_k$. Pak pro stejnou síť napíšeme odlišné rovnice oprav

$$\begin{aligned}
v_{x1} &= +\delta x_P - \Delta x_1 \delta\mu_1 + \Delta y_1 \delta\varepsilon_1 + (x'_P - x_A - \Delta x_1), \\
v_{x2} &= +\delta x_R - \Delta x_2 \delta\mu_1 + \Delta y_2 \delta\varepsilon_1 + (x'_R - x_A - \Delta x_2), \\
v_{x3} &= +\delta x_Q - \Delta x_3 \delta\mu_2 + \Delta y_3 \delta\varepsilon_2 + (x'_Q - x_B - \Delta x_3), \\
v_{x4} &= +\delta x_P - \Delta x_4 \delta\mu_2 + \Delta y_4 \delta\varepsilon_2 + (x'_P - x_B - \Delta x_4), \\
v_{x5} &= +\delta x_R - \Delta x_5 \delta\mu_3 + \Delta y_5 \delta\varepsilon_3 + (x'_R - x_C - \Delta x_5), \\
v_{x6} &= +\delta x_Q - \Delta x_6 \delta\mu_3 + \Delta y_6 \delta\varepsilon_3 + (x'_Q - x_C - \Delta x_6), \\
v_{x7} &= +\delta x_P - \delta x_R - \Delta x_7 \delta\mu_4 + \Delta y_7 \delta\varepsilon_4 + (x'_P - x'_R - \Delta x_7), \\
v_{x8} &= -\delta x_P + \delta x_Q - \Delta x_8 \delta\mu_4 + \Delta y_8 \delta\varepsilon_4 + (x'_Q - x'_P - \Delta x_8), \\
v_{y1} &= +\delta y_P - \Delta y_1 \delta\mu_1 - \Delta x_1 \delta\varepsilon_1 + (y'_P - y_A - \Delta y_1), \\
v_{y2} &= +\delta y_R - \Delta y_2 \delta\mu_1 - \Delta x_2 \delta\varepsilon_1 + (y'_R - y_A - \Delta y_2), \\
v_{y3} &= +\delta y_Q - \Delta y_3 \delta\mu_2 - \Delta x_3 \delta\varepsilon_2 + (y'_Q - y_B - \Delta y_3), \\
v_{y4} &= +\delta y_P - \Delta y_4 \delta\mu_2 - \Delta x_4 \delta\varepsilon_2 + (y'_P - y_B - \Delta y_4), \\
v_{y5} &= +\delta y_R - \Delta y_5 \delta\mu_3 - \Delta x_5 \delta\varepsilon_3 + (y'_R - y_C - \Delta y_5), \\
v_{y6} &= +\delta y_Q - \Delta y_6 \delta\mu_3 - \Delta x_6 \delta\varepsilon_3 + (y'_Q - y_C - \Delta y_6), \\
v_{y7} &= +\delta y_P - \delta y_R - \Delta y_7 \delta\mu_4 - \Delta x_7 \delta\varepsilon_4 + (y'_P - y'_R - \Delta y_7), \\
v_{y8} &= -\delta y_P + \delta y_Q - \Delta y_8 \delta\mu_4 - \Delta x_8 \delta\varepsilon_4 + (y'_Q - y'_P - \Delta y_8).
\end{aligned} \tag{21}$$

Obě metody je třeba vyzkoušet v praxi a podle výsledků stanovit, která metoda poskytuje kvalitnější výsledky. Je však možné volit další varianty vyrovnání, např. ponechat pro celou síť jednotnou změnu měřítka $\delta\mu$ a zavádět v každém trojúhelníku jiné pootočení $\delta\varepsilon_k$ nebo naopak předpokládat pouze konstantní pootočení $\delta\varepsilon$ pro celou síť a různé změny měřítka $\delta\mu_k$.

γ) K vyrovnání sítě je také možno použít různých druhů transformačních metod. Výpočet postupuje obdobně jako při transformaci místních sítí do ZPBP. Nejprve se družicová síť vyrovná jako volná síť (připojená pouze na jeden daný bod a orientaci jediné spojnice zvolených dvou identických bodů). Tato síť se transformuje zvolenou metodou na identické

body. Rozhodující pro stanovení kvality sítě jsou délkové odchylky $\delta s_i = (v_{xi}^2 + v_{yi}^2)^{0,5}$ mezi danými a transformovanými identickými body.

K transformaci je možno použít např. podobnostní transformaci, kvadratickou konformní transformaci, Jungovu transformaci a další.

b) Korelátové vyrovnání

Korelátové vyrovnání dává naprosto stejné výsledky jako vyrovnání zprostředkujících veličin. Postup vyrovnání je naznačen jen na vyrovnání sítě na obr. 20. Síť má 10 nadbytečně měřených souřadnicových rozdílů, takže je třeba sestavit stejný počet podmínkových rovnic, např.

$$\begin{aligned}
 \Delta x_1 + \Delta x_2 - \Delta x_{BA} &= 0, \\
 \Delta x_3 + \Delta x_4 - \Delta x_{CB} &= 0, \\
 \Delta x_5 + \Delta x_6 - \Delta x_{AC} &= 0, \\
 \Delta x_1 + \Delta x_4 + \Delta x_7 + \Delta x_8 - \Delta x_{CA} &= 0, \\
 \Delta x_1 + \Delta x_5 + \Delta x_7 + \Delta x_9 - \Delta x_{CA} &= 0, \\
 \Delta y_1 + \Delta y_2 - \Delta y_{BA} &= 0, \\
 \Delta y_3 + \Delta y_4 - \Delta y_{CB} &= 0, \\
 \Delta y_5 + \Delta y_6 - \Delta y_{AC} &= 0, \\
 \Delta y_1 + \Delta y_4 + \Delta y_7 + \Delta y_8 - \Delta y_{CA} &= 0, \\
 \Delta y_1 + \Delta y_5 + \Delta y_7 + \Delta y_9 - \Delta y_{CA} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Vlivem měřických chyb získáme na pravé straně rovnic místo nul odchylky U_x, U_y . Z podmínkových rovnic se snadno odvodí přetvořené podmínkové rovnice

$$\begin{aligned}
 v_{x1} + v_{x2} & & & + U_{xBA} = 0, \\
 & + v_{x3} + v_{x4} & & + U_{xCB} = 0, \\
 & & + v_{x5} + v_{x6} & + U_{xAC} = 0, \\
 v_{x1} & + v_{x4} & + v_{x7} + v_{x8} & + U'_{xAC} = 0, \\
 v_{x1} & & + v_{x5} & + v_{x7} + v_{x9} + U''_{xAC} = 0, \\
 v_{y1} + v_{y2} & & & + U_{yBA} = 0, \\
 & + v_{y3} + v_{y4} & & + U_{yCB} = 0, \\
 & & + v_{y5} + v_{y6} & + U_{yAC} = 0, \\
 v_{y1} & + v_{y4} & + v_{y7} + v_{y8} & + U'_{yAC} = 0, \\
 v_{y1} & & + v_{y5} & + v_{y7} + v_{y9} + U''_{yAC} = 0.
 \end{aligned}$$

Další postup výpočtu je znám z vyrovnávacího počtu.

Závěr

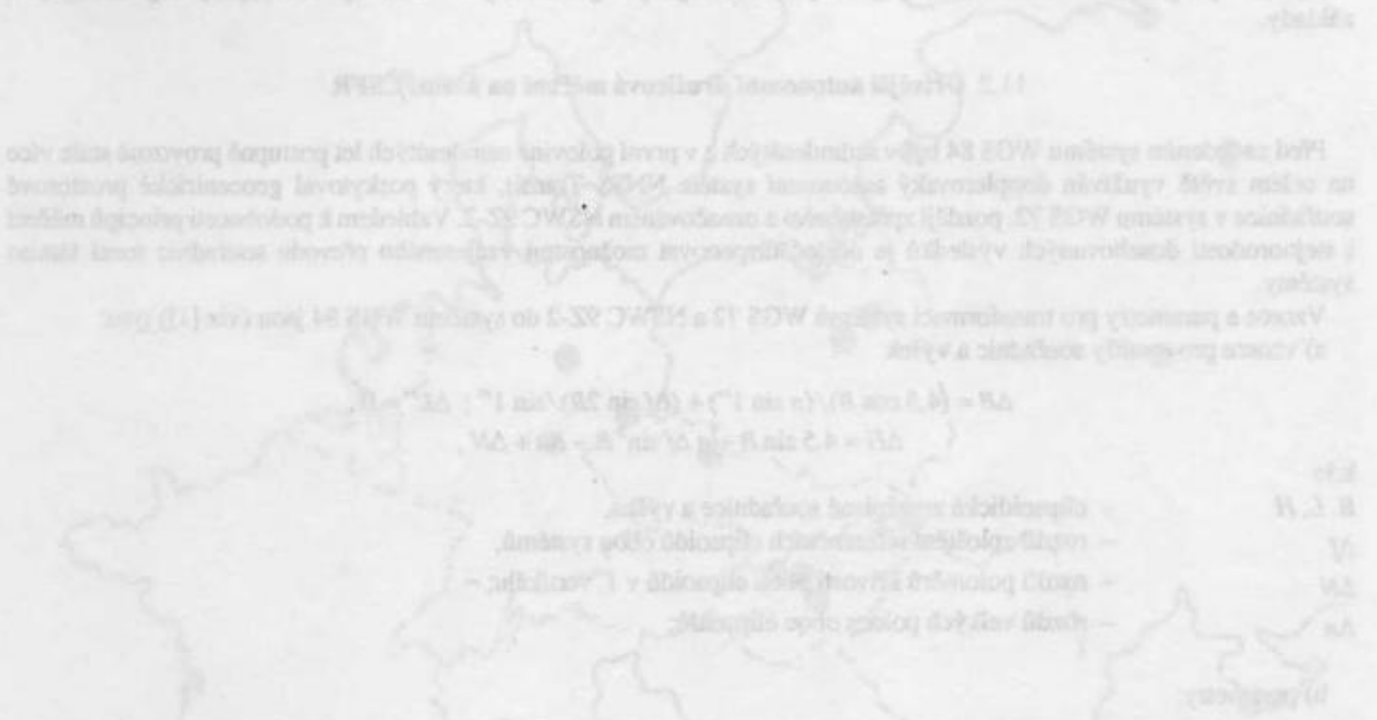
V článku jsou navrženy některé měřické metody, kontrolní výpočty a vyrovnávací postupy pro obnovu a určování bodů v ZPBP družicovými metodami. Protože jde o spojení současné trigonometrické sítě s menším množstvím měřených délek, bude účelné navržené metody prakticky vyzkoušet a analyzovat jejich kvalitu. Podle výsledků zkoušek bude možno některé z metod doporučit, popřípadě je upravit nebo přejít k jiným metodám.

Spojování družicové a úhlové sítě přináší větší problémy než vybudování samostatné družicové sítě. Vzhledem k deformacím sítě je třeba k zachování homogenity sítě plánovat větší počet měření technologií GPS, než by vyžadovala jen družicová síť.

Literatura:

- [1] KARSKÝ, G. - KOSTELECKÝ, J. - ŠIMEK, J.: Projekt budování geodetické sítě nultého řádu v ČSFR. Praha, VÚGTK 1990.
- [2] JINDRA, D.: K problematice analýzy identit v polohových sítích. Geod. a kartogr. Obz., 36, 1990, č. 7.
- [3] ŠIMEK, J.: Geodetické využití systému NAVSTAR-GPS a jeho perspektivy. Geod. a kartogr. Obz., 36, 1990, č. 10.
- [4] NEVOSÁD, Z.: K obnově základního polohového bodového pole. In: Sbor. topogr. Služby, 1991, č. 1.
- [5] NEVOSÁD, Z.: Geodézie VI. Vyrovnání geodetických sítí. Brno, VAAZ 1984.
- [6] NEVOSÁD, Z.: Analýza souřadnicového vyrovnání bodů 1. až 4. řádu v S-1942/83. [Výzkumná zpráva.] Brno, VA 1991.

Došlo 15. 9. 1992



Point	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	495000	155000	1550
2	495000	155000	1550
3	495000	155000	1550
4	495000	155000	1550
5	495000	155000	1550
6	495000	155000	1550
7	495000	155000	1550
8	495000	155000	1550
9	495000	155000	1550
10	495000	155000	1550
11	495000	155000	1550
12	495000	155000	1550
13	495000	155000	1550
14	495000	155000	1550
15	495000	155000	1550
16	495000	155000	1550
17	495000	155000	1550
18	495000	155000	1550
19	495000	155000	1550
20	495000	155000	1550
21	495000	155000	1550
22	495000	155000	1550
23	495000	155000	1550
24	495000	155000	1550
25	495000	155000	1550
26	495000	155000	1550
27	495000	155000	1550
28	495000	155000	1550
29	495000	155000	1550
30	495000	155000	1550
31	495000	155000	1550
32	495000	155000	1550
33	495000	155000	1550
34	495000	155000	1550
35	495000	155000	1550
36	495000	155000	1550
37	495000	155000	1550
38	495000	155000	1550
39	495000	155000	1550
40	495000	155000	1550
41	495000	155000	1550
42	495000	155000	1550
43	495000	155000	1550
44	495000	155000	1550
45	495000	155000	1550
46	495000	155000	1550
47	495000	155000	1550
48	495000	155000	1550
49	495000	155000	1550
50	495000	155000	1550
51	495000	155000	1550
52	495000	155000	1550
53	495000	155000	1550
54	495000	155000	1550
55	495000	155000	1550
56	495000	155000	1550
57	495000	155000	1550
58	495000	155000	1550
59	495000	155000	1550
60	495000	155000	1550
61	495000	155000	1550
62	495000	155000	1550
63	495000	155000	1550
64	495000	155000	1550
65	495000	155000	1550
66	495000	155000	1550
67	495000	155000	1550
68	495000	155000	1550
69	495000	155000	1550
70	495000	155000	1550
71	495000	155000	1550
72	495000	155000	1550
73	495000	155000	1550
74	495000	155000	1550
75	495000	155000	1550
76	495000	155000	1550
77	495000	155000	1550
78	495000	155000	1550
79	495000	155000	1550
80	495000	155000	1550
81	495000	155000	1550
82	495000	155000	1550
83	495000	155000	1550
84	495000	155000	1550
85	495000	155000	1550
86	495000	155000	1550
87	495000	155000	1550
88	495000	155000	1550
89	495000	155000	1550
90	495000	155000	1550
91	495000	155000	1550
92	495000	155000	1550
93	495000	155000	1550
94	495000	155000	1550
95	495000	155000	1550
96	495000	155000	1550
97	495000	155000	1550
98	495000	155000	1550
99	495000	155000	1550
100	495000	155000	1550

Redakční poznámka: Podle doporučení autora článku nejsou v rovnicích důsledně rozlišovány indexy prvního a druhého stupně.

11. Měření GPS v astronomicko-geodetické síti ČSFR

11.1. Úvod

Hlavním cílem projektů měření GPS v astronomicko-geodetické síti (AGS) ČSFR, plánovaných pro rok 1992, bylo zaměření sítě GPS nultého řádu, vybraných nivelačních bodů a určení souřadnic bodů nultého řádu v systému WGS 84 pro následné:

- další zhušťování geodetické sítě bodů nultého řádu,
- určení vztahů pro transformace souřadnic z S-1942/83, S-1942 a S-JTSK do WGS 84 a naopak,
- zpřesnění definice průběhu geoidu,
- praktické využívání přijímačů GPS pro běžné měřické aplikace.

Kromě zaměření sítě nultého řádu proběhly v roce 1992 a pro rok 1993 se plánují i další měření v Čs. AGS.

Zaměření sítě nultého řádu předcházelo měření na pěti vybraných astronomicko-geodetických bodech ČSFR v rámci evropského programu EUREF s cílem spojení východoevropských geodetických sítí se západoevropskými geodetickými základy.

11.2. Dřívější autonomní družicová měření na území ČSFR

Před zavedením systému WGS 84 byl v sedmdesátých a v první polovině osmdesátých let postupně provozně stále více na celém světě využíván dopplerovský autonomní systém NNSS Transit, který poskytoval geocentrické prostorové souřadnice v systému WGS 72, později zpřesněném a označovaném NSWC 9Z-2. Vzhledem k podobnosti principů měření i stejnorodosti dosahovaných výsledků je účelné disponovat možnostmi vzájemného převodu souřadnic mezi těmito systémy.

Vzorce a parametry pro transformaci systémů WGS 72 a NSWC 9Z-2 do systému WGS 84 jsou (viz [1]) tyto:

a) vzorce pro rozdíl souřadnic a výšek

$$\Delta B = (4,5 \cos B)/(a \sin 1'') + (\Delta f \sin 2B)/\sin 1''; \Delta L'' = 0,$$

$$\Delta H = 4,5 \sin B + a \Delta f \sin^2 B - \Delta a + \Delta N,$$

kde

- B, L, H – elipsoidické zeměpisné souřadnice a výška,
 Δf – rozdíl zploštění referenčních elipsoidů obou systémů,
 ΔN – rozdíl poloměrů křivosti obou elipsoidů v 1. vertikálu,
 Δa – rozdíl velkých poloos obou elipsoidů;

b) parametry:

	WGS 72	NSWC 9Z-2
$\Delta B (")$	0,554	0,814
Δf	$0,312\ 105\ 7 \cdot 10^{-7}$	$-0,812\ 045\ 0 \cdot 10^{-7}$
$a (m)$	6 378 135	6 378 145
$\Delta a (m)$	2,0	-8,0
$\Delta N (m)$	1,4	-3,8

Volba bodů sítě nultého řádu byla prováděna mezi jiným i s ohledem na dříve provedená dopplerovská měření tak, aby mohlo dojít k jejich následnému využití a vzájemnému porovnání výsledků.

Dopplerovská měření byla na území ČSSR prováděna nejprve v letech 1984 a 1987 v rámci kampaní DOC-84 a DOC-87 organizovaných v rámci bloku bývalých východoevropských států (viz obr. 1 a 2). V průběhu kampaně DOC-84 byl v ČSSR zaměřen bod Polom, při kampani DOC-87 body Polom, Skalka a Velký Inovec. V dalších letech (1988 a 1989) probíhalo měření v tzv. národní dopplerovské síti (viz obr. 3) pomocí metody translokace.

11.3. Kampaň EUREF-EAST '91

V rámci této kampaně bylo v roce 1991 provedeno měření na bodech Pecný, Přední přička, Kvetoslavov, Velký Inovec a Šankovský grůň. Observační kampaň proběhla ve dnech 29. 10. až 3. 11. 1991, velmi krátce po dodání 3 kusů aparatur GEOTRACER 100 pro potřeby TS Čs. armády (VTOPÚ). I přes velmi krátkou dobu, která byla k dispozici pro seznámení s funkcí aparatur, byl učiněn pokus o současné zaměření bodu Polom. Vzhledem k technickým problémům s akumulátory bylo však zaměření souřadnic bodu Polom neúspěšné.

11.4. Zaměření sítě nultého řádu v rámci meziresortní kampaně CS-NULRAD-92

Jako body nultého řádu byly pro tuto kampaň vybrány následující body AGS (v závorce jsou uvedena kódová označení, použitá při kampani VGSN-92, viz část 5):

DOC - 84



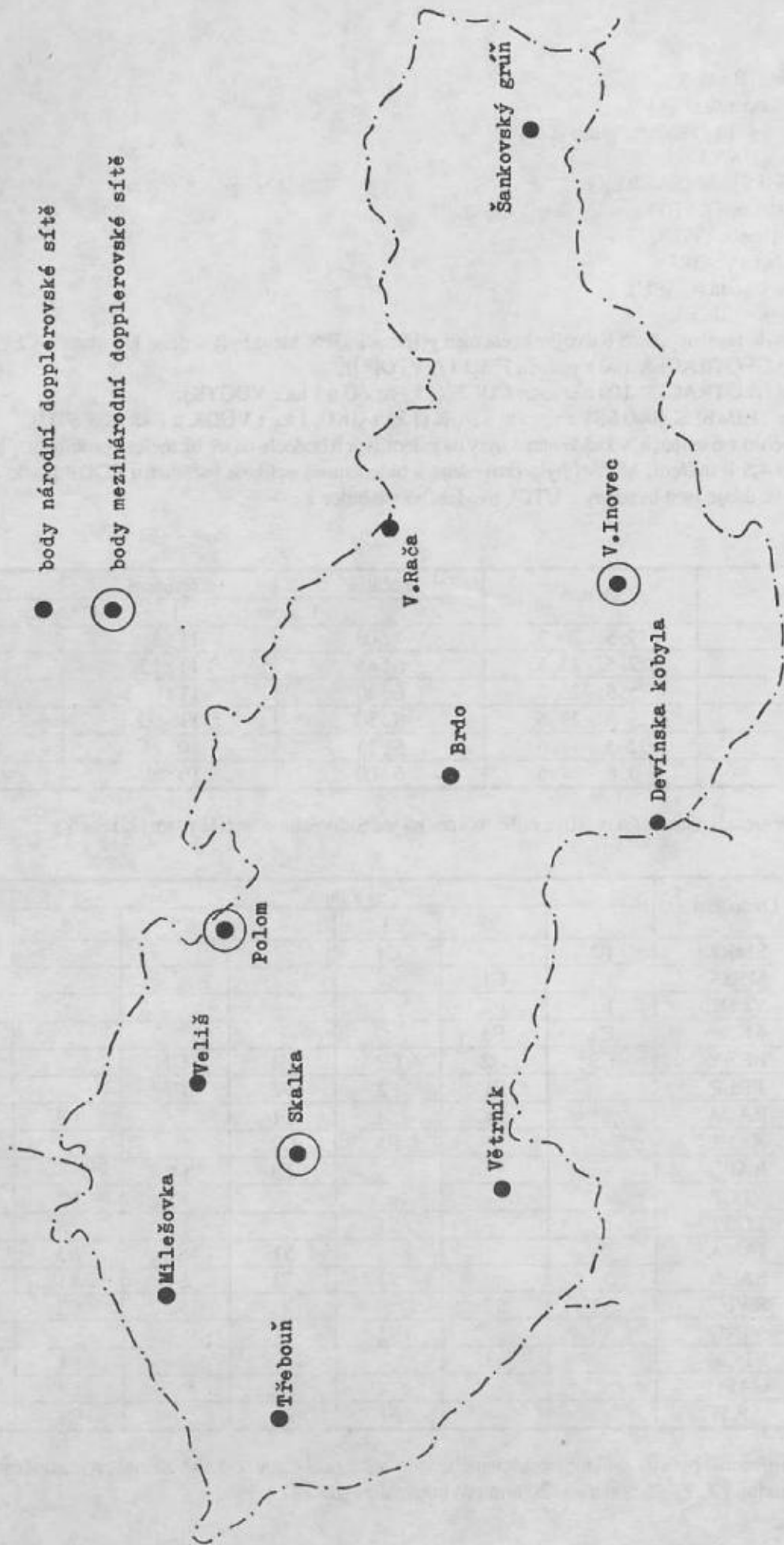
Obr. 1. Schéma rozmístění dopplerovských bodů při kampani DOC-84

DOC - 87



Obr. 2. Schéma rozmístění dopplerovských bodů při kampani DOC-87

- 4 Smrk (SMRK),
- 6 Medvědí skála (MESK),
- 17 Velká Deštná (VEDE),
- 23 Skapce (SKAP),
- 30 Pecný (PENY),
- 49 Přední příčka (PREP),
- 54 Velká Rača (RACA),
- 63 Kleť (KLET),



Obr. 3. Národní dopplerovská síť

71 Rapotice (RAPO),
 77 Velký Lopeník (VLOP),
 88 Lomnický štít / Skalnaté pleso (LOST),
 95 Javorina (JANA),
 98 Šankovský grůň (SAGR),
 106 Kvetoslavov (KVET),
 110 Velký Inovec (VINO),
 120 Vörsdobor (VBOR),
 128 Gadosz Puszta (GAPU),
 1031 Strahovice (SICE).

Pro měření bylo použito všech 8 dvojfrekvenčních přijímačů GPS, které byly v době kampaně v ČSFR k dispozici, tj.:

- 3 přijímače GEOTRACER 100 z resortu FMO 17 (VTOPÚ);
- 2 přijímače GEOTRACER 100 z resortu ČÚGK (1 ks ze ZÚ a 1 ks z VÚGTK);
- 3 přijímače TRIMBLE 4000 SST z resortu SÚGK (1 ks z GKÚ, 1 ks z VÚGK a 1 ks z FS STU).

Měření proběhlo v 6 etapách, v každé etapě byly na jednotlivých bodech, na nichž měření probíhala, plánovány 4 seance ("sessions") po 4,5 h měření. Měření byla provedena s ohledem na velikost parametru PDOP podle časového harmonogramu (časové údaje jsou uvedeny v UTC), uvedeného v tabulce 1.

Tabulka 1

Etapa	Datum	Začátek		Přerušení		Konec
		1. seance		2. seance		
1	19. 5. - 20. 5.	7 : 00		11 : 30		16 : 00
2	22. 5. - 23. 5.	6 : 45		11 : 15		15 : 45
3	25. 5. - 26. 5.	6 : 30		11 : 00		15 : 30
4	28. 5. - 29. 5.	6 : 30		11 : 00		15 : 30
5	31. 5. - 1. 6.	6 : 15		10 : 45		15 : 15
6	3. 6. - 4. 6.	6 : 00		10 : 30		15 : 00

Přehled o přesunech aparatur a celkové době měření na jednotlivých bodech je patrný z tabulky 2.

Tabulka 2

Bod. č.	Označení	Etapa						Celková doba měření (h)
		1	2	3	4	5	6	
4	SMRK	F2		C1				36
6	MESK	F3	C1					36
17	VEDE	F1	F2					36
23	SKAP	C1	F3					36
30	PENY	C2	C2	C2	C1	C1		90
49	PREP		F1	F2	F2	F2		72
54	RACA	S1	S1		F1		F3	72
63	KLET			F3	C2			36
71	RAPO				F3	C2		36
77	VLOP					F3	F2	36
88	LOST			S1		F1		36
95	JANA				S1	S3	S3	54
98	SAGR			S3	S3	S1	S1	72
106	KVET	S2	S2			S2	C2	72
110	VINO	S3		S2				36
120	VBOR		S3				F1	36
128	GAPU				S2		S2	36
1031	SICE			F1			C1	36

Odhadovaná přesnost byla na základě simulovaného vyrovnání oceněna v hodnotě 20 mm pro průměrnou chybu v každé prostorové souřadnici X, Y, Z a hodnotou 26 mm pro maximální střední chybu.

Kromě měření na území ČSFR byla uskutečněna i měření na vybraných geodetických bodech v sousedních zemích (SRN, Rakousku, Polsku a Maďarsku). V jednotlivých etapách bylo měření rozděleno do vzájemně se překrývajících bloků (viz tabulku 2) s cílem minimalizace vzdáleností mezi simultánně měřenými body a tím současně zvýšení relativní přesnosti měření.

11.5. Zaměření vojenské geodetické sítě nultého řádu (VGSN-92)

Projekt měření VGSN-92, viz [3], předpokládal měření na týchž bodech nultého řádu, které byly zaměřeny v rámci měřické kampaně CS-NULRAD-92 (viz obrázek 4), s rozšířením měřických bodů o bod Polom (POLM). Měření bylo provedeno na základě dohod mezi TS Čs. armády a Agenturou pro obranné mapování (Defense Mapping Agency - DMA) USA, přičemž byla tato měřická kampaň organizována s následným napojením na geodetickou síť MR v rámci obdobných dohod o spolupráci mezi TS MA a DMA a ve spolupráci a vzájemné koordinaci měřické kampaně mezi TS Čs. armády, TS MA a DMA.

Kromě měření na bodech nultého řádu bylo provedeno též měření na nivelačních bodech převážně prvního řádu v blízkém okolí geodetických bodů nultého řádu s cílem zlepšení definice, zpřesnění a kontroly průběhu geoidu na území ČSFR. Pro určení detailního průběhu geoidu byla vytypována lokalita mezi geodetickými body Smrk a Velká Deštná, na které bylo provedeno detailní výškové (a samozřejmě i polohové) zaměření dvanácti bodů nivelační sítě.

Body nultého řádu byly pro účely dalšího měření GPS rozděleny na body absolutní a relativní (diferenciální), viz obr. 4. Absolutní body byly vybrány zejména s ohledem na předchozí, zejména dopplerovské měřické kampaně a pro jejich rovnoměrné rozmístění v rámci celého státního území.

Diferenciální měření je založeno na přenášení souřadnic ze známých (daných) bodů na neznámé (určované) s tím, že se provádí simultánní měření nejméně dvěma aparaturami, z nichž jedna je umístěna na bodě se známými souřadnicemi a druhá na bodě určovaném. Relativní přesnost určení souřadnic diferenciální metodou závisí na přesnosti metody měření a použitím přijímači a je do značné míry funkcí vzdálenosti mezi zaměřovanými body.

Absolutní přesnost při použití diferenciální metody měření závisí na přesnosti určení absolutní polohy výchozího (známého) bodu.

Dosažitelná přesnost absolutního určování polohy je ± 3 až ± 5 m vzhledem ke geocentru při použití BE (broadcast ephemeris) a ± 1 m při použití PE (precise ephemeris). Pro dosažení této přesnosti musí být v obou případech registrovaná data korigována o vliv SA (selective availability). K tomuto účelu DMA vyvinula a používá tzv. DCF (Data Correction Facility). DCF je umístěno v utajovaném zařízení, sestávajícím z osobního počítače s kryptografickými algoritmy a kódy. Měření v tomto případě může probíhat i s využitím běžných dvoufrekvenčních přijímačů s kódem C/A, které nejsou ovlivňovány umělým zhoršováním drah družic tak jako přijímače s kódem Y. U běžných přijímačů s C/A kódem je tedy DMA schopna určit absolutní souřadnice bodů dodatečným výpočetním zpracováním s využitím DCF. Tento proces trvá podle prohlášení koordinátora DMA pro zaměření VGSN-92 nejméně 3 týdny. V případě potřeby rychlého určení absolutních souřadnic, jak tomu bylo např. v případě vojenských operací Desert Shield a Desert Storm (Pouštní štít a Pouštní bouře), se používají přijímače s kódem Y, umožňujícím přijímat nezhoršené efemeridy při aktivaci A-S (anti-spoofing) a při současném odstranění vlivu SA.

Pro zaměření VGSN-92 bylo použito 7 dvanáctikanálových dvojfrequenčních přijímačů Ashtech XII s příjmem kódu C/A a 1 přijímače Geotracer 100. Zpřesnění určených souřadnic s využitím přesných efemerid proběhlo až ve fázi výpočetního zpracování.

Vzhledem k účelu využití měřených dat byla kampaň VGSN-92 rozdělena do pěti oblastí (časové údaje jsou uvedeny v UTC):

1) Měření absolutních bodů

- proběhlo ve 3 seancích na bodech PENY, VINO, POLM, SKAP, PREP, RACA a SAGR:

1. seance - 2. 10. 1992 - 02 : 00 až 07 : 00 (na bodě SAGR až od 04 : 30);
2. seance - 2. 10. 1992 - 07 : 01 až 12 : 30 (na bodě SAGR jen do 12 : 00);
3. seance - 3. 10. 1992 - 06 : 57 až 12 : 26 (na bodě SKAP jen do 08 : 35).

2) Měření relativních bodů

- proběhlo celkem v 6 seancích:

1. seance - 6. 10. 1992 - 01 : 50 až 04 : 55 – na bodech PENY, VINO, POLM;
2. seance - 6. 10. 1992 - 05 : 15 až 08 : 25 – MESK, VLOP, SICE a JANA (na bodě JANA jen 2. seance);
3. seance - 9. 10. 1992 - 01 : 37 až 04 : 43 – PENY, VINO, POLM;
4. seance - 9. 10. 1992 - 05 : 03 až 08 : 13 – KLET, KVET, SMRK a LOST;
5. seance - 12. 10. 1992 - 01 : 25 až 04 : 31 – PENY, VINO, POLM;
6. seance - 12. 10. 1992 - 04 : 51 až 08 : 01 – RAPO, GAPU, VEDE a VBOR (na bodě PENY až od 05 : 03).

3) Měření na nivelačních bodech v okolí absolutních a relativních bodů

- proběhlo celkem ve 4 seancích:

1. seance - 4. 10. 1992 - 08 : 52 až 12 : 37 - na bodech PENY, POLM, N-VINO, N-SKAP, N-PREP, N-RACA, N-SAGR;
2. seance - 7. 10. 1992 - 05 : 11 až 08 : 21 - PENY, VINO, MESK, N-VLOP, N-SICE, N-JANA (na bodě MESK jen do 06 : 15);
3. seance - 10. 10. 1992 - 04 : 59 až 08 : 09 - PENY, VINO, POLM, N-KLET, N-KVET, N-SMRK, N-LOST;
4. seance - 13. 10. 1992 - 04 : 41 až 07 : 57 - PENY, VINO, POLM, N-POLM, N-RAPO, N-GAPU, N-VBOR, N-NIV.

Poznámka: Body s předponou N jsou nivelační body v blízkosti absolutních nebo relativních bodů; bod N-NIV1 je připojovacím bodem lokální nivelační sítě. Při měření absolutních, relativních i nivelačních bodů došlo v několika případech k dílčím časovým změnám oproti původnímu projektu, způsobeným technickými závadami ve zdrojích a přívozech elektrické energie.

4) Měření v lokální nivelační síti

- proběhlo ve 2 seancích na 12 bodech zvolené lokální nivelační sítě v prostoru Dvůr Králové - Trutnov - Hostinné:

1. seance - 15. 10. 1992 - 01 : 00 až 03 : 30 - na bodech N-NIV1, N-NIV2, N-NIV3, N-NIV4, N-NIV5, N-NIV6, N-NIV7;
2. seance - 15. 10. 1992 - 05 : 00 až 07 : 00 - na bodech N-NIV1, N-NIV2, N-NIV8, N-NIV9, N-NIV10, N-NIV11, N-NIV12.

5) Spojovací měření mezi geodetickými sítěmi ČSFR a MR

- proběhlo dne 20. 10. 1992 na bodech VINO a KVET v 1 seanci v době od 06 : 45 do 10 : 45.

Rozdělení relativních bodů do územních bloků, v nichž bylo prováděno simultánní měření, bylo provedeno s ohledem na vhodnost rozmístění a vzdálenosti vůči absolutním bodům, k nimž byla měřená data ve fázi výpočetního zpracování vztažena.

11. 6. Další měření v AGS ČSFR

Ve dnech 4. 7. až 8. 7. 1992 proběhla mezinárodní kampaň GPS nazvaná EUREF-POL '92, při níž bylo plánováno zaměření 34 bodů (11 - PL, 6 - D, 3 - CS, 2 - S, 2 - SF, 2 - LIT, 2 - N, 1 - A, 1 - CH, 1 - NL, 1 - R, 1 - LET, 1 - UK) pomocí přijímačů TRIMBLE, GEOTRACER, ROGUE a MINIROGUE. V ČSFR proběhlo měření na bodech Pecný (VÚGTK), Šankovský grůň (VÚGK) a Přední příčka (VTOPÚ).

Ve dnech 4. až 5. 8. 1992 v rámci měření v celosvětové kampani IGS Epoch '92 proběhlo i měření na bodě Pecný, a to současně dvěma aparaturami (VÚGTK a VTOPÚ).

Mezinárodní projekt IGS (International GPS Geodynamics Service) byl navržen na XX. generálním shromáždění IUGG (Mezinárodní unie geodetická a geofyzikální), Vídeň 11. až 24. 8. 1992. Jeho hlavním cílem je s využitím celosvětové sítě stanic GPS, VLBI a SLR a opakovaným měřením na těchto stanicích zabezpečit službu předávání informací o

- přesných drahách UDZ,
- parametrech rotace Země,
- modelech ionosféry.

S využitím těchto informací by mělo být prakticky dosaženo odstranění závislosti měření GPS na vzdálenosti mezi použitými přijímači, tj. dosažení srovnatelné přesnosti při měření vzdáleností o délkách několika kilometrů a délkách 1 až 2 tisíc kilometrů. Při praktických zkouškách byla při opakovaných měřeních v rozsahu 3 dní měření zjištěna u vzdáleností do 2000 km horizontální přesnost ± 1 cm a vertikální přesnost ± 2 až ± 3 cm. Tyto výsledky potvrzují optimistické předpoklady o perspektivních možnostech transformací lokálních sítí s přesností několika milimetrů a o možnosti dosažení relativní přesnosti až 0,01 ppm ($1 \cdot 10^{-8}$). Při zpřesňování geodetických sítí bude mít v budoucnu využití efemeridní služby IGS velký význam. Praktická činnost IGS byla zahájena v roce 1991, kdy se do programu aktivně zapojilo 150 institucí. Pro rok 1992 byla naplánována na období od 21. 6. do 23. 8. 1992 testovací kampaň se zapojením geodynamických stanic, tvořících tzv. CORE NETWORK, a asi 120 dalších tzv. FIDUTIAL SITES. Byla vybrána též 3 hlavní datová a zpracovatelská centra, a to Goddard, Saint Diego a Paříž.

Vlastní kampaň IGS Epoch '92 byla zahájena 27. 7. 1992, přičemž od 1. 8. 1992 byl na jeden týden zapojen systém A-S (anti-spoofing), a 8. 8. 1992 byla kampaň ukončena. Již 14. 8. 1992 však bylo na vybraných bodech vyžádáno pokračování měření až do 31. 10. 1992 a od 1. 11. 1992 se již předpokládalo zahájení činnosti tzv. IGS Pilot-Service pro přenosy a předávání získaných informací.

Nejvýznamnější plánovanou měřickou kampaní pro rok 1993 je spojovací měření s Bavorskem. Kromě toho bude účelné, v závislosti na možnostech TS AČR, zahájit v roce 1993 postupné zhušťování geodetické sítě nultého řádu, nezbytné pro výstavbu vojenského geodetického systému AČR.

Literatura:

- [1] Department of Defense World Geodetic System 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems. [DMA Technical Report.] 2nd ed. Washington, D. C., DMA 1991.
- [2] KOSTELECKÝ, J. - ŠIMEK, J. - ŠILHAN, V.: Návrh realizačního plánu zaměření geodetické sítě nultého řádu v ČSFR. Zdíby, VÚGTK 1992.
- [3] ŠILHAN, V.: Projekt měření vojenské geodetické sítě nultého řádu (VGSN-92) v ČSFR. Dobruška, VTOPÚ 1992.

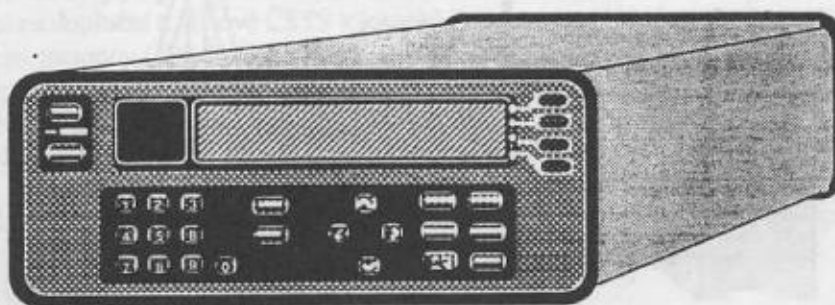
Došlo 27. 11. 1992

12. Informace o praktických zkušenostech s geodetickými aplikacemi systému GPS v Zeměměřickém ústavu

12.1. Úvod

V roce 1991 zakoupil Zeměměřický ústav 3 měřické aparatury Geotracer 100, využívající pozorování družic globálního navigačního systému GPS (NAVSTAR) a vyrobené v licenci firmy TRIMBLE NAVIGATION, od které pochází i softwarové vybavení. Dvě aparatury měří na jedné frekvenci a osmi kanálech, jedna je dvoufrekvenční a 24kanálová.

Přijímače mají rozměry 30 x 35 x 13 cm, hmotnost včetně antény 9 kg, vnitřní paměť 1 Mb (asi 16 hodin příjmu signálů v jednofrekvenčním režimu L1 a standardním formátu dat), jsou napájeny z vnější baterie 12 V, 10 W, jejíž kapacita vystačí zhruba na 6 hodin příjmu. V praxi, zejména v rozsáhlých měřických kampaních při modernizaci našich geodetických základů, se osvědčily 12V autobaterie s mnohem větší kapacitou, která umožní měřit několik desítek hodin.



Obr. 1. Přijímač Geotracer 100

Aparatury Zeměměřického ústavu zpracovávají pouze C/A kód, pracují na principu měření pseudovzdálenosti a fázových rozdílů. Výrobce udává přesnost m_s , určení šikmé vzdálenosti s vzorcem

$$m_s = (10 + 2 \cdot 10^{-6} s) \text{ (mm)} .$$

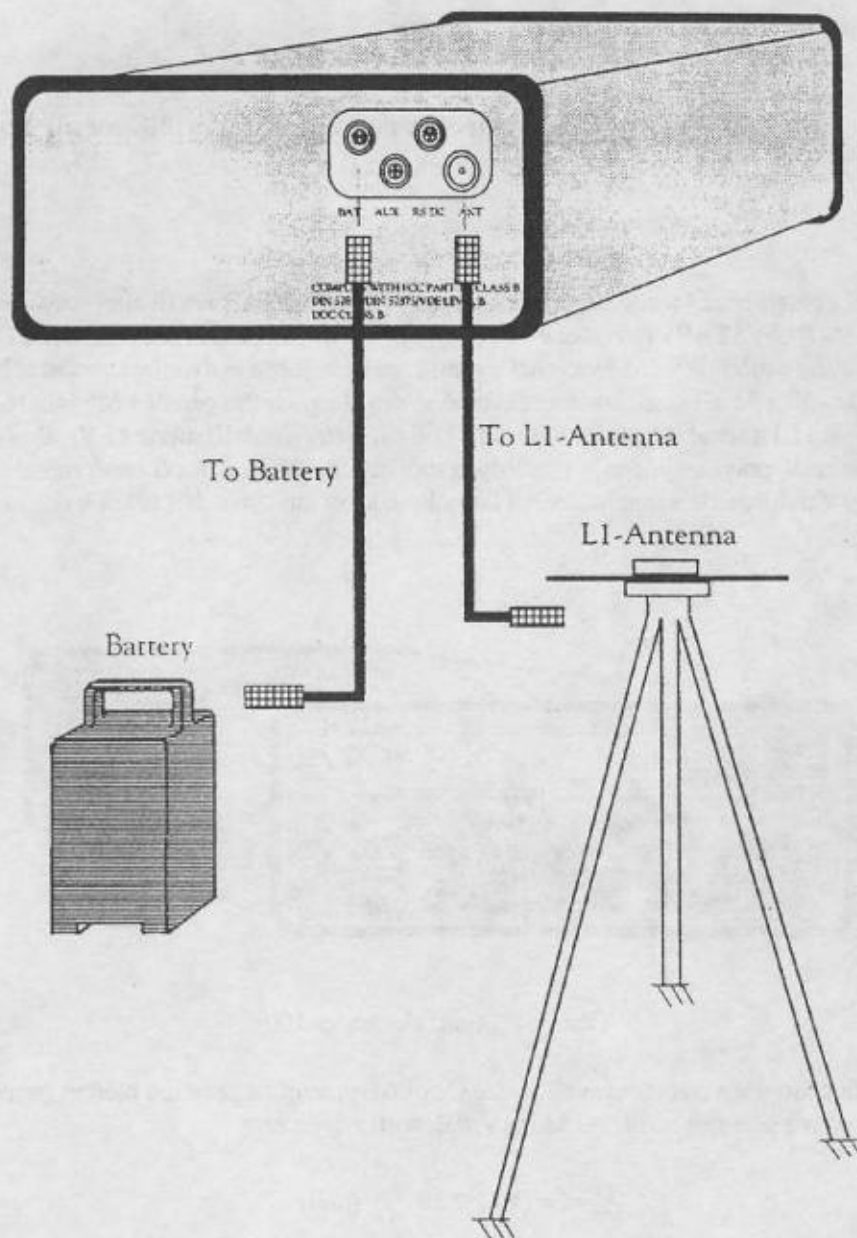
Tento odhad se při dodržení optimálních podmínek pro měření ukazuje jako realistický.

Měřická data jsou zpracovávána firemním softwarem TRIMVEC-PLUS, jenž umožňuje získat všechny potřebné údaje, počínaje vytvořením projektu a nahráním dat z přijímače a konče vyrovnáním sítí a vytvořením databáze. Je možno jmenovat programy pro plánování a rozpis observací, přenosy dat, výpočty vektorů v automatickém i manuálním režimu různými podprogramy, kinematické aplikace, výpočet kontrolních uzávěrů obrazců, vyrovnání sítí MNČ, tvorbu a práci s databází, sumarizaci výsledků a analýzu měřených dat, transformace do různých souřadnicových systémů atd.

Základním výsledkem polního zpracování (relativního určení polohy) je vektor, jehož složkami jsou souřadnicové rozdíly v geocentrickém kartézském souřadnicovém systému dX , dY , dZ a doplňujícími údaji prostorová vzdálenost a elipsoidické převýšení dH . Obecně nezbytnou podmínkou pro měření v jakémkoliv režimu (těžiště využití aparatur GPS v Zeměměřickém ústavu spočívá ve statických aplikacích) je časový překryt (měření ve stejném časovém úseku) a použití minimálně 2 aparatur.

12.2. Všeobecné zásady polních prací

Je třeba dodržovat některé důležité zásady, které jsou specifické pro použití aparatur GPS. V okolí bodu nesmějí být především žádné překážky, které by znemožnily příjem signálu (domy, les), v blízkosti se rovněž nesmí vyskytovat vedení vysokého napětí nebo rušivé zdroje elektromagnetického vlnění, velké odrazné plochy apod. Pokud se zákryty vyskytnou,



Obr. 2. Geotracer 100 - polní sestava

je třeba použít sklonoměru, busoly, příp. teodolitu k jejich přesnému vyznačení v záznamu o rekognoskaci. Tento postup umožní zdokonalit plánování observací a vyhnout se nepříjemným a nepředvídaným ztrátám signálu během měření.

Plánování a rozpis observací se provádějí na osobním počítači. Pro zvolený časový interval je možno určit geometrickou konfiguraci a počet dosažitelných družic (k získání hodnověrných výsledků je třeba dodržet minimální počet satelitů 4). Dále lze pro každý satelit určit časový průběh azimutu, výškového úhlu a hodnoty PDOP (Positional Dilution of Precision - faktor geometrického snížení přesnosti, závislý na okamžité geometrické konfiguraci družic) a některé další veličiny.

Měření na bodě je poměrně jednoduché. Anténa se horizontuje a centruje nad bodem jako klasický geodetický přístroj. Všeobecně uznávaným pravidlem (pro eliminaci chyby z excentricity fázových center antén) je její orientace k severu. Výškový úhel (maska), nad kterou jsou družice registrovány, je obvykle 15° , signál je přijímán většinou v intervalu 15 s. Během měření je vhodné registrovat tlak, teplotu, příp. vlhkost, kontrolně se sledují některé veličiny, jako je počet a čísla sledovaných satelitů, počet přijatých záznamů, eventuální přerušení signálů, hodnota SNR (Signal to Noise Ratio - okamžitý poměr signálu a šumu), PDOP atd. Doba měření na 4 družice je pro vzdálenost 5 kilometrů asi 70 minut, na 5 družic asi 50 minut. Je však třeba podotknout, že nyní již existují a jsou dále vyvíjeny přístroje a software, které umožňují

pracovat podstatně rychleji (se zachováním přesnosti statického měření) v nových modifikovaných režimech jako „Fast-static“ nebo „Pseudo-static“, který je pro aplikace v Zeměměřičkém ústavu rovněž zkoumán. Každé měření je do počítače přeneseno ve formě čtyř souborů: „data file“ (datový soubor), „ephemeris file“ (soubor efemerid), „ION file“ (informace o ionosféře), který se v režimu L1 neuplatní, a „message file“ (zpráva, informace o přibližných souřadnicích, názvu bodu, výšce antény apod.).

Výpočet je založen na principu zpracování fázových měření, měření pseudovzdáleností slouží pouze pro eventuální zpřesnění vstupních přibližných souřadnic. Součástí výsledku jsou také veličiny, charakterizující kvalitu měření, z nichž nejpodstatnější jsou hodnoty RMS a Ratio. Faktor RMS udává v jednotkách cyklu L1 (asi 19 cm) očekávanou chybu výsledného vektoru, Ratio udává spolehlivost výsledku po výpočtu celého počtu cyklů mezi družicí a stanicí. Rozhodující kontrolou kvality výsledku jsou však uzávěry obrazců (nejčastěji trojúhelníků) nebo předběžné testovací vyrovnání volné sítě. Je ovšem třeba zdůraznit, že uzávěry trojúhelníků měřených najednou (v jedné seanci) nejsou objektivním kritériem kvality určených vektorů, neboť jsou vyjádřením pouze vnitřní přesnosti měření. Kvalitu těchto vektorů je třeba kontrolovat s použitím obrazců, obsahujících vektory měřené v jiných seancích.

12.3. Informace o nasazení aparatur GPS v terénu

V roce 1991 byly aparatury nasazeny při doplnění a obnovách ČSTS v několika lokalitách. Zde se zmíníme o lokalitách Ostrava a jižní Čechy, kde byly po předchozích ověřovacích a experimentálních měřeních využity v plném rozsahu.

Současně s pracemi na doplnění a obnově ČSTS v lokalitě Ostrava, prováděnými klasickými metodami, byla od 15. 6. do 6. 9. 1991 zaměřena metodou GPS řidší síť, které bude po zpracování klasických měření využito jako geodetického základu pro jejich připojení. Observační plán obsahoval 90 trojúhelníků tvořených 148 vektory o průměrné délce 5,4 km a 62 trigonometrických bodů. Přednostně byly vybírány střední stabilizace, snahou bylo vyhýbat se bodům se signalizačními stavbami, které působí značně rušivě. Častá přerušení signálu mají za následek množství chyb v určení celého počtu cyklů.

O kvalitě měření dobře vypovídají hodnoty středních prostorových, polohových a souřadnicových uzávěrů, které zde uvádíme.

Prostorový uzávěr (3D) je hodnota $u_{(prost)i}$, kde

$$u_{(prost)i}^2 = dx_i^2 + dy_i^2 + dz_i^2, \quad i = 1, \dots, n,$$

kde dx_i , dy_i , dz_i jsou složky uzávěru ve směrech geocentrických souřadnicových os, n je počet trojúhelníků. Pro celou síť byl určen střední prostorový uzávěr u_{prost}

$$u_{prost} = \sqrt{\frac{\sum u_{(prost)i}^2}{n}} = \pm 0,034 \text{ m}, \quad \text{kde } i = 1, \dots, n.$$

Střední souřadnicový uzávěr (za zjednodušeného předpokladu stejné přesnosti ve všech směrech souřadnicových os) je

$$u_{XYZ} = \frac{u_{prost}}{\sqrt{3}} = \pm 0,020 \text{ m}.$$

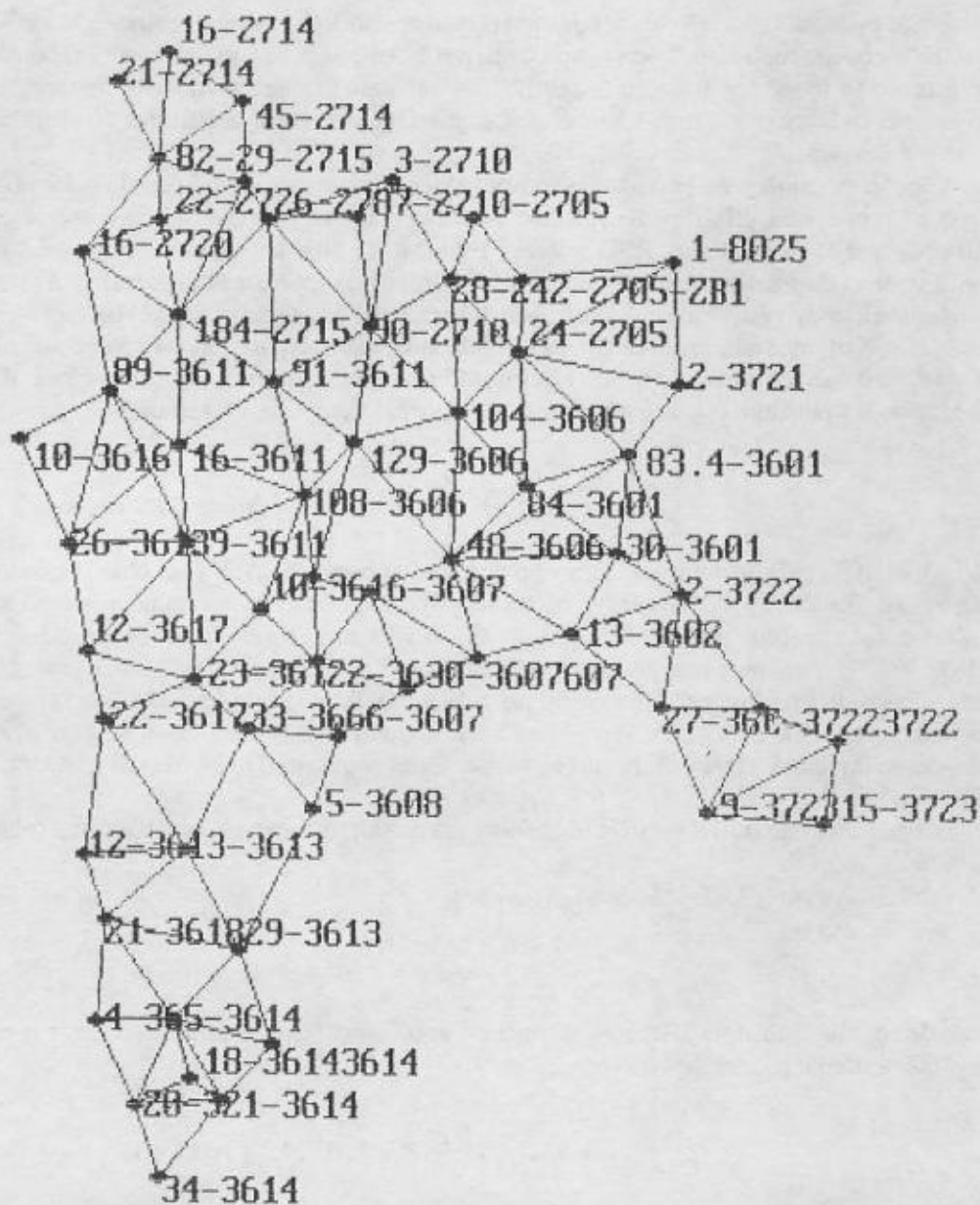
Dále byly z prostorových uzávěrů určeny polohové uzávěry odečtením složky ve směru normály k elipsoidu v systému (B, L, H)

$$u_{(pol)i}^2 = u_{(prost)i}^2 - dh_i^2,$$

střední polohový uzávěr u_{pol} a střední souřadnicový uzávěr pro souřadnice B, L , pro který platí

$$u_{BL} = \frac{u_{pol}}{\sqrt{2}}.$$

Jejich hodnoty jsou $u_{pol} = \pm 0,021 \text{ m}$, $u_{BL} = \pm 0,015 \text{ m}$. Porovnání hodnot obou odlišně odvozených středních souřadnicových uzávěrů u_{XYZ} a u_{BL} přesvědčivě ukazuje, že na velikosti uzávěrů se největší měrou podílí výšková složka, tedy že i metodami GPS jsou výšky určovány s poněkud nižší přesností než poloha.



Obr. 3. Kampaň GPS Ostrava 1991 - observační plán

Hodnoty středních uzávěrů v jednotlivých souřadnicích (průměty do směrů souřadnicových os) jsou $u_x = \pm 0,017$ m, $u_y = \pm 0,017$ m, $u_z = \pm 0,024$ m.

V lokalitě jižní Čechy probíhalo od 16. 9. do 29. 11. 1991 zhuštění bodového polohového pole technologií GPS v pěti triangulačních listech. V lokalitě bylo stabilizováno 33 nových trigonometrických bodů. Měřeno bylo dále na 13 současných trigonometrických bodech. Observační plán obsahoval 66 trojúhelníků tvořených 111 vektory, k jejichž určení bylo zapotřebí 35 observací 3 aparaturami a 15 observací 2 aparaturami, a 46 trigonometrických bodů. Niveláčně bylo připojeno 10 trigonometrických bodů.

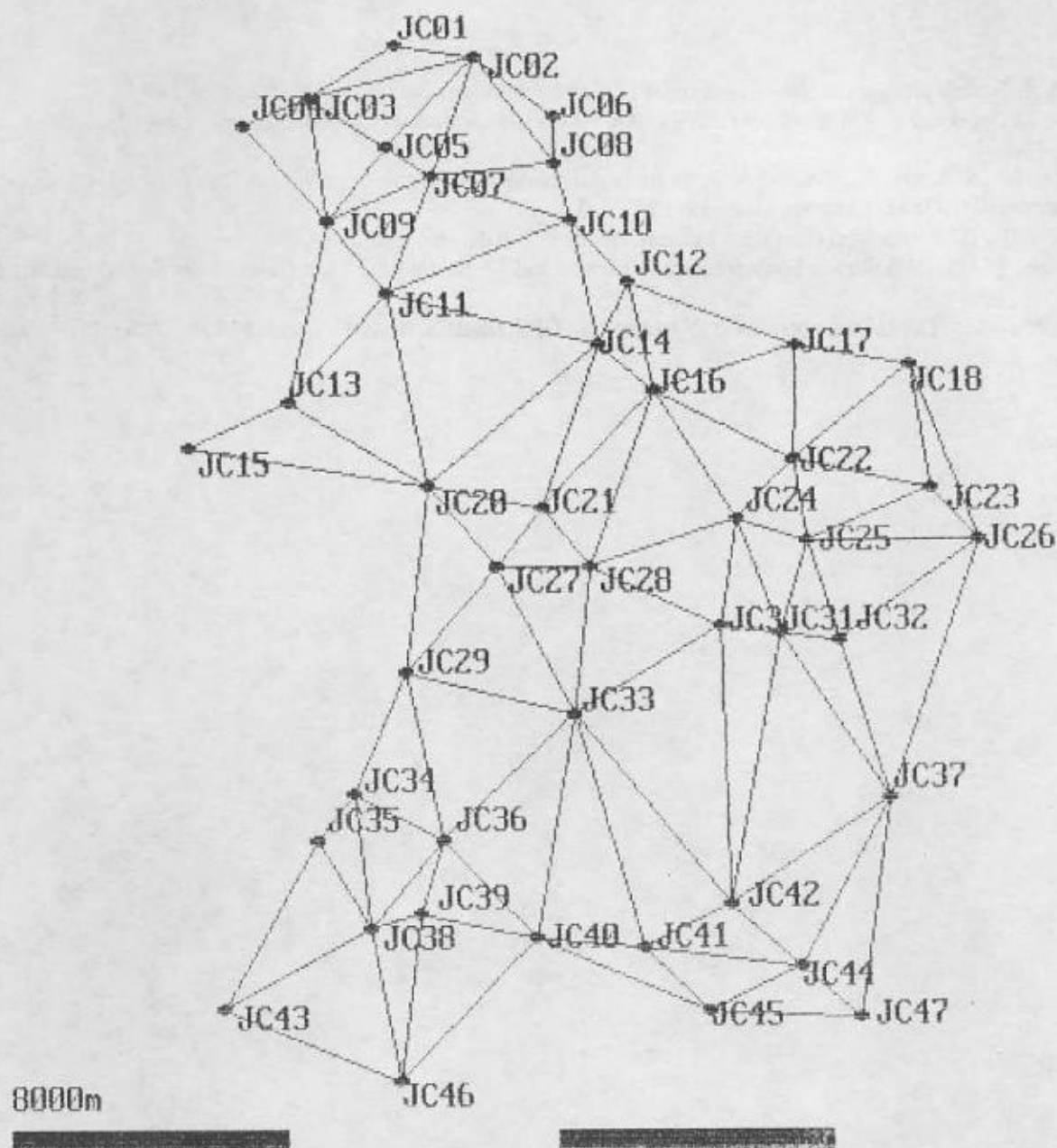
Z 66 prostorových uzávěrů žádný nepřekročil hodnotu 0,05 m, pouze jeden 0,04 m a sedm dalších 0,03 m. Střední prostorový, polohový a souřadnicový uzávěr dosahují těchto hodnot:

$u_{\text{prost}} \dots \pm 0,017$ m,

$u_{\text{pol}} \dots \pm 0,010$ m,

$u_{XYZ} \dots \pm 0,010$ m,

$u_{BL} \dots \pm 0,006$ m.



Obr. 4. Kampaň GPS jižní Čechy - observační plán

Síť vektorů byla ještě v poli předběžně vyrovnána jako volná v geocentrickém souřadnicovém systému WGS 84. Výsledky potvrdily, že žádné měření není nutno opakovat. Další zpracování, především definitivní vyrovnání programem TRIMNET a převod do S-JTSK, bylo provedeno v kanceláři.

V roce 1992 jsou aparatury nasazeny při obnově a doplnění sítě v několika lokalitách: jižní Čechy, bývalý vojenský újezd Dobrá Voda, Dolní Dvořiště, Lipník nad Bečvou.

Na přelomu října a listopadu 1991 se Zeměměřický ústav podílel na několikadenní kampani EUREF-EAST. V Československu bylo pro tento účel vybráno k observaci 5 bodů. Využito bylo rovněž navazující kampaně v maďarské síti, kdy bylo souběžně observováno na bodě AGS Rapotice.

V roce 1992 se Zeměměřický ústav účastnil v rámci spolupráce všech složek naší geodetické služby osmnáctidenní kampaně pro vybudování sítě 0. řádu.

Tyto významné kampaně pro modernizaci geodetických základů si zaslouží zvláštní pozornost a samostatné pojednání.

Literatura:

- [1] KARSKÝ, G.: Jak pracuje družicový systém GPS? Geod. a kartogr. Obz., 36, 1990, č. 8, s. 187 - 192.
- [2] ŠIMEK, J.: Geodetické využití systému NAVSTAR-GPS a jeho perspektivy. Geod. a kartogr. Obz., 36, 1990, č. 11, s. 271 - 280.
- [3] JINDRA, D. - KOLÁŘ, R. - TARABA, P.: První praktické poznatky z geodetického využití systému GPS v Zeměměřickém ústavu. Geod. a kartogr. Obz., 38, 1992, č. 2, s. 23 - 27.
- [4] Geotracer 100 GPS Receiver. Operation Manual. Geotronics AB 1989.
- [5] TRIMVEC-PLUS. GPS Survey Software. User's Manual and Technical Reference Guide. Trimble Navigation Ltd. 1991.
- [6] Technické zprávy. Doplnění a obnova ČSTS technologií GPS. Jižní Čechy 1991. Ostrava 1991. Zeměměřický ústav 1992.

Došlo 23. 9. 1992

13. Možnosti využití GPS v analytické aerotriangulaci

Vzhledem k tomu, že v ČSFR zatím žádné experimenty s využitím GPS v letecké fotogrammetrii provedeny nebyly, byly převzaty a shrnuty některé poznatky s odzkoušením této metody v zahraničí, konkrétně v SRN, ve Francii, Holandsku, Švédsku a Norsku.

Pro testování byly použity pětikanálové přijímače SERCEL TR5S-B a letecké měřické kamery WILD RC 10 a ZEISS RMK 15/23 [1]. U těchto měřických kamer nejsou skutečné okamžiky expozice přesně známy. Je však možné je vybavit fotosnímačem s pulsním generátorem. Anténa přijímače GPS by neměla přijímat odrazy od letounu. Její výhodnější umístění je vertikálně nad objektivem kamery, v praxi však závisí na konkrétních možnostech mechanického umístění. Konečným cílem kinematických měření GPS při snímkovém letu je určení souřadnic polohy kamery v okamžiku expozice. K tomu je nutná znalost přesného časového signálu asi na 1 ms nebo ještě lépe na 0,1 ms.

Pro účely velkoměřítkové analytické aerotriangulace (AAT) je dostatečné využití příjmu na nosné vlně L1 v kódu C/A a fázové měření na L1, tj. použití jednofrekvenčního přijímače s měřením pseudovzdáleností a fázových měření. Většina kinematických přijímačů umožňuje příjem a zpracování signálů s frekvencí kolem 1 s a vyšší. U přijímače SERCEL TR5S-B se používá frekvence měření 0,6 s. Přijímač je vybaven vnitřním procesorem a rychlým koprocesorem pro výpočty v reálném čase, kdy s frekvencí 0,6 s poskytuje úplné měření polohy a času s použitím pseudovzdáleností, zhlazených (zprůměrovaných) pomocí vyhodnocení akumulovaných fázoměrných měření v následném zpracování dat (postprocessing). Z těchto údajů se při výpočtu kombinované AAT vypočtou pro každý letecký měřický snímek souřadnice středu projekce, vztažené k okamžiku expozice, a to interpolací mezi dvěma pozicemi na dráze letu, generovanými pomocí kinematického měření GPS v intervalech 0,6 s.

Pro určení souřadnic pomocí GPS se obecně vyžaduje současný příjem signálů alespoň od 4 družic. Přesnost měření by mohla být zvýšena použitím externích cesiových hodin vyšší přesnosti, než je přesnost vnitřních hodin přijímače.

Je vhodné použít pro měření dva přijímače, z nichž jeden se doporučuje umístit na známém pozemním bodě uvnitř plochy snímkování nebo v její blízkosti. Druhý přijímač se umístí na letounu, přičemž se staniční observace provádějí se stejnou frekvencí jako na palubě letounu. Je-li k dispozici pouze jeden přijímač GPS, může být použit tzv. pseudodiferenční režim. Při tomto způsobu měření se určí pomocí přijímače GPS poloha vybraného geodetického bodu, a to den před snímkovým letem a den po něm. Tato měření by měla být provedena ve stejném časovém období a s využitím stejné konfigurace družic jako při snímkovém letu. Střední hodnoty takto získaných souborů dat se používají dodatečně v diferenciálním režimu jako náhrada za měření s použitím pozemního přijímače GPS během snímkového letu.

Při zkušebních testech se dvěma přijímači bylo při AAT v měřítku 1 : 3 800 dosaženo přesnosti $m_x = \pm 4,3$ cm, $m_y = \pm 4,1$ cm a $m_z = \pm 1,9$ cm. Takovéto vysoké přesnosti lze dosáhnout jen při účinné kompenzaci systematických chyb, kdy se doporučuje zavádět korekce nezávisle v jednotlivých snímkových řadách. Při praktických testech bylo zjištěno, že za dobu 78 minut se vypočtená poloha stacionárního přijímače GPS změnila vlivem driftu značně nelineárně a částečně nepravidelně, a to asi o 10 m v poloze a asi o 50 m ve výšce. Bylo však zjištěno, že je-li celkový drift nahrazen diskretní lineární regresní křivkou, zůstává hodnota driftu za určitou dobu na stejné úrovni střední chyby, např. pod 10 cm pro časový interval 5 minut. Proto se zdá být pro splnění standardních fotogrammetrických potřeb dostatečné použití lineárních korekcí.

Matematický model kombinovaného blokového vyrovnání AAT obsahuje 4 skupiny neznámých:

- prvky vnější orientace kamery včetně souřadnic středu projekce;
- souřadnice všech terénních bodů bloku včetně pozemních vlíčovacích bodů;
- dodatečné parametry pro autokalibraci;
- parametry driftu pro observace GPS.

Parametry driftu jsou základem konstantních složek hodnot excentricity mezi kamerou a anténou GPS. Jelikož odchylky v souřadnicích jsou závislé i na výšce letounu, navrhuje se provádět korekce za předpokladu, že jsou známy prvky orientace kamery. Současně musí být známy počáteční hodnoty složek souřadnicových odchylek a snos kamery musí být v rámci každé snímkové řady neměnný.

Dosažené výsledky

Výsledná přesnost po odstranění lineárních systematických chyb byla určena v hodnotách $\pm 3,8$ cm při použití stacionárního přijímače.

V následující tabulce 1 jsou uvedeny požadované přesnosti navigačních dat pro kombinované blokové vyrovnání s minimálním počtem pozemních vlčovacíh bodů.

Tabulka 1

Měřítko mapy	Měřítko snímku	Požadovaná přesnost AAT		Interval vrstevnic	Požadovaná přesnost navigač. dat GPS	
		m_{xy}	m_z		m_{xy}	m_z
1 : 100 000	1 : 100 000	5 m	4 m	20 m	30 m	16 m
1 : 50 000	1 : 70 000	2,5	2	10	15	8
1 : 25 000	1 : 50 000	1,2	1,2	5	5	4
1 : 10 000	1 : 30 000	0,5	0,4	2	1,6	0,7
1 : 5 000	1 : 15 000	0,25	0,2	1	0,8	0,35
1 : 1 000	1 : 8 000	5 cm	10 cm	0,5	0,4	0,15

Z porovnání požadované a dosažitelné přesnosti je zřejmé, že kinematická přesnost GPS značně převyšuje požadavky na přesnost mapování v jakémkoliv měřítku, dokonce i v měřítku 1 : 1000. Přesnost GPS v hodnotě 5 cm by měla být dostatečná dokonce i pro vysoce přesnou aerotriangulaci, vyžadovanou v katastrální fotogrammetrii nebo při zhušťování bodového pole.

Návrhy a doporučení:

1. Dosažená přesnost umožní v řadě případů snížení počtu pozemních vlčovacíh bodů pro AAT až na 4 body v rozích bloku.

2. Přesnosti vyžadované pro AAT při použití GPS lze dosáhnout pouze kombinací měření pseudovzdáleností a fázových měření.

3. Pro určení polohy prostřednictvím GPS by mělo využívat spíše diferenciálního než absolutního režimu měření.

4. Při snímkovém letu spojeném s určením polohy pomocí GPS v pseudodiferenčním režimu by měly být dodrženy následující zásady:

- pokud možno použít stejnou konfiguraci družic, neboť každá změna způsobí nestejnorodost dat GPS, což může být v diferenciálním režimu kompenzováno;

- je-li změna konfigurace družic nevyhnutelná, je třeba ji provést během otočky a přeletu letounu z jedné letové osy na druhou;

- nemůže-li být snímkování ukončeno v jednom dni, je třeba využívat při pokračování snímkového letu stejnou konfiguraci družic, pokud je to možné.

5. Pro zabezpečení transformace ze systému WGS 84 do místního souřadnicového systému se doporučuje zaměřit nejméně 3 pozemní vlčovací body, a to stejným přijímačem GPS, který se použije při snímkovém letu.

Literatura:

- [1] BROSSIER, R. - MILLION, C - REYNES, A.: Photogrammetric Application of Sercel GPS TR5S-B Receiver at Institut Géographique International-France. In: 16. Congress ISPRS. Kyoto 1988. Commission 1. Book 1, s. 1 - 10.
- [2] ACKERMANN, F.: Combined Adjustment of Airborne Navigation Data and Photogrammetric Blocks. In: 16. Congress ISPRS. Kyoto 1988. Commission 3. Book 8, s. 11 - 23.
- [3] CORTES, F. E. - HEIMES, F. J.: A Comparative Study of Dynamic Positioning by GPS. In: 16. Congress ISPRS. Kyoto 1988. Commission 3. Book 8, s. 32 - 41.

Došlo 28. 11. 1992

PŘÍLOHY

1. GEODETICKÉ A NAVIGAČNÍ PŘIJÍMAČE GPS

Geodetic Surveyor série 4000 - Trimble
Panthfinder professional - Trimble
ASHTECH XII
Garmin GPS 100 AVD
Trimpack - Trimble

2. NABÍDKY NOVÉ TECHNIKY GPS

TRIMBLE
DEL NORTE Technology, Inc.
GARMIN
ASHTECH
MAGELLAN, LEICA
Informace o novinkách
Navigační zařízení GPS v letadle

3. SEZNAM DOPOSUD ZNÁMÝCH VÝROBCŮ PŘIJÍMAČŮ GPS

TTD přijímače: Geodetic surveyor série 4000

Základní charakteristiky: 9kanálový, digitální, L1, L2 P a L1 C/A-kódový přijímač s možností měření fází nosné vlny družicového signálu jak ve statickém, tak i kinematickém režimu; lze ho využít jako referenčního přijímače při určování diferenciálních poloh v reálném čase a pro přenos korekcí

Rozměry: 248 mm x 280 mm x 102 mm

Hmotnost: 3,1 kg bez baterií, 5,5 kg s bateriemi

Přesnost určení: horizontální polohy - 5 mm +1 ppm určené délky; výšky - 10 mm +1 ppm určené délky

Doba určení polohy: do 2 min od zapnutí přijímače

Příkon: 11 W

Užívaný souřadnicový systém: WGS 84

Možnosti využití přijímače:

- pro nejpřesnější geodetická měření ve statickém režimu v modu (rychlé spuštění měření, plánované měření a automatické zahájení měření ve stanovených dnech a hodinách);

- k monitorování lokálních polohových a výškových deformací, kde jsou vyžadovány centimetrové a vyšší přesnosti;

- v letecké fotogrammetrii při určování polohy kamery v okamžiku expozice a při určování polohy vřícovacích bodů;

- ke zhušťování geodetických sítí a měření polygonových pořadů jak ve statickém, tak i kinematickém režimu v modu (kontinuálním, pseudo-static, Stop and Go);

- pro určování diferenciální polohy v reálném čase.

Možnosti softwaru přijímače:

- ukládání až 26hodinového měření L1, L2 dat na 5 družic v paměti přijímače při intervalu záznamu 15 s;

- řešení a výpočet rozmanitých prvků navigace;

- plánování viditelnosti a dostupnosti družic apod.



TTD přijímače: Pathfinder professional

Základní charakteristiky: 6kanálový, digitální, L1, C/A-kódový přijímač s možností sledování až 8 družic

Rozměry: 71 mm x 217 mm x 159 mm

Hmotnost: 1,25 kg

Přesnost určení polohy: autonomní do +15 m (není-li aktivována SA)

Doba určení polohy: do 2 min (2D poloha) a do 3 min (3D poloha) od zapnutí přijímače

Příkon: 3 W

Užívaný souřadnicový systém: WGS 84, možnost transformace do ED 50, NAD 27 a dalších systémů

Možnosti využití přijímače:

- při topografickém mapování středních a malých měřitek a při sběru dat do GIS, kde je možné uložit při využití datakektoru o kapacitě paměti 1 MB až 50 000 bodů v různých souborech dat;

- při určování 3D (2D) polohy s možností opakování 1 s;

- k vložení až 99 waypoints do paměti, čímž je možná navigace z místa určení až k uvedeným 99 bodům;

- k přenosu dat výpočetní jednotky typu PC nebo kompatibilního.

Možnosti softwaru:

- možnosti uložení dat do výpočetní jednotky typu PC nebo kompatibilního;

- výpočet diferenciálních dat (s využitím dat ref. přijímače);

- plánování viditelnosti a dostupnosti družic;

- zobrazení výstupů v uživatelem stanoveném měřítku.



TTD přijímače: ASHTECH XII

Základní charakteristiky: 12kanálový, digitální, L1, L2 P a L1, C/A-kódový přijímač s možností měření fází nosné vlny družicového signálu jak ve statickém, tak i kinematickém režimu, lze ho využít jako referenčního přijímače při určování diferenciálních poloh v reálném čase a pro přenos korekcí

Rozměry: 203 mm x 216 mm x 99 mm

Hmotnost: 3,9 kg

Přesnost měření veličin: pásmo L1 (fáze 0,2 mm rms, fáze P kódu 0,2 mm rms, fáze C/A kódu 1 m, fáze P kódu 10,0 cm), pásmo L2 (fáze P kódu 0,3 mm rms)

Přesnost určení polohy: v reálné poloze do 20 m (bez SA), diferenciální v reálném čase 1 m

Doba určení polohy: do 2 min od zapnutí přijímače

Příkon: 12 W

Používaný souřadnicový systém: WGS 84

Možnosti využití přijímače:

- pro nejpreciznější geodetická měření ve statickém režimu v modu (rychlé spuštění měření, plánované měření a automatické zahájení měření ve stanovených dnech a hodinách);

- k monitorování lokálních polohových a výškových deformací, kde jsou vyžadovány centimetrové a vyšší přesnosti;

- v letecké fotogrammetrii při určování polohy kamery v okamžiku expozice a při určování polohy vlčcovacích bodů;

- ke zhušťování geodetických sítí a měření polygonových pořadů jak ve statickém, tak i kinematickém režimu v modu (kontinuálním, pseudo-static, Stop and Go);

- pro určování diferenciální polohy v reálném čase.

Možnosti softwaru přijímače:

- uložení až 14hodinového měření L1, L2 dat na 5 družic v paměti přijímače při intervalu záznamu 15 s;

- řešení a výpočet rozmanitých prvků navigace;

- plánování viditelnosti a dostupnosti družic apod.



TTD přijímače: Garmin GPS 100 AVD

Základní charakteristiky: malý a lehký L1 přijímač s možností sledování až 8 družic multi-track technologií s možností obnovy dat 1 s

Rozměry: 159 mm x 100 mm x 51 mm

Hmotnost: 0,71 kg

Přesnost určení polohy: autonomní 15 m (bez aktivace SA);

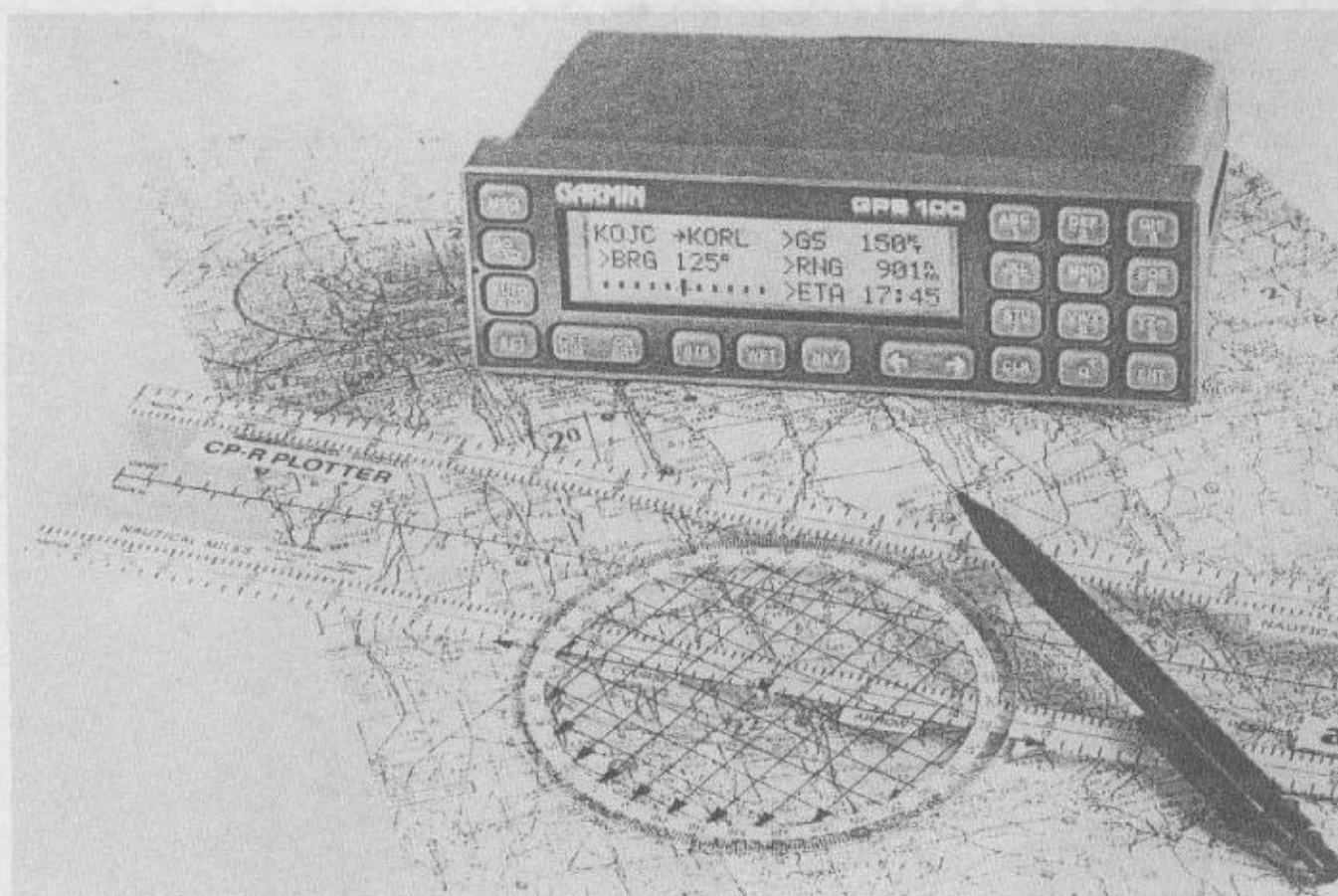
Doba určení polohy: 2D - 2 min, 3D - 2,5 min

Příkon: 10 W

Používaný souřadnicový systém: WGS 84

Možnosti využití přijímače:

- při určování trojrozměrné polohy v reálném čase;
- pro navigaci osob a techniky s možností výpočtů a zobrazení řady navigačních veličin na displeji přijímače, např.: vzdáleností a azimutů, rychlosti, odchylky od trasy přesunu, nejbližšího „waypoint“ apod.;
- v letectví; přijímač zobrazuje směr k nejbližším 9 letištím nebo uživatelem definovaným bodům.



TTD přijímače: Trimpack

Údaj / přijímač: TRIMPACK

Typ přijímače: 3kanálový, L1, C/A-kódový

Rozměry: 165 x 178 x 49 mm

Hmotnost: 1,9 kg

Napájení: vnitřní: 2 NiCd články (asi 0,5 kg), vnější: 9 až 32 V

Příkon: 5 W

Anténa vnitřní: vestavěná nízko profilová o rozměrech 95 x 95 x 15 mm, vnější: možnost připojení k vnější anténě GP

Měřené veličiny (přesnost): *B, L, H* (do ± 100 m), rychlost, azimut, příčná odchylka od plánované trasy, vzdálenost do místa určení apod.

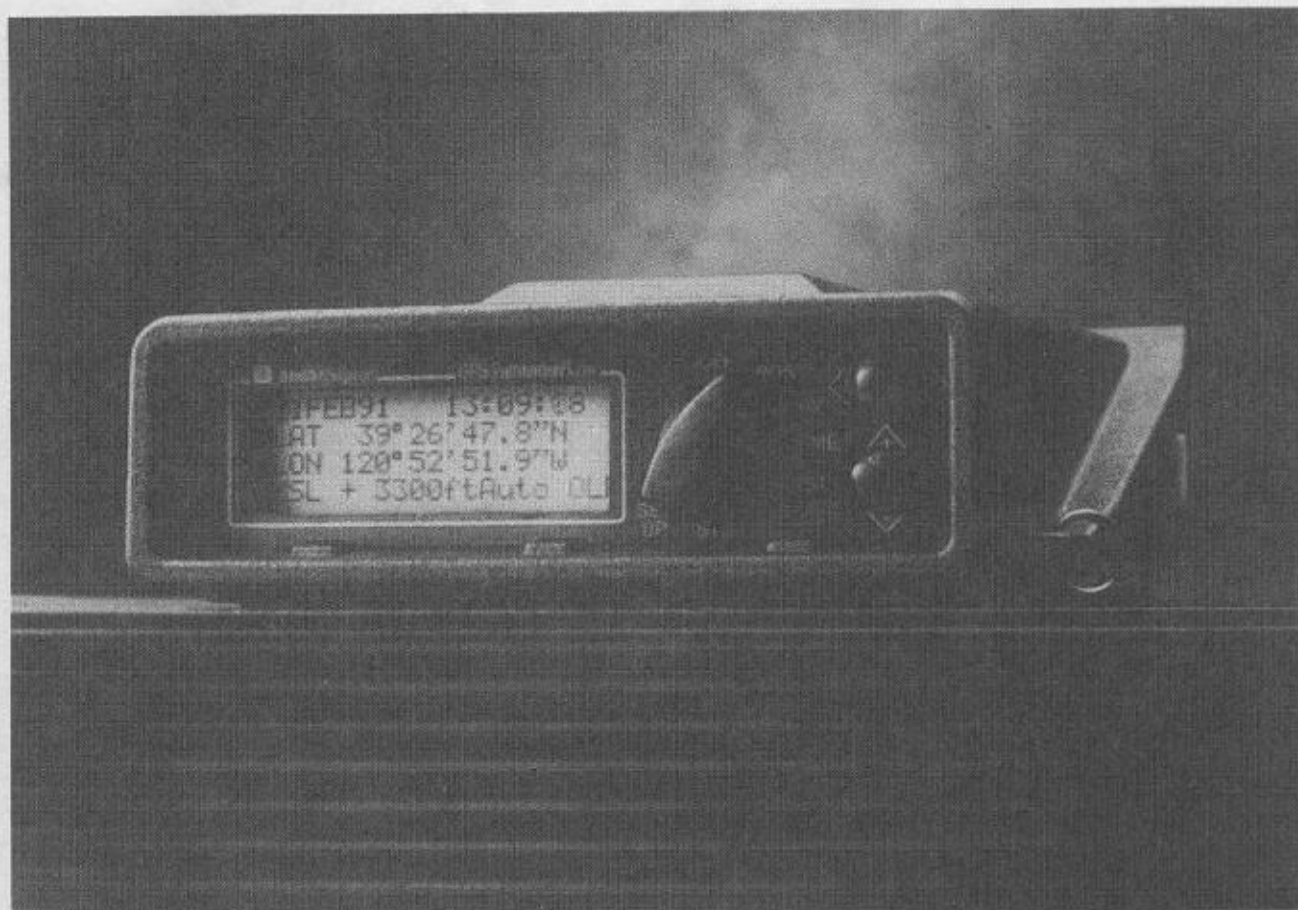
Opakovací interval měření: 1 s (možnost průměrování polohových údajů volbou menu)

Využití pro: určování polohy a navigaci v reálném čase, možno uložit do paměti až 26 tzv. waypoints

Odolnost vůči prostředí: otestován v americké armádě při bojové činnosti v Perském zálivu, teplota -30 °C až $+65$ °C, vlhkost 100 %

Možnosti využití přijímače:

- pro určování trojrozměrné polohy kdekoli, kdykoli a za jakýchkoliv meteorologických podmínek, ve dne i v noci, na Zemi a v jejím blízkém okolí, na místě i za pohybu, v reálném čase;
- k navigaci osob, techniky a dopravních prostředků do určených prostor;
- k zjišťování polohových údajů objektů všech druhů průzkumu;
- jako časového etalonu;
- pro plánování tras přesunů do určených prostor zejména v neznámém terénu.



When it Comes to Differential GPS, No One Does it Better.

Using a GPS Pathfinder[®] mapping system is the fastest way to put points on a map. Unfortunately, any GPS position can be off as much as 100 meters with U.S. Government-controlled Selective Availability (SA) and natural GPS signal errors. Trimble GPS Pathfinder mapping systems eliminate both types of errors and provide the accurate data you need.

Two Methods of improving GPS accuracy. *Differential correction* is usually the preferred method for obtaining high accuracy because it removes systematic errors like SA. By contrast, *averaging* only improves accuracy if the positions are randomly distributed about the true position. Recent experiences with SA show that this technique may need averaging times of many hours — hardly a productive way to conduct accurate mapping.

Avoid expensive stops. Some low-cost differential GPS mapping systems only record data when standing still, preventing data collection from a moving vehicle or even while walking! Moreover, SA-induced errors are moving targets. SA can cause distorted positioning faster than you can walk. Some GPS manufacturers actually ask you to phone in differential corrections to the field operator—but by the time the field operator has entered the correction, the error has changed.

Be free from fixed satellite configurations. Another problem is that many low-quality GPS software packages only permit differential corrections when the base station and rover receivers are using the same satellite configuration. With GPS Pathfinder mapping systems, the base station collects data from all satellites in view while the rover uses the best satellite combination available in the field. Fewer operating restrictions mean that you can get more work done and still improve accuracy.

Choose the best differential correction method. Only two differential correction methods solve accuracy degradation caused by the atmosphere and SA: *Postprocessing* with time-tagged data, and *real-time* corrections broadcast to the roving receiver. Other techniques are either impractical or inaccurate. So if you're considering a GPS mapping system and you need accuracy, demand differential capabilities that give you what you need: a programmable, unmanned base station, a rover that collects data on the fly, and the ability to differentially correct data either in real-time via an RTCM radio link or on a computer with powerful postprocessing software.

If the system can perform all these necessary tasks, then it can only be a Trimble GPS Pathfinder system. No one does it better.



The new Trimble
GPS Pathfinder
Professional

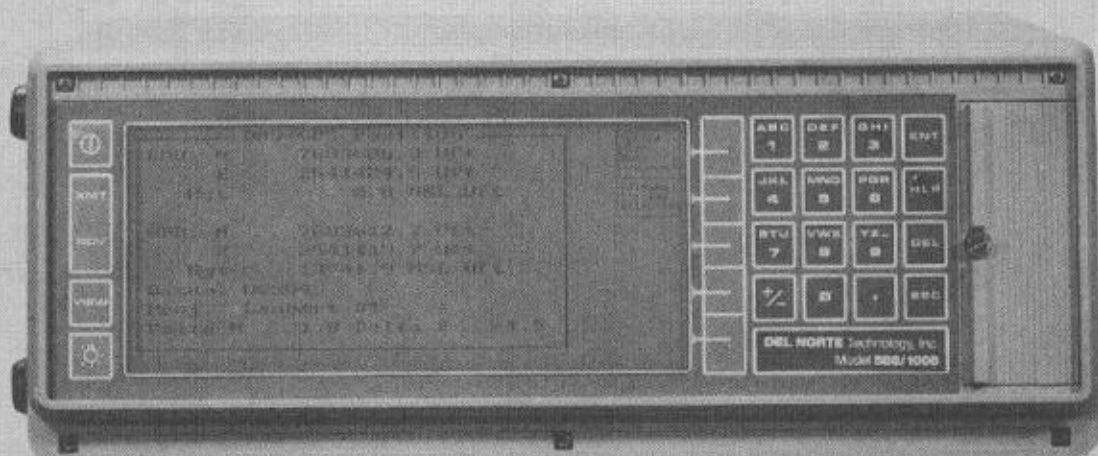


The GPS Pathfinder
Professional



TrimbleNavigation
The Leader in GPS Technology

How many pieces of survey equipment should you buy as your needs change?



Just one.

Flexibility, versatility, adaptability, the Del Norte Model 586 DMU/1008 GPS is designed to meet the constantly changing needs of your survey operation both today and tomorrow.

Flexible enough to start or complete your Trisponder[®] system, the 586 is an unequalled ranging system controller that can provide least squares solutions from as many as 12 remote stations. With a built-in Intel 386[™] Micro-Processor and 387[™] co-processor, the unit can work in multiple coordinate systems and use a variety of measurement units. User configurable serial I/O ports and internal logging allow varied data collection and logging options. When GPS satellite capabilities are required the 586 can be upgraded to a 1008 or 1012 GPS receiver by the simple installation of a GPS board set.

The Del Norte 1008/1012 GPS receiver provides full Global Positioning capabilities in addition to Trisponder

ranging. To meet your changing needs, the receiver may be used in the stand alone mode, as a differential mobile or reference station, or for geodetic data collection and processing. When operating as a mobile unit, Trisponder and (D)GPS positions can be calculated and displayed simultaneously for built-in Quality Control and total SA independence.

Future software up-grades are readily installed via the floppy disc drive, and Del Norte's world-wide service centers are available 24 hours a day to help you meet your specialized requirements.

A multi-function GPS receiver, a sophisticated micro-wave ranging controller, and a rugged, splash-

proof PC with flexible data logging and processing capability - the Del Norte 586/1008 GPS provides a one box solution to a wide range of survey requirements.

Simultaneous Range/Range-DGPS Operation

Stand-Alone, Differential, Geodetic GPS

Cost Effective GPS Upgrades

8 or 12 Channel L1/L2 GPS Receiver

Internal Logging-Mass Memory, Floppy Disk

Six User-Configurable I/O Ports
for Depth Integration, etc.

Multiple Coordinate Systems with Waypoint
and Navigation Graphics

DEL NORTE Technology, Inc.

NATO'S NEWEST ALLY

**DESERT STORM PROVEN.
COMBAT TOUGH.
USER AND BUDGET FRIENDLY.**

GPS plays a major role in determining military superiority. The GARMIN GPS 100 MIL will give your troops the tactical advantage. And help your commanders make informed, real-time decisions.

The GPS 100 MIL is the smallest and lightest military GPS receiver available today. Its Enhanced Military Operational System (EMOS) provides a powerful package of features designed for today's military needs. It provides maximum benefits at a minimum price.

GARMIN's advanced MultiTrac™ technology proved its worth in the Gulf, both with ground troops and in jet fighters. It tracks and uses 8 GPS satellites, horizon-to-horizon, to pinpoint your position whatever the conditions.

	Garmin GPS 100 MIL	Trimble Trimpack	Mogeson NAV1000M
Size (cu. in.)	494	1216	592
Weight (oz.)*	25	67.2	30
Battery life (hours)**	14	4	7
Waypoints	250	26	100
Data	101	50	47
MultiTrac	YES	NO	NO
Field Simulator	YES	NO	NO
Lighted Keypad	YES	NO	NO

*Without the AN-1177 MILSTAR. **Without the AN-1177 MILSTAR. †Without the AN-1177 MILSTAR. ‡Without the AN-1177 MILSTAR. §Without the AN-1177 MILSTAR. ¶Without the AN-1177 MILSTAR. ††Without the AN-1177 MILSTAR. †††Without the AN-1177 MILSTAR.

The rugged GPS 100 MIL is built for tough use. But it isn't tough to use. Or to procure. It fits your budget as easily as it fits your hand.

Enlist GARMIN GPS as your ally. You'll win.

GARMIN
COMMUNICATION & NAVIGATION

WE UNDERSTAND YOUR POSITION

11206 Thompson Avenue, Lenexa, Kansas 66219

Phone: 1-800-800-7020 or 913-799-1515

Fax: 913-799-2103





A robust, turnkey system with dynamic accuracy to 1-3 meters.

Real-Time Differential GPS involves operating a GPS receiver (Base) at a known location, where it observes the range errors of each GPS satellite and broadcasts corrections directly to a mobile GPS receiver (Remote) by radio, phone or other communications link. The remote's software then makes an integrity assessment and computes an instantaneous position fix.

Ashtech Ranger™ or M-Series receivers equipped with the Real-Time Differential GPS option do not require an external computer or complicated setup procedures. With 12 independent channels tracking all satellites in view, one base station can service any number of remote units within the

limits of the data link. (Any receiver may be designated either "base" or "remote" unit by a single front panel key entry.)

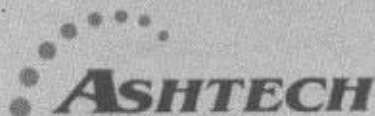
Remote receivers use the broadcast corrections to update their positions every half-second... with a differential accuracy of 1-3 meters rms (PDOP=4).

Differential corrections are output in standard RTCM SC-104 (Version 2.0) or standard Ashtech format.

The Ashtech Differential GPS systems are available on a turnkey basis with an integrated digital VHF/UHF radio communications link. Each Ashtech XII receiver is equipped with two RS232 ports

for communications link as well as for data recording, position analysis and external system interface.

While Ashtech GPS receivers include operational status monitoring, they are also designed for automatic unattended operation in the Differential Mode. If a power outage occurs, the receiver will restart automatically.



1170 Kifer Road, Sunnyvale, CA 94086
Phone (408) 524-1400 - Fax (408) 524-1500

**Ashtech
Real-Time
Differential GPS**

Sub-meter accuracy in a handheld GPS receiver? Only from Magellan.



Introducing the most accurate handheld GPS receiver in the world. The Magellan

and a fast, 1-second update rate. All this saves you time where it counts. In the field.

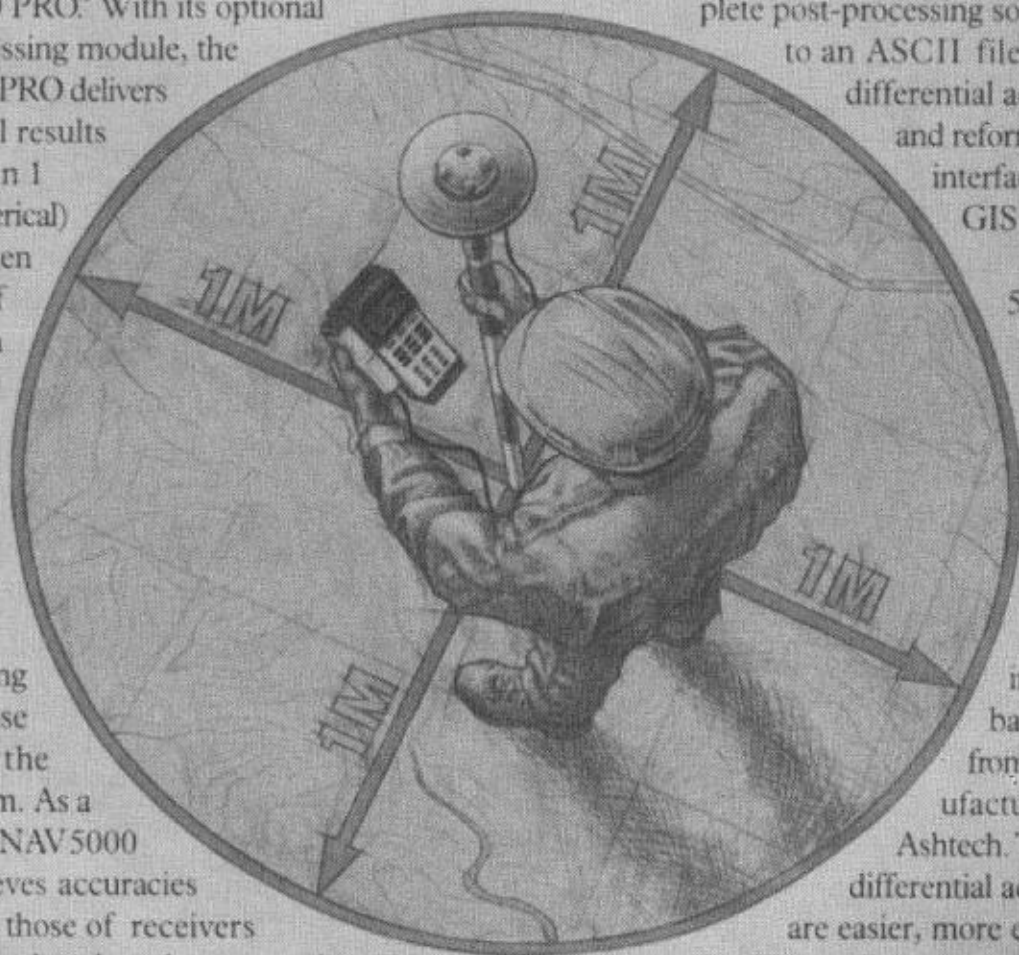
An RS-232 dataport on the NAV 5000 PRO lets you download to a PC or datalogger. Complete post-processing software logs

NAV 5000 PRO.™ With its optional post-processing module, the NAV 5000 PRO delivers differential results of less than 1 meter (spherical) with only ten minutes of observation time. The NAV 5000 PRO is the only handheld GPS receiver capable of downloading carrier phase data from the GPS system. As a result, the NAV 5000 PRO achieves accuracies exceeding those of receivers costing more than three times as much.

5-channel technology. Quick and easy data collection is provided by the power of five parallel channels. Continuous tracking results in fast time to first fix (less than 35 sec.)

to an ASCII file, processes differential adjustments and reformats for easy interface with most GIS systems.

The NAV 5000 PRO is the only receiver in its class with RINEX capability which provides the flexibility to interface with base stations from other manufacturers, like Ashtech. That means differential adjustments are easier, more economical.

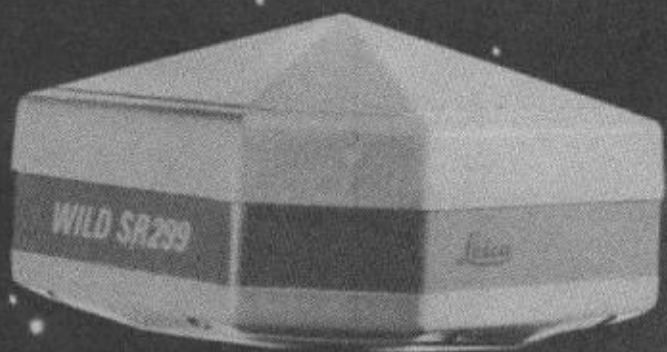


Sub-meter

Get affordable, sub-meter GPS accuracy with the NAV 5000 PRO.

The most powerful tool available for all your positioning needs. Only from Magellan.

MAGELLAN
WE BRING GPS DOWN TO EARTH™



The new WILD GPS surveying system

- *Dual frequency*
- *Short observation times*
- *5 mm + 1 ppm baseline rms*
- *Surveying and navigation*

Leica Inc., 111 Deer Lake Road, Deerfield, IL 60015

Toll free 1-800-846-9190 • Telephone 1-708-405-0123 • Fax 1-708-405-0036

Leica Heerbrugg AG • CH - 9435 Heerbrugg (Switzerland) • Telephone +41 (071) 703 131 • Fax +41 (071) 703 998

With its *HEERBRUGG*, *KERN SWISS*, and *CAMBRIDGE INSTRUMENTS* product lines, Leica provides the most complete range of instruments and systems for survey data. Leica plc, with 11,000 employees worldwide, is a group of companies formed in 1986 by the merger of Cambridge Instruments and Wild Leitz. It also makes and sells the world-famous Leica range of microscopes and microscopes, and Leica cameras, binoculars, and projectors. You can obtain Leica advice and service in 128 countries.

Leica

Circle 30

GPS simulator

Welnavigate offers the GS-500, a single-channel GPS simulator that mimics L1 C/A-code signals from GPS Navstar satellites and produces all of the 37 pseudorandoms specified by ICD-GPS-200. A complete almanac contains 12.5 minutes of data, while an internal computer controls doppler and acceleration. The unit can generate an L1 clear wave signal for power-level calibration. The 21 × 17 × 6.5-inch unit and case weigh 19 pounds. **Welnavigate, Inc.**, Simi Valley, California, USA.

Circle 66

Security module

Motorola offers the GPS Sharpshooter Security Module, which integrates all cryptographic functions for SA and six AS channels. The less-than-1-inch-square unit reportedly replaces up to seven custom LSI devices: one precise positioning security module and six independent auxiliary output chips. **Motorola**, Scottsdale, Arizona, USA.

Circle 67

GPS receiver

The bc700VME from Bancomm is a double-width VMEbus timing module combining a real-time clock oscillator with a six-channel GPS satellite receiver. The system supplies UTC with 100-nanosecond precision and continuous time and frequency coverage and offers an optional airborne antenna. Time is supplied either via IRIG B or UDP/IP network time protocol. **Bancomm, Division of Datum, Inc.**, San Jose, California, USA.

Circle 68

Mapping software

Armasi offers CadSpan, a real-world mapping program that combines spatial information with data from a spreadsheet or database. Working with EasyCAD 2 or FastCAD from Evolution Computing, CadSpan creates a map file with color, line, and fill style of the selected spreadsheet or database. The menu-driven program allows users to set up a separate menu to access CAD and data management programs from within CadSpan. **Armasi, Inc.**, Alachua, Florida, USA.

Circle 69

DGPS beacon receiver

The Magnavox MX-50R Beacon Receiver relays DGPS corrections broadcast by marine beacons in the 283.5–325.0 kHz range with frequency resolution of 500 Hz. The 6.8 × 5.5 × 1.8-inch unit weighs 1.8 pounds and is reportedly accurate to 5 meters in DGPS configuration. The system includes a noise blanker, preamp and antenna, data processing, and is designed for navigation, surveying, vehicle-vessel tracking, and position location. **Magnavox Electronic Systems Co., West Coast Division**, Torrance, California, USA.

Circle 70



Handheld marine receiver

Trimble introduces the Ensign GPS, a handheld receiver that tracks up to eight satellites and runs 5–10 hours on four AA batteries. In addition to providing standard navigation information, the hand-sized unit is available in seven languages and plans up to nine separate routes and 100 waypoints, with updates every 1.5 seconds. It is designed for smaller recreational boats and as a back-up system for any size vessel. **Trimble Navigation**, Sunnyvale, California, USA.

Circle 71

Digital data transfer

Publication IHO SP-57 from the International Hydrographic Organization (IHO) is designed to facilitate the transfer of digital data between dissimilar computer systems. SP-57 contains an object catalog, file content and format specifications, and digitizing conventions in a looseleaf manual and on several 3.5-inch floppy disks. A self-describing format scheme transfers catalogs, dictionaries, and geographic feature data for elec-

tronic chart displays, nautical charts, and hydrographic surveys. **Hydrographic Society of America**, Rockville, Maryland, USA.

Circle 72

DGPS station

The Long Range Differential GPS Station from Sercel incorporates a 10-channel reference GPS receiver that computes pseudo-range corrections for all satellites in view, a geodetic-type reference antenna, and a data-link in a single unit. Software for the receiver uses phase-smoothing techniques to reduce noise and multipath effects. Data transmission is in the high frequency band and the range reportedly is over 700 kilometers. **Sercel-France**, Carquefou, France.

Circle 73

GPS receiver

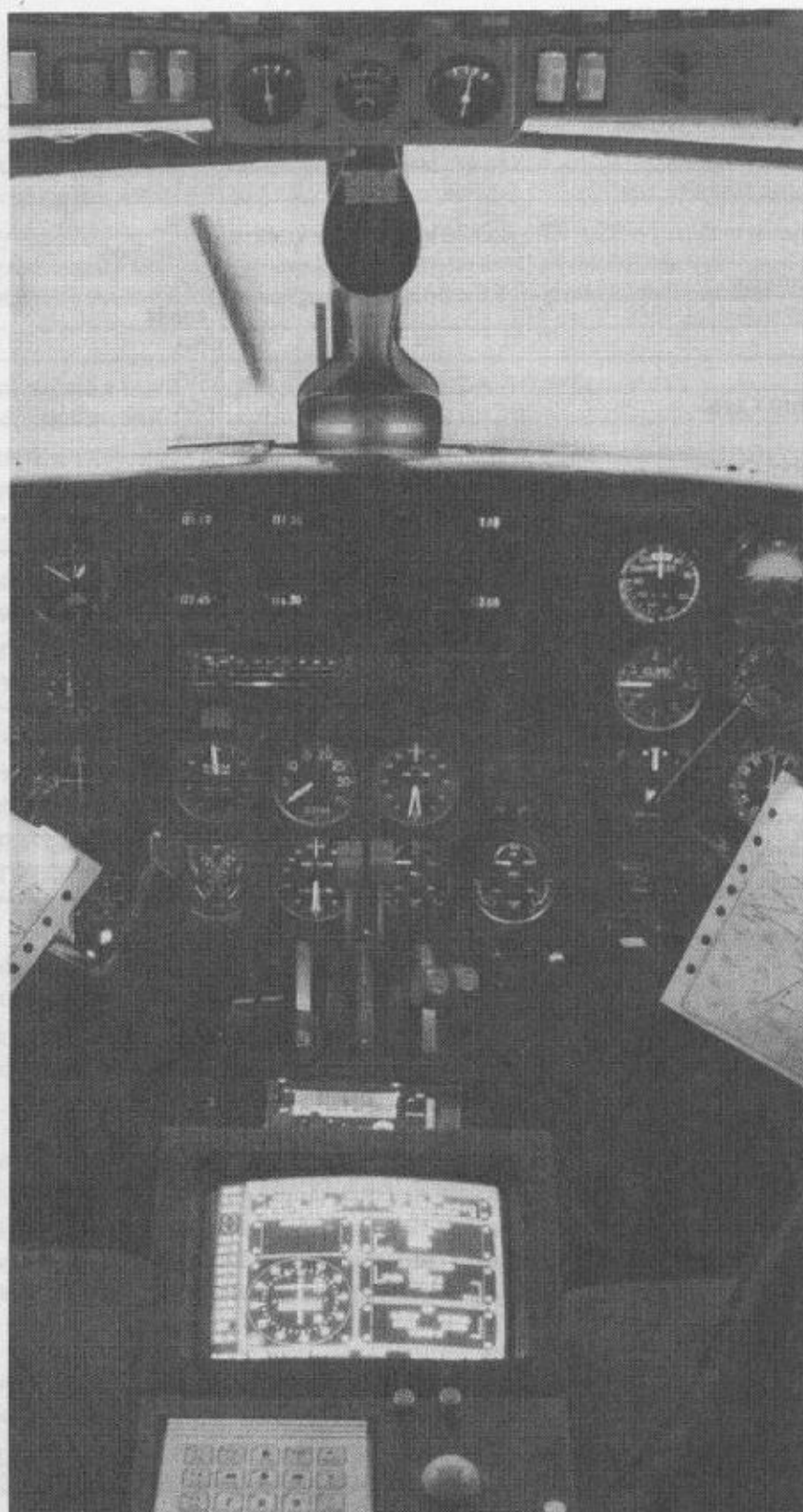
Odetics introduces the GPStar GPS time and frequency receiver that tracks up to five satellites and reportedly provides timing accuracy of 100 nanoseconds of UTC (without SA). The receiver features a down-converter that is included in the antenna to accommodate long cable length for use in metropolitan areas, an eight-digit scrolling display, an optional IRIG time-code generator, and a built-in intelligent power supply. When used as a frequency standard, GPStar reportedly provides 5×10^{-10} frequency accuracy with a frequency synthesizer ranging from 1 to 30 MHz. **Odetics**, Anaheim, California, USA.

Circle 74

Geodetic software

Best-Fit Computing introduces Columbus 2, 3D one-, two-, and three-dimensional geodetic network adjustment and coordinate transformation software. Columbus serves small or large networks in base or extended memory and combines data from multiple sources into one network. Features include additional observation types, data collector support, DXF file creation, additional outlier detection methods, on-line help, and user-defined parameter entry for single- or double-parallel and Transverse Mercator projection methods. **Best-Fit Computing**, Tucson, Arizona, USA.

Circle 75



Navigační zařízení GPS v kabině letounu

Seznam doposud známých výrobců přijímačů GPS

Výrobce	Stát
Trimble Navigation	USA
ASHTECH	USA
TOPCON	Japan
Leica (Wild)	Switzerland
Texas Instruments Inc.	USA
Sercel-France	Canada
Magnavox	USA
Garmin	USA
Magellan Systems Corp.	USA
ISTAC Inc.	USA
Canadian Marconi Company	Canada
Litton Aero Products	USA
Motorola Inc.	USA
Norstar Instruments Ltd.	Canada
Rockwell International	USA
Sony Corporation	Japan
EDO Canada Ltd.	Canada
Interstate Electronics Corp.	USA
Japan Radion Corporation	Japan
Prakla-Seismos AG	Germany
Standard Elektrik Lorenz AG	Germany
Standard Telecommunications Inc.	USA
Starnav Corporation	Canada
WM Satellite Survey Company	Switzerland

Poznámka: Seznam adres shora uvedených výrobců přijímačů je možné získat u VS 090 Praha.

Anotace

RADĚJ, K.

1. Problematika GPS v topografickém zabezpečení vojsk.

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 7 - 8.

Úvod do tematicky zaměřeného Sborníku, který informuje příslušníky TS AČR o zavádění technologie měření GPS do praxe. Připomenuty jsou metody měření, které umožnily dosáhnout kvalitativních změn v navigaci a v geodézii. Zavedení technologie GPS umožní TS AČR účinně se zapojit do modernizace čes. geodetických základů.

DUŠÁTKO, D.

2. Stručný přehled pojmů z teorie pohybu umělých družic Země (UDZ).

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 9 - 11, 1 obr.

Principy pohybu UDZ a vlivy, které na ně působí. Vliv tíhového pole Země na pohyb UDZ. V současnosti používané technologie družicové a kosmické geodézie.

DUŠÁTKO, D.

3. Klasické a geocentrické geodetické systémy.

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 12 - 18, 2 obr., lit. 21.

Parametry geodetických systémů, geometrické a dynamické parametry geocentrického systému. Charakteristika WGS 84. Postup převedení klasické trigonometrické sítě do prostorové konstrukce GPS.

MATONOHA, J.

4. Základní informace o systému GPS a jeho charakteristiky.

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 19 - 32, 8 obr., lit. 12.

Konfigurace systému GPS, struktura signálu GPS, měřené veličiny a jejich využití při určování polohy. Zdroje chyb. Určování absolutní a relativní polohy.

JONÁŠ, V.

5. Využití technologie GPS pro geodetické účely.

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 33 - 43, 2 obr., lit. 19.

Uplatnění technologie GPS v geodézii. Základní rovnice a metody měření při geodetických aplikacích. Chyby ovlivňující přesnost relativního GPS. Možnosti využití GPS v geodetických základech a další aplikace.

MATONOHA, J.

6. Využití systému GPS v navigaci a TGZ.

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 44 - 52, 4 obr., 2 tab., lit. 10.

Navigace pohyblivých objektů s využitím systému GPS. Určování navigačních prvků - polohy, rychlosti pohybu a dalších. Typy navigace - navigace nižší a vyšší přesnosti. Formát zprávy pro korekci dat. Možnosti navigačního zabezpečení různých druhů vojenských systémů. Navigační technika GPS a charakteristiky přesnosti.

JANUS, P.

7. Technologie měření GPS.

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 53 - 60, 7 obr.

Přehled technologií měření GPS. Rekognoskace bodů, volba metody měření, plánování a měření. Převod měřených dat z přijímače do výpočetní jednotky až po jejich zpracování.

JONÁŠ, V.

8. Zpracování měření GPS a jeho softwarové zabezpečení.

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 61 - 62.

Příprava měřených údajů před zpracováním. Programové vybavení pro zpracování výsledků měření metodou GPS.

TÚMA, M.

9. Aplikace technologií GPS v topograficko-geodetickém zabezpečení.

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 63 - 69, 2 obr., 5 tab.

Režimy měření metodou GPS se zaměřením na jejich efektivnost při geodetických měřeních a sběru dalších údajů, zejména pro geografický informační systém (GIS). Postup zaměření sítě nultého řádu (CS-NULRAD-92), výsledky a zkušenosti.

NEVOSÁD, Z.

10. Určení místních měřítkových a úhlových změn v polohovém bodovém poli.

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 70 - 81, 20 obr., lit. 6.

Začlenění měření přijímači GPS do referenčního geodetického systému. Návrh vhodné geometrické konfigurace měření při použití dvou, tří, čtyř a více měřických stanic. Návrh a popis kontrol kvality určovaných bodů. Výpočet místní měřítkové a úhlové změny zaměřované sítě. Transformace a vyrovnání družicových sítí v rovině. Rovnice oprav.

ŠILHAN, V.

11. Měření GPS v astronomicko-geodetické síti ČSFR.

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 82 - 90, 4 obr., 2 tab., lit. 3.

Hlavní cíle a účel měření GPS v astronomicko-geodetické síti ČSFR v roce 1992. Dopplerovské měření na území ČSFR. Zaměření sítě nultého řádu kampaně CS-NULRAD-92. Zaměření vojenské geodetické sítě nultého řádu VGSN-92. Účel a popis dalších aktivit GPS na území ČSFR v roce 1992.

JINDRA, D.

12. Informace o praktických zkušenostech s geodetickými aplikacemi systému GPS v Zeměměřickém ústavu.

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 91 - 96, 4 obr., lit. 6.

Obecné zásady plánování, rozpisu observací a činnosti obsluhy přijímače GPS na stanovišti v průběhu měření. Praktické poznatky. Přesnost trojúhelníkových uzávěrů vyrovnaných vektorů v prostoru, rovině a v převýšení. Výsledky měřických aktivit v letech 1991 a 1992.

ŠILHAN, V.

13. Možnosti využití GPS v analytické aerotriangulaci.

Sborník topografické služby, 1992, č. 3, s. 97 - 98, 1 tab., lit. 3.

Souhrn zahraničních zkušeností získaných využíváním technologií GPS v letecké aerotriangulaci. Možnosti a výsledky dosažené nasazením aparatur GPS při určování souřadnic středu projekce fotogrammetrickou kamerou umístěnou v letounu v okamžiku expozice. Návrhy a doporučení.

Annotations

RADĚJ, K.

1. GPS-problems in topo-geodetic security of troops.

Introduction to the thematically oriented volume, informing the members of the Topographic Service of the Czech Republic Army on introducing GPS-measurement technology into the practice. Measuring methods are mentioned, that have enabled to achieve qualitative changes in navigation and geodesy. The establishment of GPS-technology will enable the Topographic Service of the Czech Republic Army to join effectively in the modernization of Czech geodetic control.

DUŠÁTKO, D.

2. Concise review of terms from the Earth Satellite motion theory.

Principles of the movement of artificial Earth satellites and factors, that are affecting them. Influence of the gravity field of the Earth upon the movement of artificial Earth satellites. Present technologies of satellite and cosmic geodesy.

DUŠÁTKO, D.

3. Classical and geocentric geodetic systems.

Parameters of geodetic systems, geometric and dynamic parameters of a geocentric system. Characteristics of WGS 84. Process of transfer of a classical trigonometric network into the space construction of GPS.

MATONOHA, J.

4. Fundamental information on GPS and its characteristics.

Configuration of GPS, structure of the GPS-signal, measured values and their utilization in positioning. Error sources. Determination of absolute and relative positions.

JONÁŠ, V.

5. Utilization of GPS-technology for geodetic purposes.

Applying of GPS-technology in geodesy. Fundamental equations and measuring methods in geodetic applications. Errors affecting the accuracy of relative GPS-measurement. Possibilities of GPS-utilization for geodetic control and in other applications.

MATONOHA, J.

6. Utilization of GPS in navigation and in topo-geodetic security.

Navigation of moving objects with aid of GPS. Determination of navigation elements - position, velocity of movement and other elements. Types of navigation - navigation of higher and lower precision. Message format for data correction. Possibilities of navigation security of various military systems. Navigation technique of GPS and characteristics of precision.

JANUS, P.

7. Technology of GPS measurements.

Overview of GPS-measurement technologies. Reconnaissance of points, choice of measuring methods, planning and measurement. Transfer of measured data to the computer unit after their processing.

JONÁŠ, V.

8. Processing of GPS-measurements and its software support.

Preparation of measured data before their processing. Software for processing of results of GPS-measurements.

TŮMA, M.

9. Application of GPS-technologies in topo-geodetic security.

Modes of GPS-measurements with regard to their effectiveness during geodetic measurements and other data collection, particularly for a Geographic Information System (GIS). Process of surveying of the 0-order network (CS-NULRAD-92), results and experience.

NEVOSÁD, Z.

10. Determination of local scale and angle changes in a planimetric point field.

Incorporation of measurements with aid of GPS-receivers into a geodetic reference system. Proposal of an appropriate geometric configuration of measurements using two, three, four or more stations. Proposal and description of local scale and angle changes of a surveyed network. Transformation and adjustment of satellite network in a plane. Correction equations.

ŠILHAN, V.

11. GPS-measurements in the astro-geodetic network of the CSFR.

Main objectives and purposes of GPS-measurements in the astro-geodetic network of the CSFR in 1992. Doppler measurements on the territory of the CSFR. Surveying of the 0-order network during the CS-NULRAD-92 campaign. Surveying of the military 0-order geodetic network VGSN-92. Purpose and description of further GPS activities on the territory of the CSFR in 1992.

JINDRA, D.

12. Information on practical experience with geodetic applications of GPS in the Surveying Institute.

General principles for planning, for specification of observations and for the activity of GPS-receiver operator on the station in the course of measurement. Practical knowledge. Accuracy of triangle closing of adjusted vectors in the space, plane and elevation. Results of measurements in 1991 and 1992.

ŠILHAN, V.

13. Possibilities of GPS-utilization in analytical aerotriangulation.

Summary of foreign experience gained by utilization of GPS-technologies in the aerotriangulation. Possibilities and results achieved with aid of GPS devices in determination of projection center coordinates of an airborne photogrammetric camera in the moment of exposition. Proposals and recommendations.

Annotationen

RADĚJ, K.

1. GPS-Problematik in der topographischen Sicherstellung der Truppen.

Einführung in eine thematisch orientierte Sammelschrift, welche die Angehörigen des Topographischen Dienstes der Tschechischen Armee über die Einführung der GPS-Meßtechnologie in die Praxis informiert. Es werden Messungsmethoden erwähnt, die die Erreichung von qualitativen Änderungen in der Navigation und Geodäsie ermöglichen. Die Einführung der GPS-Technologie wird dem Topographischen Dienst der Tschechischen Armee ermöglichen, sich wirksam der Modernisierung der geodätischen Grundlagen anzuschließen.

DUŠÁTKO, D.

2. Kurze Übersicht der Begriffe der Bewegungstheorie der künstlichen Erdsatelliten.

Prinzip der Bewegung der künstlichen Erdsatelliten und Faktoren, die sie beeinflussen. Einfluß des Schwerefeldes der Erde auf die Bewegung der Erdsatelliten. Gegenwärtige Technologien der Satellitengeodäsie und der kosmischen Geodäsie.

DUŠÁTKO, D.

3. Klassische und geozentrische geodätische Systeme.

Parameter der geodätischen Systeme, geometrische und dynamische Parameter des geozentrischen Systems. Charakteristik des Geodätischen Weltsystems (WGS 84). Prozess der Überführung des klassischen trigonometrischen Netzes in die Raumkonstruktion des GPS.

MATONOHA, J.

4. Grundinformationen über das GPS-System und seine Charakteristiken.

Konfiguration des GPS, Struktur des GPS-Signals, gemessene Werte (Größen) und ihre Ausnutzung bei der Lagebestimmung. Fehlerquellen. Bestimmung der absoluten und relativen Lage.

JONÁŠ, V.

5. Ausnutzung der GPS-Technologie für geodätische Zwecke.

Einsatz der GPS-Technologie in der Geodäsie. Fundamentale Gleichungen und Meßmethoden in den geodätischen Anwendungen. Fehler, welche die Genauigkeit des relativen GPS beeinflussen. Ausnutzungsmöglichkeiten des GPS in den geodätischen Grundlagen und andere Anwendungen.

MATONOHA, J.

6. Ausnutzung des GPS-Systems in der Navigation und in der topographisch-geodätischen Sicherstellung.

Navigation beweglicher Objekte mit Ausnutzung des GPS. Bestimmung der Navigationselemente - Lage, Bewegungsgeschwindigkeit und andere Elemente. Navigationstypen - Navigation von höherer und niedriger Genauigkeit. Nachrichtenformat für die Datenkorrektur. Möglichkeiten der Sicherung verschiedener Militärsysteme durch Navigation. Navigationstechnik des GPS und ihre Genauigkeitscharakteristik.

JANUS, P.

7. Meßtechnologie des GPS.

Übersicht der Meßtechnologien des GPS. Rekognoszierung der Punkte, Wahl der Meßmethode, Planung und Messung. Übertragung der Meßdaten von dem Empfänger in die Recheneinheit erst nach ihrer Verarbeitung.

JONÁŠ, V.

8. Bearbeitung der GPS-Messungen und ihre Software-Sicherstellung.

Vorbereitung der Meßdaten vor der Verarbeitung. Software für die Verarbeitung der Ergebnisse der GPS-Messungen.

TŮMA, M.

9. Anwendung der GPS-Technologie in der topographisch-geodätischen Sicherstellung.

Betriebsarten der GPS-Messungen mit Hinblick auf ihre Effektivität bei geodätischen Messungen und bei weiterer Datenerfassung, insbesondere für das Geographische Informationssystem (GIS). Verfahren der Vermessung des Netzes 0.-Ordnung (CS-NULRAD-92), Ergebnisse und Erfahrungen.

NEVOSÁD, Z.

10. Bestimmung der lokalen Maßstabs- und Winkeländerungen im Lagepunktfeld.

Eingliederung der mit GPS-Empfängern durchgeführten Messungen in ein geodätisches Bezugssystem. Entwurf einer geeigneten geometrischen Messungskonfiguration bei der Verwendung von zwei, drei, vier und mehr Meßstationen. Vorschlag und Beschreibung der Qualitätskontrollen der zu bestimmenden Punkte. Berechnung der lokalen Maßstabs- und Winkeländerungen in dem zu vermessenden Netz. Transformation und Ausgleichung des Satellitennetzes in der Ebene. Korrektionsgleichungen.

ŠILHAN, V.

11. GPS-Messungen im astronomisch-geodätischen Netz der Tschechoslowakischen Föderativen Republik.

Hauptziele und Zweck der GPS-Messungen im astronomisch-geodätischen Netz der TschSFR im Jahre 1992. Doppler-Messungen auf dem Gebiet der TschSFR. Vermessung des Netzes 0.-Ordnung im Rahmen der Kampagne CS-NULRAD-92. Vermessung des militär-geodätischen Netzes 0.-Ordnung VGSN-92. Zweck und Beschreibung weiterer GPS-Aktivitäten auf dem Gebiet der TschSFR im Jahre 1992.

JINDRA, D.

12. Informationen über die praktischen Erfahrungen mit den geodätischen Anwendungen des GPS-Systems im Vermessungsinstitut.

Allgemeine Grundsätze der Planung, Aufteilung der Observationen und der Tätigkeiten der Bedienung der GPS-Empfänger auf der Station während der Messung. Praktische Erkenntnisse. Genauigkeit der Dreiecksabschlüsse der ausgeglichenen Vektoren im Raum, in der Ebene und in der Überhöhung. Ergebnisse der Meßaktivitäten in den Jahren 1991 und 1992.

ŠILHAN, V:

13. Ausnutzungsmöglichkeiten des GPS in analytischer Aerotriangulation.

Zusammenfassung der ausländischen, durch die Ausnutzung der GPS-Technologien gewonnenen Erfahrungen in der Aerotriangulation. Durch den Einsatz der GPS-Geräte erzielte Möglichkeiten und Ergebnisse der Bestimmung von Koordinaten der Projektionsmitte der Photokamera, die sich im Flugzeug befindet, in Augenblick der Belichtung. Vorschläge und Empfehlungen.