

**ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE**

**STAVEBNÁ FAKULTA**

**Katedra geodézie**

# **GLOBÁLNE NAVIGAČNÉ SYSTÉMY**

**1. vydanie**

**Učebný text pre študentov bakalárskeho štúdia odboru geodézia a kartografia**

**<http://svf.utc.sk/kgd/>**

**Ing. PISCA Peter, PhD.**

**2005**

## Obsah

<b>ÚVOD.....</b>	<b>4</b>
<b>1 ČO JE GPS.....</b>	<b>5</b>
1.1 SYSTÉM NAVSTAR GPS.....	5
1.2 SYSTÉM GLONASS.....	5
1.3 SYSTÉM GALILEO.....	5
<b>2 NAVSTAR GPS .....</b>	<b>6</b>
2.1 POPIS SYSTÉMU GPS NAVSTAR.....	6
2.2 BUDOVANIE NAVSTAR GPS.....	6
2.3 SEGMENTY NAVSTAR GPS.....	6
2.3.1 Kozmický segment.....	6
2.3.2 Riadiaci segment.....	7
2.3.3 Používateľský segment.....	8
<b>3 SIGNÁLY VYSIELANÉ GPS.....</b>	<b>9</b>
3.1 KÓDY VYSIELANÉ DRUŽICAMI.....	10
3.1.1 Pseudonáhodný C/A kód.....	10
3.1.2 Pseudonáhodný P kód.....	11
3.2 NAVIGAČNÁ SPRÁVA.....	11
<b>4 METÓDY URČENIA PSEUDOVZDIALENOSTÍ.....</b>	<b>13</b>
4.1 ZÁKLADNÉ POJMY A VZŤAHY.....	13
4.2 URČENIE PSEUDOVZDIALENOSTÍ POMOCOU PSEUDONÁHODNÝCH KÓDOV.....	14
4.3 URČENIE PSEUDOVZDIALENOSTÍ POMOCOU FÁZY NOSNEJ VLNY.....	14
<b>5 MATEMATICKÝ MODEL URČOVANIA POLOHY BODU.....</b>	<b>17</b>
5.1 ABSOLÚTNE URČOVANIE POLOHY MERANÍM PSEUDOVZDIALENOSTÍ POMOCOU KÓDOV.....	18
5.2 VPLYV ROZLOŽENIA DRUŽÍC NA PRESNOŠŤ URČOVANIA ABSOLÚTNEJ POLOHY.....	20
<b>6 SYSTEMATICKÉ EFEKTY V MERANIACH GPS.....</b>	<b>25</b>
6.1 ATMOSFÉRIKÉ EFEKTY.....	25
6.2 RELATIVISTICKÉ EFEKTY.....	26
6.3 EFEKT VIACESTNÉHO ŠÍRENIA SA SIGNÁLU.....	27
<b>7 METÓDY MERANIA POMOCOU GPS .....</b>	<b>29</b>
7.1 ZÁKLADNÉ POJMY.....	29
7.2 ABSOLÚTNE URČOVANIE POLOHY POMOCOU KÓDOVÝCH MERANÍ.....	30
7.2.1 Diferenciálne určovanie polohy – DGPS.....	31
7.2.2 DGPS pre rozsiahle územia – WADGPS.....	31
7.2.3 Metódy šírenia diferenciálnych korekcií.....	31
7.3 METÓDY RELATÍVNEHO URČOVANIA POLOHY.....	32
7.3.1 Relatívne určovanie polohy statickou metódou.....	32
7.3.2 Rýchla statická metóda.....	33
7.3.3 Kinematické (polokinematické) relatívne určovanie polohy.....	33
7.3.4 Kinematická metóda v reálnom čase - RTK.....	34
7.3.5 Pseudokinematické relatívne určovanie polohy.....	35
7.4 PRESNOŠŤ URČOVANIA POLOHY POMOCOU GPS.....	35
<b>8 TRANSFORMÁCIE SÚRADNÍC.....</b>	<b>37</b>
8.1 TRANSFORMÁCIA MEDZI KARTEZIÁNSKÝMI A ELIPSOIDICKÝMI SÚRADNICAMI VO WGS-84.....	37
8.2 VÝPOČET POMOCOU ITERÁCIÍ.....	38
8.3 METÓDA VÝPOČTU PODĽA BOWRINGA.....	38
8.4 TRANSFORMÁCIA SÚRADNÍC WGS-84 DO SÚRADNICOVÉHO SYSTÉMU JTSK.....	39
8.5 LINEÁRNA KONFORMNÁ TRANSFORMÁCIA.....	39
8.6 PODOBNOSTNÁ TRANSFORMÁCIA SÚRADNÍC V PRIESTORE.....	39
8.7 TRANSFORMÁCIE VÝŠOK.....	40

<b>9 PRIJÍMAČE A SOFTVÉRY.....</b>	<b>43</b>
9.1 VŠEOBECNÁ KONCEPCIA GEODETICKÉHO PRIJÍMAČA GPS.....	43
9.2 ASHTECH PROMARK II.....	46
<b>10 ŠTANDARDNÉ VÝMENNÉ FORMÁTY PRE ÚDAJE GPS.....</b>	<b>48</b>
10.1 FORMÁT RINEX PRE SÚBOR MERANÍ GPS NEZÁVISLÝ OD TYPU PRIJÍMAČA.....	48
10.2 FORMÁT RINEX PRE NAVIGAČNÚ SPRÁVU.....	50
10.3 ŠTANDARDNÝ FORMÁT VÝSLEDKOV RIEŠENIA SIETE GPS (SINEX).....	51
<b>LITERATÚRA.....</b>	<b>53</b>

## Úvod

Geodézia a kartografia vo všeobecnosti predstavuje vedný odbor, ktorý sa zaoberá predovšetkým meraním a zobrazovaním zemského povrchu, ako aj spracovaním výsledkov merania, ktoré majú význam v rôznych odvetviach činností človeka. Podobne ako vo všetkých oblastiach ľudského života, aj geodézia ako vedný odbor sa stále vyvíja a vznikajú tu stále nové spôsoby a metódy merania. Jedným z nich je určovanie polohy a času pomocou globálneho systému na určenie polohy (GPS). Táto metóda umožňuje určiť vektor medzi dvoma bodmi so sub-centimetrovou presnosťou.

Aplikácie založené na využití globálnych systémov na určenie polohy sa v dnešnej dobe neustále rozvíjajú. Prednosťami meracích techník GPS sú efektívnosť, dostupnosť a jednoduché ovládanie.

# 1 Čo je GPS

**GPS** - globálny systém na určenie polohy je družicový navigačný systém vybudovaný na určovanie polohy a času kedykoľvek a kdekoľvek na Zemi, nezávisle od aktuálnych meteorologických podmienok.

Určenie polohy meraného bodu sa dá vysvetliť tak, že sa nachádza v priesečníku guľových plôch, ktorých polomer je daný meranými vzdialenosťami medzi družicou a určeným bodom. Z geometrického hľadiska je nutné poznať polohu minimálne troch družíc na určenie polohy určeného bodu. Pretože určenie vzdialenosti medzi družicou a určeným bodom spočíva vo využití presných časových informáciách, je nutné pre výpočet poznať polohu štyroch družíc. Na dosiahnutie vysokej presnosti určenia polohy je dôležité, aby sme využívali čo najväčší možný počet viditeľných družíc, ktoré musia byť vhodne rozložené na sfére.

Aplikácie založené na technológii GPS sú skoro neobmedzené. Môžu sa uplatniť vo všetkých oblastiach ľudskej činnosti. Rozsah využitia GPS sa neustále zväčšuje: piloti môžu využívať GPS k vyhľadávaniu letísk, námorníci prístavov, turisti sa môžu orientovať v neznámej krajine, rybári si môžu zistiť vhodnú dobu na lov a geodeti môžu určiť polohu bodu s milimetrovou presnosťou. Jediným obmedzením je nutnosť priamej viditeľnosti na oblohu.

V súčasnosti existujú rôzne systémy na určovanie polohy a času. Niektoré sú ešte v štádiu projektov a niektoré sú funkčné, nie však v úplnej konfigurácii.

## 1.1 Systém NAVSTAR GPS

V súčasnosti najlepšie prepracovaným a jediným úplne funkčným družicovým systémom na určovanie polohy a času je systém NAVSTAR GPS ( Navigation Satellite Timing And Ranging) - navigačný systém na určovanie času a vzdialeností pomocou družíc. Vytvára sa v USA od roku 1973. Tomuto systému sa budeme venovať podrobnejšie v nasledujúcich kapitolách.

## 1.2 Systém GLONASS

Globálny navigačný družicový systém GLONASS (**GLO**bal'naja **NA**vigacionnaja **S**putnikovaja **S**istema) je ruská alternatíva NAVSTAR. Jeho koncepcia vznikla už začiatkom 70-tych rokov minulého storočia ako reakcia na oznámený vznik NAVSTAR. Štruktúra GLONASS sa v mnohom podobá NAVSTAR, niektoré detaily sú však odlišné. GLONASS počíta s vypustením 24 umelých družíc Zeme rozložených v troch dráhových rovinách, ktorých sklon k rovníku je  $64,8^\circ$ . Každá družica má aj malý odrážač, pomocou ktorého je možné merať vzdialenosť ku družici aj pomocou laserovej lokácie. Dráhy družíc sú takmer kruhové s výškou 19100 km.

## 1.3 Systém Galileo

Galileo je nový navigačný systém, ktorého vznik podporuje Európska únia a Európska vesmírna agentúra (European Space Agency – ESA). Mal by to byť civilný systém úplne nezávislý od systémov NAVSTAR a GLONAS, no súčasne má byť natoľko kompatibilný, aby bolo možné jeho spoločné využívanie s týmito systémami. V prvej fáze bol vyvinutý systém EGNOS, ktorý pokrýva územie Európy pomocou geostacionárnych družíc. Súčasne sa monitorujú družice systémov NAVSTAR a GLONAS. Odmerané údaje sa prenášajú do spracovateľského centra v Toulous (Francúzsko). Tu sa vypočítajú WADGPS korekcie a skontroluje sa integrita celého systému. Získané údaje vysielať družice v navigačnej správe.

## 2 NAVSTAR GPS

### 2.1 Popis systému GPS NAVSTAR

História NAVSTAR GPS začína rokom 1973, kedy sa na základe požiadaviek Ministerstva obrany USA vyvinul ako navigačný systém pre armádu Spojených štátov. Tento vojenský systém bol nedostupný neoprávneným užívateľom (SA – selective availability) a prejavovalo sa to úmyselným znížením presnosti hodín družice. Od 2. 5. 2000 bol režim SA zrušený rozhodnutím prezidenta USA. Tým sa umožnilo širšie využitie systému aj na riešenie geodetických úloh. Oficiálne bola deklarovaná presnosť v polohe 100 m a vo výške 156 m s 95 % pravdepodobnosťou. Po zrušení režimu SA, sa presnosť určenia absolútnej polohy bodu zvýšila na 10m v polohe a 15m vo výške. Významným príspevkom k zvýšeniu presnosti absolútneho určovania polohy sú diferenciálne korekcie.

### 2.2 Budovanie NAVSTAR GPS

Práce na budovaní systému NAVSTAR GPS (ďalej len GPS) boli rozdelené do 3 fáz.

**Prvá fáza** sa uskutočnila v rokoch 1973 – 1979. Počas tohto času bolo vypustených 10 družíc. Prvá družica bola vypustená v roku 1978. Cieľom bolo overiť funkčnosť a spoľahlivosť polohového systému.

**V druhej fáze** (1979 – 1985) boli vypustené ďalšie družice tak, aby ich v júli 1995 bolo na obežných dráhach 24 a boli tak vybudované základy prvého globálneho polohového systému. Od roku 1995 sa udržiava v činnosti vždy najmenej 24 družíc, obvykle je ich však viac. Družice sa pohybujú vo výške 20200 km nad Zemou. Rozmiestnenie družíc je také, aby na ktoromkoľvek mieste na Zemi boli viditeľné minimálne 4 družice. Počas budovania kozmického segmentu sa postupne vybuďovalo aj 5 pozemských riadiacich staníc. Začal sa vývoj nových typov družíc, tzv. družice bloku II.

Počas **tretej fázy** (1985 – 1994) prebiehalo postupné dopĺňovanie a nahradzovanie družíc bloku I družicami bloku II. Dňa 3. 3. 1994 boli splnené podmienky plného operačného stavu (činnosť 24 satelitov bloku II).

### 2.3 Segmenty NAVSTAR GPS

Systém NAVSTAR GPS je tvorený troma segmentmi:

- kozmickým,
- riadiacim,
- používateľským.

#### 2.3.1 Kozmický segment

Kozmický segment tvorí 21 - 28 družíc, z toho sú vždy minimálne tri záložné a v prípade potreby je možné zmeniť ich obežnú dráhu. Družice obiehajú vo výške približne 20200 km na šiestich kruhových dráhach so sklonom k rovníku 55°. Doba obehu družice je približne 12 hodín. Takéto usporiadanie umožňuje zachytiť užívateľom signál z min. 4 družíc. V súčasnosti (2004) sú na obežných dráhach už len družice bloku II, ktoré majú hmotnosť 845 kg, rozmery cca 2 x 1 x 1,5 m a predpokladanú životnosť 7,5 roka. Každá družica má rubídiové a céziové atómové hodiny, vysielače rádiových vln, počítač a batérie dobíjané zo slnečných panelov. Prijímajú a spracovávajú informácie z riadiaceho centra a podľa nich vysielať signály pre užívateľov. Pripravuje sa nová generácia družíc Blok IIF, ktoré majú mať oveľa dlhšiu životnosť a majú poskytovať vyššiu presnosť merania pseudovzdialeností a časovej synchronizácie.

### 2.3.2 Riadiaci segment

Úlohy riadiaceho segmentu GPS:

- nepretržite monitorovať a riadiť činnosť družicového systému,
- určovať systémový čas GPS,
- predpovedať dráhy družíc a chod hodín na družiciach,
- pravidelne obnovovať navigačnú správu každej družice.

Riadiaci segment je tvorený systémom piatich pozemných pozorovacích staníc, riadiaceho centra a troch pozemných vysielacích antén.



Obr. 2.1. Rozmiestnenie staníc riadiaceho segmentu GPS: □ hlavná riadiaca stanica, ● monitorovacie stanice, ▲ pozemné komunikačné stanice.

Hlavná riadiaca stanica sa nachádza v USA, v Colorado Springs. Pozemné pozorovacie stanice prijímajú signály zo všetkých viditeľných družíc a údaje posielajú do hlavnej riadiacej stanice. Tu sa z nich určujú dráhové elementy družíc (tzv. efemeridy), korekcie atómových hodín a zostavuje sa navigačná správa. Tá je prostredníctvom pozemných vysielacích antén vyslaná na jednotlivé družice, ktoré potom vysielajú svoje efemeridy a presný čas užívateľom na Zemi a jej blízkom okolí. Vysielacie antény sú rozložené tak, aby bolo možné spojenie s každou družicou minimálne trikrát za 24 hodín. Presnosť vysielaných efemeríd je obmedzená, pretože polohy družíc sa určujú len z kódových meraní, monitorovacia sieť má len 5 pozorovacích staníc a vysielané efemeridy sú extrapolované. Polohy družíc sú v efemeridách udávané v globálnom súradnicovom systéme WGS-84. Počiatok tohto pravouhlého systému je v ťažisku Zeme a je totožný s Medzinárodným terestrickým referenčným systémom ITRS Medzinárodnej služby rotácie Zeme (IERS). K systému WGS-84 je priradený geocentrický ekvipotenciálny elipsoid. Jeho parametre sú uvedené v tab. 2.1.

Tab.2.1

Parameter a jeho hodnota	Význam
<i>Základné parametre</i>	
$a = 6\,378\,137,0 \text{ m}$	hlavná polos elipsoidu
$J_2 = 1\,082\,630 \cdot 10^{-9}$	zonálny efekt druhého rádu
$\omega_E = 7\,292\,115 \cdot 10^{-11} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$	uhlová rýchlosť rotácie Zeme
$GM = 3\,986\,005 \cdot 10^8 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-2}$	geocentrická gravitačná konštanta
<i>Odvodené parametre</i>	
$b = 6\,356\,752,314 \text{ m}$	vedľajšia polos elipsoidu
$f = 1/298,2572221$	geometrické sploštenie
$e^2 = 0,006\,694\,379\,990$	prvá numerická excentricita
$e'^2 = 0,006\,739\,496\,742$	druhá numerická excentricita
$\gamma_e = 9,780\,326\,77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	normálne tiažové zrýchlenie na rovníku
$\gamma_p = 9,832\,186\,37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	normálne tiažové zrýchlenie na pólach

### 2.3.3 Používateľský segment

Pôvodne bol celý systém určený len na vojenské využitie a jediným používateľom mala byť len armáda USA, prípadne jej spojenci. Po zrušení režimu SA bolo umožnené využívanie systému GPS aj civilným zložkám. To umožnilo rozmach aplikácií využívajúcich GPS na určenie polohy alebo času. Na príjem signálu z družíc sa využívajú rôzne prijímače. Podľa spôsobu využitia ich môžeme rozdeliť nasledovne:

- na prijímače navigačné: na pozemnú, námornú, leteckú a inú navigáciu,
- na prijímače geodetické: jedno frekvenčné a dvoj frekvenčné prístroje, RTK systémy, a pod.,
- prijímače na časovú synchronizáciu: pre potreby astronomických meraní a telekomunikačných zariadení.

Výrobou GPS prijímačov sa v súčasnosti zaoberá viac ako 100 firiem po celom svete. Cieľom výrobcov je ponúkať stále menšie a inteligentnejšie prístroje, s veľkou dobou prevádzky, nízkou poruchovosťou a jednoduchým ovládaním. S rozvojom prístrojov sa rozvíja aj problematika spracovania meraní. Na trhu je stále viac kvalitných programov umožňujúcich spracovanie meraní rôznymi metódami a s rozdielnou presnosťou. V posledných rokoch tiež vzniklo niekoľko časopisov zaoberajúcich sa problematikou GPS (napr. GPS WORLD, ALLGEMEINE GPS), bolo vydaných veľa kníh a monografií. Na internete sú o GPS tisíce stránok v rôznych jazykoch.



### 3 Signály vysielané GPS

Základnou podmienkou činnosti GPS je presný čas. Každá družica má preto rubídiové a céziové atómové hodiny. Relatívna presnosť týchto hodín je  $10^{-13}$  s. (t.j. 0,3 ms za storočie). Základná frekvencia GPS je  $f_0 = 10,23$  MHz. V dôsledku efektu špeciálnej teórie relativity je frekvencia hodín na družici väčšia ako na Zemi o konštantnú hodnotou  $\Delta f = 4,4647 \cdot 10^{-10} f_0$ , preto sa oscilátor v družici nastavuje na hodnotu 10.22999999543 MHz. Pretože signál vyslaný družicou prechádza cez atmosféru, je ňou ovplyvňovaný. Z hľadiska šírenia sa elektromagnetického žiarenia v atmosfére môžeme rozdeliť elektromagnetické žiarenie podľa vlnovej dĺžky nasledovne:

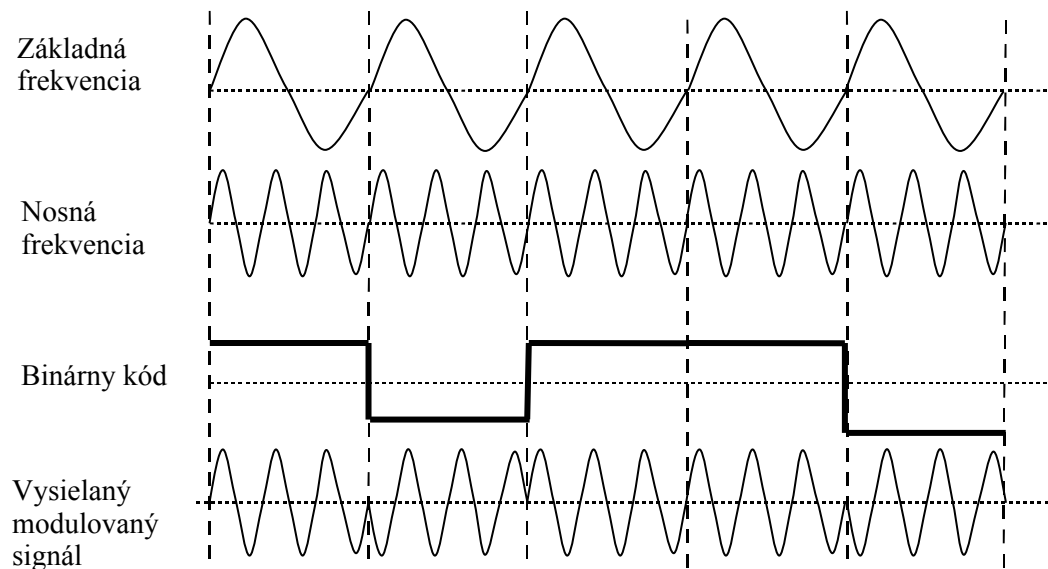
1.  $\lambda < 15\text{mm}$  - vlnenie sa v atmosfére absorbuje (pohlcuje),
2.  $15\text{mm} < \lambda < 15\text{m}$  - vlnenie prechádza cez atmosféru (tzv. rádiové okno),
3.  $\lambda > 15\text{m}$  - vlnenie sa od atmosféry odráža.

Pre systém NAVSTAR GPS boli preto zvolené vysielacie frekvencie tak, aby bol signál čo najmenej ovplyvňovaný atmosférou. Aby sa čo v najväčšej miere vylúčil vplyv ionosféry, družice vysielajú informácie na dvoch nosných frekvenciách  $L1$  a  $L2$ .

$$L1: f_1 = 154 \cdot 10,23 \text{ MHz} = 1575,42 \text{ MHz} (\lambda_1 = 19,05 \text{ cm})$$

$$L2: f_2 = 120 \cdot 10,23 \text{ MHz} = 1227,60 \text{ MHz} (\lambda_2 = 24,45 \text{ cm})$$

Nosné frekvencie sú modulované binárnymi kódmi. Tie slúžia na prenos informácií (navigačná správa) a na meranie času. Vzďialenosť medzi družicou a prijímačom sa určí z merania časového intervalu potrebného na jej prekonanie. Používajú sa na to dva špeciálne kódy. Menej presný C/A kód a presnejší a zložitejší P kód. Na moduláciu binárneho kódu je použitá metóda fázovej modulácie. To znamená, že pri zmene stavu kódu (0 $\rightarrow$ 1, 1 $\rightarrow$ 0) sa zmení fáza nosnej vlny o  $180^\circ$  (obr. 3.1).



Obr. 3.1. Princíp fázovej modulácie binárneho kódu.

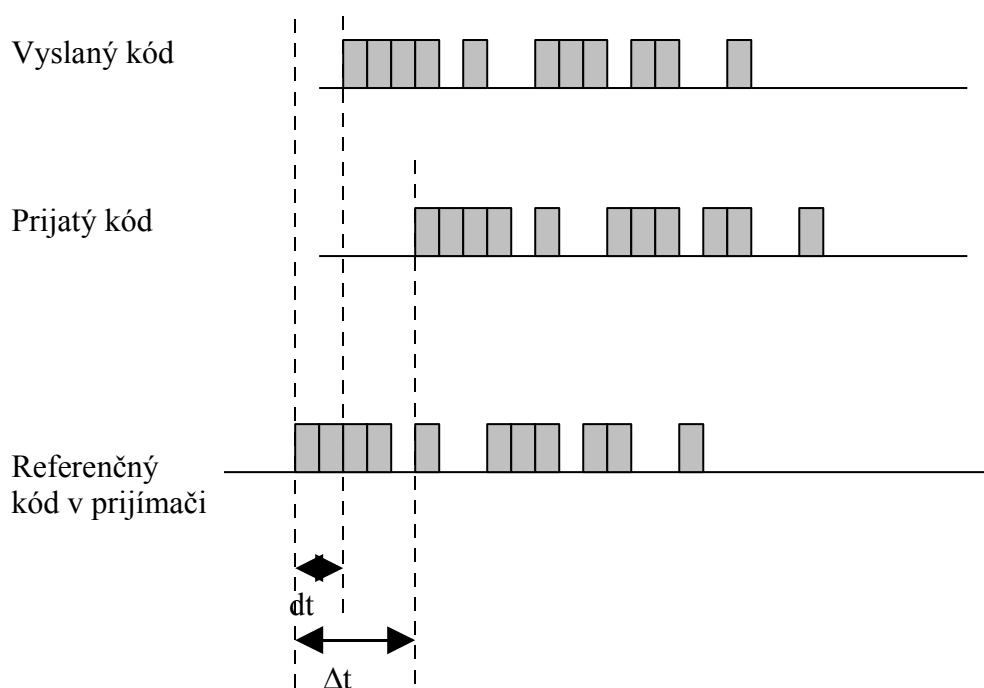
V tab. 3.1 sú zobrazené jednotlivé zložky signálu vysielaného družicami.

Tab. 3.1.

Zložka	Frekvencia [MHz]		Vlnová dĺžka
Základná frekvencia	$f_o$	10,23	29,31 m
Nosná frekvencia L1	$154 f_o$	1575,42	19,05 cm
Nosná frekvencia L2	$120 f_o$	1227,60	24,45 cm
P kód	$f_o$	10,23	29,31 m
C/A kód	$f_o/10$	1,023	293,1 m
Navigačná správa	$f_o/204600$	$50 \cdot 10^{-6}$	5950 km

### 3.1 Kódy vysielané družicami

Pod pojmom pseudonáhodný kód sa rozumie taká postupnosť hodnôt 1 a 0, že sa javí ako náhodná. Náhodnosť je zabezpečená po určitý čas, potom sa kód začne opakovať. C/A a P kód je generovaný v každej družici a v každom prijímači. Porovnaním prijatého kódu a kódu v prijímači sa určí čas potrebný na prekonanie vzdialenosti od družice k prijímaču (obr. 3.2).



Obr. 3.2. Zistenie posunutia kódov

#### 3.1.1 Pseudonáhodný C/A kód

C/A kód (Clear access – voľný prístup, alebo Coarse acquisition – zber hrubých údajov) sa vysiela na nosnej frekvencii L1. Dĺžka kódu je 1023 prvkov a opakuje sa každých 0,001s. Aby sa dalo rozoznať ktorá družica ho vysiela, existuje 32 variantov C/A kódu a každá družica vysiela svoj kód. Prijímač musí poznať všetky varianty C/A kódu. Využitie C/A kódu je hlavne pre navigáciu a časovú synchronizáciu. Ďalej slúži na prenos navigačnej správy a na ľahšiu orientáciu v P kóde.

### 3.1.2 Pseudonáhodný P kód

P kód (**P**recise – presný alebo **P**rotected - chránený) má zložitejšiu štruktúru ako C/A kód. P kód má dĺžku  $2,3547 \cdot 10^{14}$  prvkov a opakuje sa každých 266,4 dní. Celková dĺžka kódu je rozdelená na 37 segmentov o dĺžke jedného týždňa. Každý družici je priradený jeden segment. Kód sa nastavuje v družiciach vždy v nedeľu o 0<sup>h</sup> svetového času (UT). P kódom sa modulujú obe frekvencie L1 aj L2. P kód bol určený výhradne pre vojenské účely. Postupne bol uvoľnený aj pre civilné účely. Družice bloku II (dnes už všetky) však obsahujú procedúru ktorá dokáže zašifrovať P kód na tzv. Y kód. Ten potom možno použiť len ak užívateľ pozná šifrovací algoritmus. Tento algoritmus je prístupný výlučne užívateľom autorizovaným Ministerstvom obrany USA predovšetkým na vojenské účely.

## 3.2 Navigačná správa

Je to tretí kód vysielaný na frekvencii L1. Kód má 1500 prvkov rozdelených do 5 blokov a je vysielaný 30 sekúnd, potom sa navigačná správa opakuje. 1. až 3. blok je individuálny pre každú družicu, bloky 4. a 5. sú pre všetky družice rovnaké. Jednotlivé bloky obsahujú nasledujúce informácie:

1. blok: poradové číslo týždňa GPS, koeficienty kvadratického polynómu slúžiaceho na korekciu hodín a parametre ktoré indikujú stav družice,
2. a 3. blok: dráhové elementy danej družice a parametre ich zmien,
4. a 5. blok: údaje o stave ionosféry, približné údaje o polohe ostatných družíc.

Obsah 4. a 5. bloku sa v každej 30 sekundovej správe mení. Cyklus sa opakuje po odvysielaní 25 správ. Dekódovaním všetkých 25 správ budeme poznať dráhové elementy a tým aj polohu všetkých družíc. Tieto údaje tvoria tzv. almanach. Almanach sa využíva hlavne pri identifikovaní polohy družíc a pri plánovaní meraní.

Vysielané efemeridy sa vytvárajú v dvoch krokoch [1]. Najprv sa z pozorovaní za posledný týždeň určia referenčné dráhové elementy. V druhom kroku sa na základe aktuálnych pozorovaní určujú odchýlky polohy družice od referenčnej polohy. Nové údaje sa vysielajú do družíc každých 60 min. Vysielané efemeridy sú nevyhnutné na určenie polohy v reálnom čase, teda hlavne pre navigáciu. Pre presnejšie výpočty sú k dispozícii aj presné efemeridy. Sú k dispozícii zvyčajne s týždenným oneskorením.

### Príklad č.1: Určenie polohy družice.

Z navigačnej správy sa dajú vypočítať súradnice družice. V nasledujúcom príklade sú uvedené údaje navigačnej správy z 21.4.2004 pre satelit č.23 a čas 13:00 hod. Údaje sú prevzaté z programu AshtechSolution. Výpočet urobíme pre okamih 300s po odvysielaní navigačnej správy. Význam skratiek je uvedený v [12].

---

```
Start time: 21 Apr 2004 13:00:00
wn=1267 week                cus=1.1716e-005 rad
tow=305700 sec              omega0=-0.8400793793 sc
aodc=360                    omegadot=-2.39152e-009 sc/s
toc=309600 sec              omega=-0.5324971434 sc
af2=0 s/s/s                 roota=5153.571682 sqrt(m)
af1=1.7053e-012 s/s         crc=162.281 m
af0=0.000340283 sec         crs=-45.9063 m
tgd=-3.25963e-009 sec       i0=0.3116271966 sc
aode=104                     idot=1.31308e-010 sc/s
toe=309600 sec              cic=6.51926e-008 rad
e=0.005277649383            cis=-1.04308e-007 rad
m0=0.6121394965 sc          accuracy=1 (encode)
deltan=1.20247e-009 sc/s    health=0 (encode)
cuc=-2.3637e-006 rad         fit=0 (encode)
```

---

Výpočet:

$$a = 5153,685335^2 \text{ m} \quad \Delta t = 300 \text{ s} \quad E_0 = 0$$

$$n_0 = \sqrt{\frac{GM}{a^3}}$$

$$M = M_0 + \Delta t \quad M = 0,964 \text{ s}$$

$$E_1 = M + e \sin(E_0) \quad E_1 = 0,964 \text{ s}$$

$$E_2 = M + e \sin(E_1) \quad E_2 = 0,974 \text{ s}$$

$$E_3 = M + e \sin(E_2) \quad E_3 = 0,974 \text{ s}$$

$$v = \arccos\left(\frac{\cos E_3 - e}{1 - e \cos E_3}\right) \quad v = 0,985 \text{ rad.s}^{-1}$$

pre kontrolu

$$v = \arcsin\left(\frac{\sqrt{1-e^2} \cos E_3}{1 - e \cos E_3}\right) \quad v = 0,985 \text{ rad.s}^{-1}$$

$$u_0 = \omega_0 + v \quad u_0 = 0,119 \text{ rad.s}^{-1}$$

$$\delta u = C_{uc} \cos(2u_0) + C_{us} \sin(2u_0) \quad \delta u = 7,495 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

$$\delta r = C_{rc} \cos(2u_0) + C_{rs} \sin(2u_0) \quad \delta r = 1,605 \cdot 10^2 \text{ m}$$

$$\delta i = C_{ic} \cos(2u_0) + C_{is} \sin(2u_0) \quad \delta i = 8,242 \cdot 10^{-8} \text{ rad}$$

$$u = u_0 + \delta u \quad u = 0,119 \text{ rad.s}^{-1}$$

$$r = a(1 - e \cos(E_3)) + \delta r \quad r = 26370926,397 \text{ m}$$

$$i = i_0 + \dot{i} \Delta t + \delta i \quad i = 0,299 \text{ rad}$$

$$\Omega = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \omega_e) \Delta t - \omega_e \text{ toe} \quad \Omega = -16,638 \text{ rad}$$

$$x = r \cos(u) \quad x = 26183012,41 \text{ m}$$

$$y = r \sin(u) \quad y = 3142549,95 \text{ m}$$

$$X = x \cos \Omega - y \sin \Omega \cos i \quad X = -18083069,829 \text{ m}$$

$$Y = x \sin \Omega + y \cos \Omega \cos i \quad Y = 19200420,262 \text{ m}$$

$$Z = y \sin i \quad Z = 925359,690 \text{ m}$$

Súradnice satelitu č.23 v zadanom okamihu sú:

$$X = -18083069,829 \text{ m}$$

$$Y = 19200420,262 \text{ m}$$

$$Z = 925359,690 \text{ m}$$

## 4 METÓDY URČENIA PSEUDOVZDIALENOSTÍ

### 4.1 Základné pojmy a vzťahy

Využitie GPS na určovanie polohy spočíva v meraní a spracovaní informácií vysielaných družicami prostredníctvom elektromagnetických vln. Ide pritom o tzv. jednosmerný systém, nakoľko signály sa šíria len od družice k prijímaču, samotný prijímač žiadne elektromagnetické vlny nevysiela. Signály sa šíria rozličnými vrstvami atmosféry, ktoré ovplyvňujú ich smer a rýchlosť ako aj ich energiu. Pre používateľa tieto efekty predstavujú rušivé faktory a je snahou ich z meraní eliminovať. V prvom priblížení je vhodné formulovať základné pojmy pre idealizovanú situáciu, že elektromagnetické vlny vysielané družicami sa šíria ako vo vákuu. V tejto kapitole uvedieme vzťahy, ktoré vychádzajú z predpokladu konštantnej rýchlosti šírenia sa signálu  $c$ .

$$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1} \quad (4.1)$$

Fyzikálne vlastnosti elektromagnetických vln okrem rýchlosti šírenia  $c$  charakterizuje aj ich vlnová dĺžka  $\lambda$ , perióda  $P$  a frekvencia  $f$ . Platí

$$c = \lambda f = \frac{\lambda}{P}; f = \frac{1}{P} = \frac{c}{\lambda} \quad (4.2)$$

Fázou  $\Phi$  periodickej vlny nazývame bez rozmernú veličinu definovanú ako podiel času  $t$  ktorý uplynul od začiatku počítania času  $t_0$  a periódy  $P$  vlnenia.

$$\Phi = \frac{t - t_0}{P} = f(t - t_0) \quad (4.3)$$

Celočíselná časť  $\Phi$  poskytuje informáciu o tom, koľko ráz sa opakovalo vlnenie v intervale  $t - t_0$ . Zlomková časť fázy  $\Phi$  sa nazýva fázový posun a je údajom o zlomku periódy, o ktorý sa vlnenie zmenilo relatívne k okamihu začiatku merania v čase  $t_0$ . Elektromagnetické vlnenie môžeme modelovať pomocou sínusových vln. Ide o periodické vlny, ktoré môžeme opísať pomocou konštantnej amplitúdy  $A$  a funkcie sínus

$$y = A \sin(2\pi\Phi) = A \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{P} - \Phi_0\right)\right] = A \sin(\omega t - \varphi_0) \quad (4.4)$$

kde argumentom  $\varphi = 2\pi\Phi$  je fázový uhol. Hodnota  $\Phi_0$  je fáza a  $\varphi_0 = 2\pi\Phi_0$  je fázový uhol v okamihu  $t_0$ .

Predstavu o veľkosti uvedených veličín nám dá jednoduchý príklad. Pre frekvenciu  $f = 1.5 \text{ GHz}$  elektromagnetickej vlny vyslanej družicou a vzdialenosť  $\rho = 20\,000 \text{ km}$  družice od prijímača pri  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ km s}^{-1}$  je čas potrebný na prekonanie dráhy družica – prijímač  $t = 0,0667 \text{ s}$ . Zložka fázy  $\Phi$  v dôsledku intervalu  $t$  bude presne  $10^8$ , fázový posun je nulový. Od merania fázy očakávame sub-centimetrovú presnosť určenia vzdialenosti, treba si preto uvedomiť, že na prekonanie 3 mm potrebuje elektromagnetická vlna 0,01 nanosekundy. S takouto presnosťou sa vyžaduje meranie času pre geodetické aplikácie GPS.

Elektromagnetické vlny so stabilnou frekvenciou vysielané družicami umožňujú viacej spôsobov meraní (nosné vlnenie je modulované presne definovanými časovými značkami vo forme pseudonáhodných kódov). Základné metódy sú:

- meranie pseudovzdialeností pomocou pseudonáhodných kódov,
- meranie fázy nosnej vlny a meranie rozdielov fáz,
- rozdiely vzdialeností na princípe integrácie dopplerovského efektu,
- interferometrické určovanie rozdielu v prijímačovej časovej informácii.

Z praktického hľadiska sa v súčasnosti uplatňujú prvé dve metódy.

## 4.2 Určenie pseudovzdialeností pomocou pseudonáhodných kódov

Princíp merania pseudovzdialeností pomocou kódov je nasledovný: Oscilátor prijímača generuje referenčnú nosnú vlnu, ktorá je následne modulovaná replikou známeho PRN kódu. Tento referenčný signál sa potom porovnáva v prijímači so signálom prijatým z družice. Keďže oba signály majú zhodný PRN kód, ich korelácia umožní nájsť ich vzájomný časový posun. Označme  $t^s$  čas vyslania kódu družicou,  $t^r$  čas prijatia kódu a  $\delta^s$  a  $\delta^r$  sú korekcie hodín družice a prijímača potom:

$$\begin{aligned} t_{GPS}^S &= t^s + \delta^s \\ t_{GPS}^R &= t^r + \delta^r \\ \Delta t &= t^r - t^s = [t_{GPS}^r - \delta^r] - [t_{GPS}^s - \delta^s] = \Delta t_{GPS} + \Delta \delta. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Ak vynásobíme  $\Delta t$  rýchlosťou svetla dostaneme tzv. pseudovzdialenosť  $r$

$$r = c\Delta t = c\Delta t_{GPS} + c(\delta^s - \delta^r) = \rho + c\Delta \delta, \quad (4.6)$$

kde  $\rho$  je skutočná vzdialenosť. Ak v rovnici zohľadníme aj náhodné chyby potom dostaneme základný tvar observačnej rovnice kódového merania

$$r = \rho + c\Delta \delta + \varepsilon. \quad (4.7)$$

Neistota určenia časového intervalu  $\Delta t$  z kódových meraní sa udáva menej ako 1% z vlnovej dĺžky modulovaného kódu, takže pre C/A-kód možno očakávať presnosť určenia  $r$  lepšiu ako 3 m a pre P-kód presnosť lepšiu ako 0,3 m. Meranie pseudovzdialeností je však významne ovplyvnené ďalšími faktormi, ako je troposférická a ionosférická refrakcia, chyby časového systému prijímača a i. Informáciu o očakávanej presnosti určenia vzdialeností vysiela každá družica v rámci navigačnej správy ako parameter URE (User Range Error - chyba vzdialenosti pre používateľa). Merania kódov družíc GPS sa využívajú na absolútne určovania polohy a sú základom pre navigačné aplikácie systému.

## 4.3 Určenie pseudovzdialeností pomocou fázy nosnej vlny

Fázové meranie spočíva v spracovaní nosnej vlny družicového signálu. Nosná vlna s frekvenciou  $f$  sa získa demoduláciou kódu prijatej vlny. Fázu v okamihu  $t$  prijatej a v prijímači rekonštruovanej nosnej vlny označme ako  $\Phi^s(t)$ . Fáza referenčnej vlny generovanej frekvenciou  $f$  v prijímači nech je  $\Phi^r(t)$ . Argumentom  $t$  je epocha vyjadrená v systémovej čase GPS, ktorý sa počíta od začiatkovej epochy  $t_0 = 0$ . Pre fázu prijatej nosnej vlny vyslanej družicou  $s$  platí

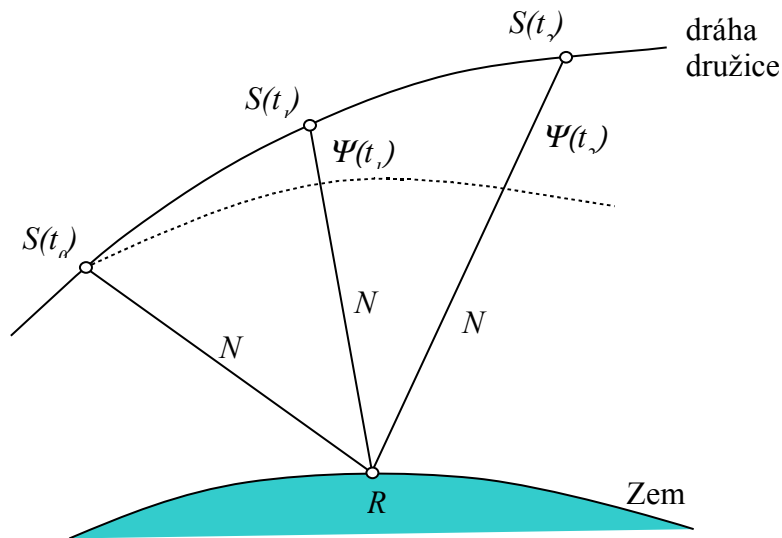
$$\Phi^s(t) = f^s t - f^s \frac{\rho}{c} - \Phi_0^s \quad (4.8)$$

Fáza referenčnej nosnej vlny prijímača je:

$$\Phi^r(t) = f^r t - \Phi_0^r \quad (4.9)$$

Rozdiel fáz v prijímači potom bude:

$$\Phi^s(t) - \Phi^r(t) = -f^s \frac{\rho}{c} - f^s \delta^s + f^r \delta^r + (f^s - f^r)t \quad (4.10)$$



Obr. 4.1.: Dráha družice a zmena vzdialenosti

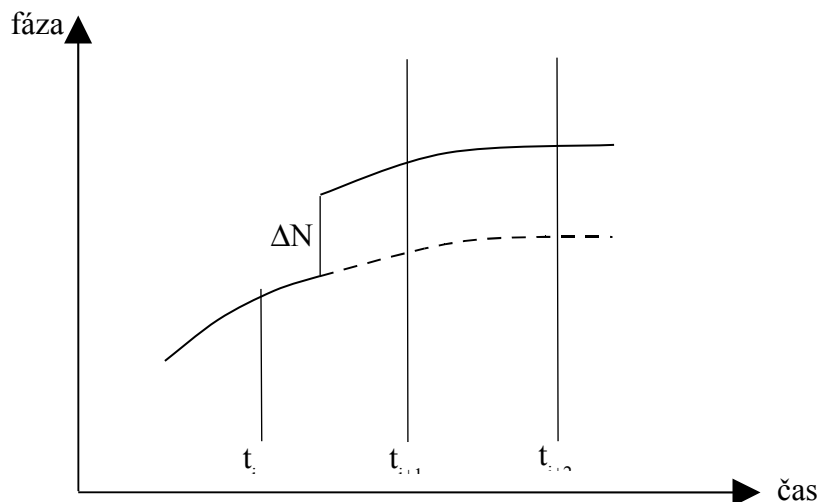
Určenie okamžitej hodnoty veličiny  $\Phi^s(t) - \Phi^r(t)$  je z technického hľadiska zložité. Existujú však vhodné elektronické zariadenia, ktoré dovoľujú spojiť sledovať zmenu tohto rozdielu počas určitého časového intervalu. Ak sa prijímač spustí v čase  $t_0$ , nameranou veličinou bude okamžitá hodnota zlomkovej časti rozdielu fáz. Jej negatívnu hodnotu budeme označovať ako  $\Psi_r^s(t)$  a začiatočný celočíselný počet cyklov  $N_r^s = \text{INT}\{\Phi^s(t) - \Phi^r(t)\}$  medzi družicou a prijímačom. Ten je však neznámy. Keď meranie rozdielu fáz pokračuje bez prerušenia, hodnota  $N_r^s$  sa nezmení. Preto sa pre  $N_r^s$  používa názov **ambiguita** (dvojznačnosť, nejednoznačnosť). Ak uvažíme vplyv náhodných chýb, základná rovnica fázového merania pseudovzdialeností je:

$$\Psi_r^s(t) = f^s \frac{\rho}{c} + f^s \delta^s - f^r \delta^r - (f^s - f^r)t + N_r^s + \varepsilon_r^s \quad (4.11)$$

Ak uvažíme, že  $f^s = f$  a po vynásobení rovnice hodnotou vlnovej dĺžky dostávame:

$$L1 = \lambda_1 \Psi(t) = \rho + c\Delta\delta + N_1\lambda_1 + \varepsilon \quad (4.12)$$

$$L2 = \lambda_2 \Psi(t) = \rho + c\Delta\delta + N_2\lambda_2 + \varepsilon \quad (4.13)$$



Obr. 4.2. Vplyv zmeny ambiguit na meraní pseudovzdialeností.

Prednosťou použitia merania fázy je jeho vysoká presnosť. Ak neistota v určení  $\Psi(t)$  je 1% dĺžky cyklu, znamená to pri  $\lambda \approx 20$  cm dosiahnutie milimetrovej presnosti. Problémom je pri malej vlnovej dĺžke  $\lambda$  určenie celočíselnej hodnoty  $N$ . Najjednoduchší postup by bol, ak by bola známa približná hodnota okamžitej vzdialenosti  $\rho$  s presnosťou  $\approx \lambda/3$ . Kódové merania (aj pri použití P-kódu) však dávajú presnosť o jeden rád nižšiu, a preto ich nemožno priamo využiť pri určení ambiguit. Na stanovenie  $N$  treba použiť špeciálne algoritmy



## 5 MATEMATICKÝ MODEL URČOVANIA POLOHY BODU

Koncepcia GPS umožňuje určovanie polohy dvoma základnými metódami:

- Absolútne určovanie polohy,
- Relatívne určovanie polohy.

**Absolútne určovanie polohy** jednotlivých bodov v geocentrickom súradnicovom systéme (Point positioning). Na meranie stačí jedna aparatúra, na výpočet polohy sa využíva určovanie pseudovzdialeností medzi družicou a prijímačom pomocou pseudonáhodných kódov. Presnosť získaných geocentrických súradníc závisí od dĺžky observácie, počtu a konfigurácie družíc. Okrem toho ju zásadne ovplyvňuje skutočnosť, či sa využíva iba C/A kód, alebo aj P-kód a či je aktivovaný režim SA. Všeobecne presnosť absolútneho určovania polohy môžeme charakterizovať hodnotami v rozsahu  $\pm 10\text{m} - \pm 30\text{m}$  pri režime SA a v rozsahu  $\pm 5\text{m} - \pm 10\text{m}$ , ak režim SA nie je aktivovaný. Presnosť určenia geocentrických súradníc sa dá zvýšiť aplikáciou tzv. diferenciálnych korekcií, ktorými sa pred výpočtom opravujú merané pseudovzdialenosti. Výsledkom sú potom súradnice, ktorých neistota je  $\pm 1\text{m} - \pm 5\text{m}$ . Metóda určovania absolútnej polohy je základným poslaním GPS a využíva sa v rozličných oblastiach ľudskej činnosti, tam kde sa vyžaduje získavanie priestorových informácií. Môže ísť pritom o objekty statické alebo pohybujúce sa. Okrem stanovenia okamžitej polohy tieto metódy slúžia aj na určovanie rýchlosti pohybu prijímača a ich navigáciu na ploche alebo v priestore. Geodetické využitie absolútneho určovania polohy je pri získavaní informácií pre GIS a pri stanovení východiskových geocentrických súradníc pre referenčné body, potrebných pre relatívne určovanie polohy pomocou GPS.

**Relatívne určovanie polohy** (Relative positioning). Ide o metódu, pri ktorej sa určujú súradnice nových bodov vzhľadom k polohe referenčného bodu, ktorého geocentrické súradnice sú známe. Potrebné sú simultánne merania dvoma aparatúrami - na referenčnom bode a na určovanom bode. Výsledkom merania a spracovania je určenie smeru a veľkosti vektora spojnice oboch bodov v geocentrickom súradnicovom systéme - tzv. základnice. Relatívne metódy majú primárny význam pre geodetické aplikácie GPS, nakoľko umožňujú merania, ktorých výsledky vedú k súradniciam s presnosťou v jednotkách mm. Vychádza sa z merania fázy nosnej vlny GPS, pričom matematický model pri spracovaní nevyužíva priamo fázové merania, ale z nich vhodným spôsobom vytvorené diferencie - jednoduché, dvojnásobné a trojnásobné.

Pri oboch metódach - absolútnej aj relatívnej stačí, ak sa meranie uskutočňuje len na jednej z frekvencií L1 alebo L2. V takom prípade však treba voliť vhodný postup eliminácie vplyvu ionosféry. Ak sa pri meraní využívajú súčasne obe frekvencie L1 a L2, eliminuje sa vplyv ionosféry pomocou ich kombinácie L3. Ak sa prijímač počas merania vzhľadom ku zemskému povrchu nepohybuje hovoríme o **statických metódach**. Pod názvom **kinematické metódy** rozumieme také postupy, kedy je prijímač v relatívnom pohybe oproti Zemi. Môžeme pritom využiť kódové aj fázové merania. Typické využitie kinematických metód na báze kódových meraní je v oblasti navigácie pohybujúcich sa objektov - lodí, lietadiel, motorových vozidiel a pod. Základnou geodetickou metódou GPS sú statické merania. Spojením výhod oboch metód - presnosti statických a rýchlosti kinematických, sa vyvinuli technológie rýchleho geodetického určovania polohy, ktoré využívajú súčasne kódové a fázové merania. Ide o tzv. rýchle statické metódy, semi-kinematické metódy (stop&go) a pseudokinematické metódy.

## 5.1 Absolútne určovanie polohy meraním pseudovzdialeností pomocou kódov

Výsledkom merania pomocou C/A-kódu alebo P-kódu je časový interval  $\Delta t_A$  medzi okamihom vyslania časovej informácie (kódu) družicou a okamihom jeho prijatia aparátúrou GPS nachádzajúcou sa v bode A. Časové systémy družice a prijímača nie sú vo všeobecnosti vzájomne synchronizované. Vynásobením intervalu  $\Delta t_A = [\delta^j(t) - \delta_A(t)]$  rýchlosťou šírenia sa signálu  $c$  dostávame pseudovzdialenosť v okamihu  $t$ , pre ktorú platí

$$r_A^j(t) = \rho_A^j(t) + c[\delta^j(t) - \delta_A(t)] \quad (5.1)$$

kde  $\rho_A(t)$  je geometrická (skutočná) vzdialenosť medzi družicou a prijímačom a  $c$  je rýchlosť svetla. Predpokladajme, že  $r_A(t)$  bola opravená o vplyv troposféry a ionosféry. Korekcie hodín družice a prijímača na systémový čas GPS v okamihu  $t$  sú  $\delta(t)$  a  $\delta_A(t)$ .

Korekcia hodín družice  $\delta(t)$  sa vypočíta z údajov v navigačnej správe pomocou koeficientov  $a_{f0}^j, a_{f1}^j, a_{f2}^j$  polynómu 2. stupňa a referenčného času pre korekciu hodín  $t_{joc}$

$$\delta^j(t) = a_{f0}^j + a_{f1}^j(t - t_{joc}^j) + a_{f2}^j(t - t_{joc}^j)^2. \quad (5.2)$$

Ak označíme geocentrický polohový vektor bodu A ako  $X_A = [X_A, Y_A, Z_A]$  a geocentrický vektor družice  $j$  v okamihu  $t$  ako  $X^j(t) = [X^j(t), Y^j(t), Z^j(t)]$ . Pre topocentrickú vzdialenosť  $\rho_A^j(t)$  platí

$$\rho_A^j(t) = \sqrt{[X^j(t) - X_A]^2 + [Y^j(t) - Y_A]^2 + [Z^j(t) - Z_A]^2} \quad (5.3)$$

Polohu družice  $X^j(t)$  považujeme za známu, jej vyjadrenie z vysielaných efemeríd sa uvádza v predošlom texte. Cieľom je na základe merania pseudovzdialeností určiť polohu pozorovacieho miesta A.

Predchádzajúcu rovnicu môžeme prepísať do tvaru

$$R_A^j(t) - c\delta^j(t) = \sqrt{[X^j(t) - X_A]^2 + [Y^j(t) - Y_A]^2 + [Z^j(t) - Z_A]^2} - c\delta_A(t) \quad (5.4)$$

Observačnú rovnicu odvodíme zo vzťahu (5.3) jeho linearizáciou. Symbolický zápis jej pravej strany nech je

$$\rho_{A0}^j(t) = f(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0}) = \sqrt{[X^j(t) - X_A]^2 + [Y^j(t) - Y_A]^2 + [Z^j(t) - Z_A]^2} \quad (5.5)$$

Pre parametre  $X_A, Y_A, Z_A$  a  $\delta_A$  platí

$$X_A = X_{A0} + dX_A, \quad Y_A = Y_{A0} + dY_A, \quad Z_A = Z_{A0} + dZ_A, \quad \delta_A = \delta_{A0} + d\delta_A \quad (5.6)$$

Pre parciálne derivácie funkcie (5.6) platí

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0})}{\partial X_{A0}} &= -\frac{X^j(t) - X_{A0}}{\rho_{A0}^j(t)} = a_{XA}^j(t) \\ \frac{\partial f(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0})}{\partial Y_{A0}} &= -\frac{Y^j(t) - Y_{A0}}{\rho_{A0}^j(t)} = a_{YA}^j(t) \\ \frac{\partial f(X_{A0}, Y_{A0}, Z_{A0})}{\partial Z_{A0}} &= -\frac{Z^j(t) - Z_{A0}}{\rho_{A0}^j(t)} = a_{ZA}^j(t) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Linearizovaná observačná rovnica pre absolútne určovanie polohy potom bude

$$R_A^j(t) - c\delta_j(t) + c\delta_{A0}(t) - \delta_{A0}^j(t) = a_{XA}^j(t)dX_A + a_{YA}^j(t)dY_A + a_{ZA}^j(t)dZ_A - c.d\rho_A(t) + \varepsilon \quad (5.8)$$

Označíme približné hodnoty súradníc bodu A ako  $X_{A0}, Y_{A0}$  a  $Z_{A0}$ . Výraz na ľavej strane predstavuje odmeranú pseudovzdialenosť redukovanú o vplyv korekcie hodín družice, o

hodnotu geometrickej vzdialenosti k družici vypočítanú s približnými súradnicami pozorovaného bodu A a o približnú hodnotu korekcie hodín prijímača  $t$ .  $j$ .

$$l_A^j(t) = R_A^j(t) - c \cdot \delta_j(t) + c \cdot \delta_{A0}(t) - \delta_{A0}^j(t) \quad (5.9)$$

Podmienkou pre riešenie úlohy absolútneho určenia polohy je, aby bol prijatý signál z minimálne štyroch družíc v jednej epoche  $t$ . Ak označíme družice indexmi  $j = 1, 2, 3, 4$  bude mať matica koeficientov pretvorených rovníc opráv  $\mathbf{A}$ , vektor redukovaných meraní  $\mathbf{l}$  a vektor parametrov  $\mathbf{x}$  tvar:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{XA}^1(t) & a_{YA}^1(t) & a_{ZA}^1(t) & -1 \\ a_{XA}^2(t) & a_{YA}^2(t) & a_{ZA}^2(t) & -1 \\ a_{XA}^3(t) & a_{YA}^3(t) & a_{ZA}^3(t) & -1 \\ a_{XA}^4(t) & a_{YA}^4(t) & a_{ZA}^4(t) & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_A^1(t) \\ l_A^2(t) \\ l_A^3(t) \\ l_A^4(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta X_A \\ \Delta Y_A \\ \Delta Z_A \\ c \cdot \Delta \delta_A(t) \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Riešením rovnice

$$\mathbf{l} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \quad (5.11)$$

vypočítame opravy približných súradníc  $dX_A$ ,  $dY_A$ ,  $dZ_A$  a korekciu pseudovzdialeností spôsobenú korekciou hodín prijímača  $c \cdot d\delta_A(t)$ . Podmienkou riešenia je aby hodnota matice  $\mathbf{A}$  bola rovná 4, čo býva splnené pri vhodnom rozložení družíc nad pozorovacím miestom. Ak sa simultánne merania uskutočnili na viac ako 4 družice príslušne sa zvýši počet riadkov matice  $\mathbf{A}$  a vektora  $\mathbf{l}$  a sústava sa rieši odhadom parametrov  $\mathbf{x}$  metódou najmenších štvorcov

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l} \quad (5.12)$$

Pri opakovaní merania v epoche  $t_2$  pri nezmenenej polohe prijímača ide o statické meranie. Parametre súvisiace s polohou sú rovnaké ako pri meraní v epoche  $t$ , pribudne nový parameter - oprava pseudovzdialenosti vplyvom korekcie hodín prijímača  $c \cdot d\delta_A(t_2)$  v epoche  $t_2$ . Matica  $\mathbf{A}$  a vektory  $\mathbf{l}$  a  $\mathbf{x}$  budú mať tvar

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{XA}^1(t_1) & a_{YA}^1(t_1) & a_{ZA}^1(t_1) & -1 & 0 \\ a_{XA}^2(t_1) & a_{YA}^2(t_1) & a_{ZA}^2(t_1) & -1 & 0 \\ a_{XA}^3(t_1) & a_{YA}^3(t_1) & a_{ZA}^3(t_1) & -1 & 0 \\ a_{XA}^4(t_1) & a_{YA}^4(t_1) & a_{ZA}^4(t_1) & -1 & 0 \\ a_{XA}^1(t_2) & a_{YA}^1(t_2) & a_{ZA}^1(t_2) & 0 & -1 \\ a_{XA}^2(t_2) & a_{YA}^2(t_2) & a_{ZA}^2(t_2) & 0 & -1 \\ a_{XA}^3(t_2) & a_{YA}^3(t_2) & a_{ZA}^3(t_2) & 0 & -1 \\ a_{XA}^4(t_2) & a_{YA}^4(t_2) & a_{ZA}^4(t_2) & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} l_A^1(t_1) \\ l_A^2(t_1) \\ l_A^3(t_1) \\ l_A^4(t_1) \\ l_A^1(t_2) \\ l_A^2(t_2) \\ l_A^3(t_2) \\ l_A^4(t_2) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta X_A \\ \Delta Y_A \\ \Delta Z_A \\ c \cdot \Delta \delta_A(t_1) \\ c \cdot \Delta \delta_A(t_2) \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Pre  $n$  epoch statického určenia absolútnej polohy zo 4 družíc bude celkový počet observácií  $4n$ , počet parametrov  $n+3$  a počet nadbytočných meraní je  $3n-3$ . Súradnice sú spoločným parametrom pre celý interval pozorovaní, korekcia hodín prijímača v okamihu merania je parametrom pre každú epochu. Záznam meraní sa uskutočňuje na základe voľby intervalu merania spravidla každých 15 s alebo 30 s. Uvedený postup spracovania pseudovzdialeností meraných pomocou kódov sa využíva aj pri presných relatívnych fázových meraniach polohy. V takomto prípade cieľom nie je určenie súradníc  $X_A$ ,  $Y_A$  a  $Z_A$ , ale určenie korekcie hodín prijímača  $c \cdot d\delta_A(t)$  za účelom jej eliminácie z fázových meraní.

Pri kinematických meraniach sa poloha meraného bodu pre každú epochu mení. Riešenie úlohy určenia absolútnej polohy sa potom uskutočňuje s tým, že každá epocha

meraní sa rieši oddelene ako nezávislý systém. Merania sa uskutočňujú podľa potreby v 1s alebo 5s intervaloch.

Získané súradnice meraného bodu sa vzťahujú k referenčnému systému WGS 84. Vyplýva to z toho, že ako oporné body so známou polohou sa využívajú okamžité súradnice družíc GPS, ktoré sú vypočítané z vysielaných efemeríd. Vysielané efemeridy sú určované riadiacim segmentom GPS na základe merania piatich monitorovacích staníc, ktorých polohy sa vzťahujú práve k WGS 84. Takýmto spôsobom sa súradnicový systém monitorovacích staníc prenáša prostredníctvom družíc na novo určované body.

## 5.2 Vplyv rozloženia družíc na presnosť určovania absolútnej polohy.

Presnosť určenia absolútnej polohy môžeme opísať dvoma charakteristikami:

1. presnosť merania pseudovzdialenosti vyjadrená štandardnou odchýlkou, ktorú môžeme odvodiť z informácie URE (User Range Error - chyba určenia vzdialenosti používateľom) vysielanej v navigačnej správe,
2. numerickou charakteristikou kvality konfigurácie tzv. faktor zníženia presnosti (Dilution of Precision - DOP), ktorá vyjadruje geometrickú konfiguráciu rozloženia družíc v okamihu merania.

Štandardnú odchýlku určenia polohy  $\sigma_x$  potom vyjadríme ako

$$\sigma_x = \sigma_R DOP \quad (5.14)$$

Význam veličiny DOP si podrobnejšie objasníme, ak vyjdeme z vyjadrenia kovariančnej matice odhadu parametrov  $\mathbf{x}$  pre absolútne určenie polohy. Pre maticu kofaktorov  $\mathbf{Q}_x$  a kovariančnú maticu  $\mathbf{C}_x$  a platí

$$\mathbf{Q}_x = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \quad \mathbf{C}_x = \sigma_R^2 \mathbf{Q}_x \quad (5.15)$$

Štruktúra matice kofaktorov pre jednu epochu merania bude

$$\mathbf{Q}_x = \begin{bmatrix} q_{XX} & q_{XY} & q_{XZ} & q_{Xt} \\ q_{YX} & q_{YY} & q_{YZ} & q_{Yt} \\ q_{ZX} & q_{ZY} & q_{ZZ} & q_{Zt} \\ q_{tX} & q_{tY} & q_{tZ} & q_{tt} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Diagonálne prvky sa použijú na definíciu faktorov zníženia presnosti DOP.

$$\begin{aligned} GDOP &= \sqrt{\text{Tr}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}} = \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ} + q_{tt}} \\ PDOP &= \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ}} \\ TDOP &= \sqrt{q_{tt}} \end{aligned} \quad (5.17)$$

GDOP - faktor globálneho zníženia presnosti GDOP

PDOP - faktor zníženia presnosti určenia absolútnej polohy,

TDOP - faktor zníženia presnosti určenia korekcie hodín prijímača.

Pomocou uvedených faktorov sa definuje presnosť určenia parametrov, resp. ich kombinácií

$$\sigma_p = \sigma_R PDOP \quad \text{priestorová poloha bodu}$$

$$\sigma_T = \sigma_R TDOP$$

korekcia hodín prijímača

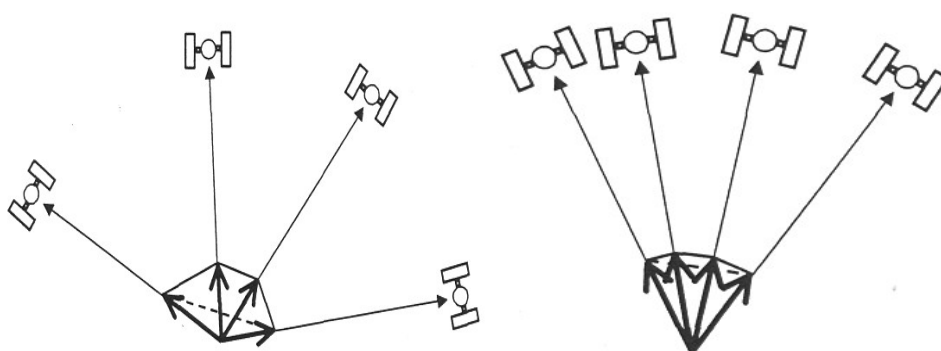
$$\sigma_G = \sigma_R GDOP$$

kombinácia určenia priestorovej polohy a korekcie hodín prijímača

Konfigurácia družíc s menšou hodnotou DOP vedie k presnejším hodnotám parametrov pri rovnakej presnosti merania pseudovzdialeností. Hodnota PDOP má aj názornú geometrickú interpretáciu. Jednotkové vektory ku družiciam tvoria polyéder s vrcholom v bode A. Podľa [1] platí, že PDOP je recipročná hodnota objemu  $V$  polyédra

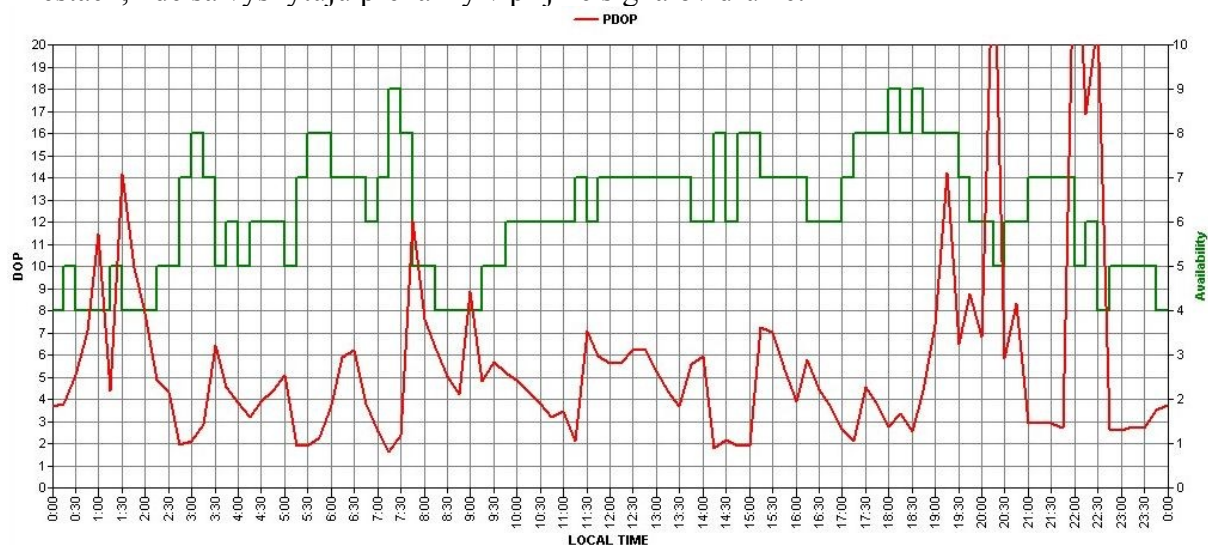
$$PDOP = \frac{1}{V} \quad (5.18)$$

Na obr. 5.1 sú znázornené dve konfigurácie družíc. Lepšia geometrická situácia a menší PDOP je pre polyéder, ktorý má väčší objem. Pre štyri družice je optimálna taká konfigurácia, v ktorej tri družice majú rovnomerne rozložené azimuty a nachádzajú sa nízko nad horizontom a štvrtá družica je v zenite.



Obr. 5.1. Konfigurácia 4 družíc s výhodným (vľavo) a nevýhodným (vpravo) faktorom PDOP. Jednotkové vektory tvoria polyéder.

Dôležité je, že veličiny DOP možno vypočítať pred samotným meraním. Využijú sa pritom údaje o približných súradniciach družíc uvádzané v almanachu a približné súradnice stanoviska, ktoré stačí poznať s presnosťou niekoľko km. Príklad priebehu PDOP pre interval 12 h znázorňuje obr. 5.2. Výpočet veľkostí DOP sa využíva pri projektovaní meraní GPS v miestach, kde sa vyskytujú prekážky v prijímaní signálov družíc.



Obr. 5.2 Priebeh PDOP pre interval 24 h ( $B = 49^\circ$ ,  $L = 19^\circ$ , výškový filter =  $15^\circ$ )

## Príklad č.2.: Určenie absolútnej polohy bodu A

### 1, Výpis zo súboru \*.sp3 s presnými súradnicami polohy satelitov (popis je v kap. 10)

```

/* RAPID ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
/* cod emr esa gfz iga igu ngs sio usn
/* REFERENCED TO GPS CLOCK AND TO WEIGHTED MEAN POLE:
/* CLK ANT Z-OFFSET (M): II/IIA 1.023; IIR 0.000
* 2003 10 28 0 0 0.00000000
P 1 19836.610075 -3192.622791 -17225.973999 312.185319
P 2 18471.578768 1956.926317 -18164.384502 -211.091257
P 3 24056.749011 11253.600101 -2569.105462 56.467740
P 4 -5376.720556 -25273.888413 -5365.704966 -1.638333
P 5 -22559.329778 12178.993153 6478.620009 2.597685
P 6 -11975.835228 11302.047332 -20672.046392 -0.892709
P 7 -7891.987281 -17851.945480 18490.728365 640.391314
P 8 185.175075 -26308.083488 -2354.099088 401.300938
P 9 -15077.124638 2426.634113 21310.403782 -13.836088
P 10 -17744.537648 -3688.899030 -19547.704284 33.421150
P 11 15353.463428 -6036.175513 20818.194634 74.208233
P 13 11086.243818 -10785.284598 -21624.943701 -31.726775
P 14 9356.290918 17510.038573 17678.986169 -19.367883
P 15 2908.218772 25979.375463 3726.680952 178.103583
P 16 12375.140045 9553.845817 -21404.963050 7.372677
P 17 -14873.391974 2273.181979 -21674.051510 116.106604
P 18 -14733.719109 18767.326184 11462.331587 6.229675
P 20 23125.049802 -11943.513098 5280.630811 -206.280997
P 21 -7150.369624 22739.863714 -11362.605894 60.083789
P 23 391.325101 16420.947069 21386.369078 39.638908
P 24 -12220.453800 -16001.646621 -16986.647685 70.646359
P 25 10063.606852 23033.131387 -8315.193647 54.256380
P 26 -25048.994076 -7116.825232 6429.802263 506.033023
P 27 5807.958227 -22256.224495 -12357.891106 760.683184
P 28 4308.994095 -18686.949102 18420.013018 -0.300992
P 29 -24375.842289 -10559.878940 109.630502 143.289394
P 30 -18685.453638 18257.896028 -4711.433597 593.485406
P 31 24944.072810 3293.697994 8702.911719 428.074441

```

### 2, Namerané údaje na určovanom bode – observačná správa

```

3 10 28 0 0 0.0000000 0 8 31 14 23 3 28 15 11 20
5606367.812 4 21310042.119 -2476.225
30766330.493 4 21367710.183 -53.675
22552070.003 4 22681389.667 -2587.181
26555826.096 1 23579728.603 -3625.178
7544624.379 2 24219453.262 -226.582
15884155.550 2 24630738.507 -3439.845
26072574.474 4 20972097.144 1807.034
5469575.902 2 23391240.820 3225.163
3 10 28 0 15 0.0000000 0 7 31 14 23 3 28 11 20
8034131.685 4 21772031.908 -2885.246
31101065.211 4 21431405.191 -665.730
24955575.029 4 23138758.112 -2725.149
29879900.274 2 24212286.460 -3727.963
7999247.524 4 24305946.016 -756.865
24607619.907 4 20693316.579 1463.109
2666171.190 4 22857766.719 3020.827

```

### 3, Výber údajov z navigačnej a observačnej správy

$$\mathbf{S}_{xyz} = \begin{bmatrix} 18529624,108 & -11932469,662 & 15184513,399 \\ 22583102,118 & 5717505,280 & 13689769,552 \\ 10735440,029 & 11210350,747 & 21501400,082 \\ 26351944,935 & 530464,227 & 4326021,056 \\ 25924440,979 & -5388294,237 & 3711199,694 \\ 1612588,154 & 22216656,648 & 14290505,948 \\ 6707357,491 & -14672029,883 & 21170038,368 \end{bmatrix} m$$

4, Odmerané pseudovzdialenosti určené zo spracovania kódov a približné súradnice určovaného bodu A

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} 22262687,890 \\ 20981191,472 \\ 20552258,552 \\ 22420691,801 \\ 23086791,481 \\ 22999647,516 \\ 23102130,896 \end{bmatrix} m \quad \mathbf{r}_A^0 = \begin{bmatrix} 4031000 \\ 1409000 \\ 4906000 \end{bmatrix} m$$

5, Výpočet súradníc bodu A pomocou MNS

$$\Delta \mathbf{r}_{A,S_i} = \sqrt{(x_{S_i} - x_A^0)^2 + (y_{S_i} - y_A^0)^2 + (z_{S_i} - z_A^0)^2} \quad i = 1 \dots 7$$

$$\mathbf{A}_{1,i} = \frac{x_{S_i} - x_A^0}{\Delta \mathbf{r}_{A,S_i}} \quad \mathbf{A}_{2,i} = \frac{y_{S_i} - y_A^0}{\Delta \mathbf{r}_{A,S_i}} \quad \mathbf{A}_{3,i} = \frac{z_{S_i} - z_A^0}{\Delta \mathbf{r}_{A,S_i}} \quad \mathbf{A}_{4,i} = -1$$

$$\mathbf{l}_i = \Delta \mathbf{r}_{A,S_i} - \boldsymbol{\rho}_i$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0,625 & -0,600 & 0,463 & -1 \\ 0,885 & 0,205 & 0,419 & -1 \\ 0,329 & 0,480 & 0,813 & -1 \\ 0,999 & -0,039 & -0,026 & -1 \\ 0,954 & -0,296 & -0,052 & -1 \\ -0,105 & 0,907 & 0,409 & -1 \\ 0,116 & -0,698 & 0,706 & -1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{l} = \begin{bmatrix} -39889,878 \\ -7438,391 \\ -145806,228 \\ -74936,422 \\ -131323,404 \\ -45862,579 \\ -74292,188 \end{bmatrix} m$$

$$\mathbf{v} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l}$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} 431,947 \\ 782,689 \\ 514,540 \\ 74653,686 \end{bmatrix} m$$

$$\mathbf{r}_A = \mathbf{r}_A^0 + \mathbf{v}$$

$$\mathbf{r}_A = \begin{bmatrix} 4031431,947 \\ 1409782,689 \\ 4906514,540 \end{bmatrix} m$$

$$\Delta\delta = \frac{v_4}{c} \quad \Delta\delta = 249,018 \mu s$$

## 6, Určenie presnosti merania

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

$$PDOP = \sqrt{\mathbf{Q}_{1,1} + \mathbf{Q}_{2,2} + \mathbf{Q}_{3,3}}$$

$$PDOP = 2,335$$

$$GDOP = \sqrt{\mathbf{Q}_{1,1} + \mathbf{Q}_{2,2} + \mathbf{Q}_{3,3} + \mathbf{Q}_{4,4}}$$

$$GDOP = 2,705$$

$$TDOP = \sqrt{\mathbf{Q}_{4,4}}$$

$$TDOP = 1,365$$



## 6 SYSTEMATICKÉ EFEKTY V MERANIACH GPS

Kódové a fázové merania pseudovzdialeností k družiciam GPS sú ako každé geodetické merania ovplyvnené náhodnými chybami, ktoré súvisia najmä s procesom vysielania, šírenia sa signálu družíc a jeho elektronického spracovania. Všeobecne platí, že vplyv náhodných chýb je pri GPS malý a dá sa úspešne znížiť zvýšením počtu meraní, napríklad väčšou hustotou záznamu. Rozhodujúce pri využití GPS sú však systematické chyby, ktoré podstatným spôsobom ovplyvňujú merania a z nich odvodené výsledky určovania absolútnej a relatívnej polohy. Zdroje systematických chýb možno rozdeliť na 3 skupiny [2]:

- chyby spojené s družicami,
- chyby spôsobené prostredím v ktorom sa šíri signál,
- chyby spojené s prijímačom.

V tabuľke sú uvedené niektoré systematické efekty pri meraniach pseudovzdialeností pomocou GPS.

Tab.6.1: Systematické vplyvy v meraniach GPS

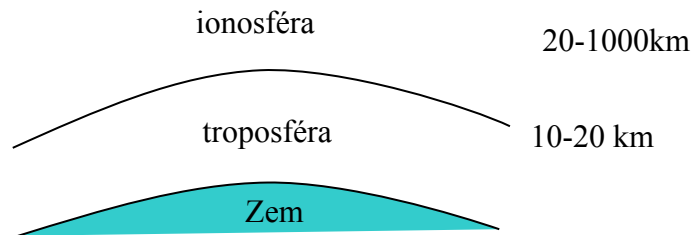
Zdroj	Efekt
Družica	<ul style="list-style-type: none"><li>- Chyba v určení dráhy (polohy) družice</li><li>- Systematická chyba hodín na družici</li><li>- Neznalosť presnej polohy fázového centra vysielacej antény</li><li>- Relativistické efekty</li></ul>
Šírenie sa signálu	<ul style="list-style-type: none"><li>- Troposférická refrakcia</li><li>- Ionosférická refrakcia</li><li>- Efekt viaccestného šírenia (multipath effect)</li></ul>
Prijímač	<ul style="list-style-type: none"><li>- Systematická chyba hodín</li><li>- Excentricita a variácia polohy fázového centra prijímacej antény</li></ul>

Na elimináciu, resp. redukcii systematických vplyvov sa využívajú viaceré spôsoby:

- využívanie presných dráh družíc,
- modelovanie systematických vplyvov nezávislými metódami, resp. na základe doplňujúcich meraní (napr. meteorologické parametre, testovanie antén a prijímačov GPS a pod.),
- odhad parametrov systematických vplyvov zo samotných meraní GPS pri ich spracovaní,
- diferencovanie originálnych meraní pred ich spracovaním,
- vhodná voľba metódy a podmienok merania.

### 6.1 Atmosférické efekty

Zemskú atmosféru považujeme v súvislosti s meraniami GPS za dvojzložkové prostredie s principiálne odlišnými účinkami na vysielané vysokofrekvenčné signály. Atmosféru delíme na troposféru a ionosféru.



Obr.6.1.: Rozloženie vrstiev zemskej atmosféry

Troposféra predstavuje neutrálnu súčasť atmosféry bez elektricky nabitých častíc. Je to spodná časť atmosféry, ktorá sa rozprestiera od zemského povrchu do výšky 10-20 km, pričom jej hrúbka kolíše so zemepisnou šírkou aj s ročným obdobím. Pre vlny s frekvenciou do 15 GHz sa javí ako nedisperzné prostredie, čo znamená, že oba typy meraní - fázové aj kódové budú ovplyvnené troposférickou refrakciou rovnako. Veľkosť troposférickej refrakcie závisí hlavne od meteorologických parametrov ovzdušia, akými sú najmä teplota, tlak a vlhkosť. Druhou zložkou je ionosféra, vyznačujúca sa vysokým obsahom voľných elektrónov a iónov, takže je elektricky aktívna. Rozprestiera sa vo výške približne od 20 km po 1000 km a pre rádiové vlny má charakter vyššie spomenutého disperzného prostredia. To znamená, že ionosférická refrakcia bude rozdielne vplyvať na fázové a kódové merania, resp. aj na fázové merania realizované na dvoch rozdielnych frekvenciách, čo je možné využiť, ako neskôr uvidíme, pri vhodnej kombinácii meraní na jej elimináciu.

## 6.2 Relativistické efekty

Teória relativity opisuje priebeh fyzikálnych javov obecnjšie, ako tomu bolo v klasickej newtonovskej fyzike, ktorá absolutizovala základné pojmy - priestor (vyplnený fiktívnym nehybným éterom, voči ktorému sa snažila dokázať absolútny pohyb) a čas. Tieto kategórie totiž tvoria bázu pri formulovaní fyzikálnych zákonov. Z pohľadu teórie relativity sú tieto pojmy relatívne - vlastnosti priestoru sú determinované povahou a štruktúrou telies, ktoré ho vyplňajú, a plynutie času závisí od relatívnej rýchlosti sústav, v ktorých ho sledujeme.

Špeciálna teória relativity zaviedla do fyziky pojem štvorrozmerného priestoru, keď k trom karteziánskym súradniciam  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  pričlenila štvrtú súradnicu - čas (ktorý reprezentuje dĺžkový ekvivalent  $c.t$ , kde  $c$  je rýchlosť svetla). To umožnilo formulovať zákonitosti aj medzi odľahlými priestorovo-časovými udalosťami charakterizujúcimi celkový vývoj v reálnom svete. Základnými postulátmi sú pritom:

- rovnaký tvar fyzikálnych zákonov,
- konštantná rýchlosť svetla vo vákuu vo všetkých inerciálnych sústavách.

Relativita sa prejavuje najmä pri veľkých rýchlostiach skúmaných objektov, pri veľkých vzdialenostiach a v prítomnosti nehomogénneho gravitačného poľa. Dôležitým faktorom je tiež požadovaná presnosť, s akou potrebujeme dané javy zmerať. V princípe sme týmto vymedzili dôvody, pre ktoré je potrebné relativistické efekty zahrnúť aj do určujúcich rovníc v meraniach GPS. Sú to predovšetkým nezanedbateľné efekty zmeny frekvencie na rýchlo sa pohybujúcich družiciach GPS a zmeny v dobe šírenia sa signálu v dôsledku rýchlosti družíc GPS voči rotujúcej Zemi ako aj ich veľkej vzdialenosti. Uvažujú sa však aj

relativistické poruchové účinky na dráhu družíc spôsobené nehomogénnym gravitačným poľom Zeme, ktoré sú dôsledkom všeobecnej teórie relativity.

Družica GPS sa pohybuje po kvázi-eliptickej dráhe v gravitačnom poli Zeme a pre pozorovateľa na Zemi je z hľadiska teórie relativity dôležité, akú má voči nemu relatívnu rýchlosť  $v$  a aký je rozdiel gravitačného potenciálu medzi zemským povrchom a družicou.

Po zavedení približných číselných hodnôt

$$\begin{aligned}
 GM_e &= 3,986005 \cdot 10^{14} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \\
 R_e &= 6,378137 \cdot 10^6 \text{ m} \\
 a &= R_e + h = 2,656 \cdot 10^7 \text{ m} \\
 c &= 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\
 e &= 0,015 \\
 V &= \frac{\pi}{2}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

$$\begin{aligned}
 v &= \sqrt{GM_e \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} = \sqrt{GM_e \left[ \frac{2(1 + \cos(V))}{p} - \frac{1}{a} \right]} = \sqrt{\frac{GM_e}{a} \left[ \frac{2(1 + \cos(V))}{1 - e^2} - 1 \right]} \\
 f'_0 - f_0 &= \Delta f_0 \cdot f_0 = -4,551 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Znamená to, že frekvencia na družici  $f_0$  je nižšia od nominálnej hodnoty 10,23 MHz o hodnotu 4,551 Hz, takže musí byť znížená na = 10,229 999 995 45 MHz.

### 6.3 Efekt viacestného šírenia sa signálu

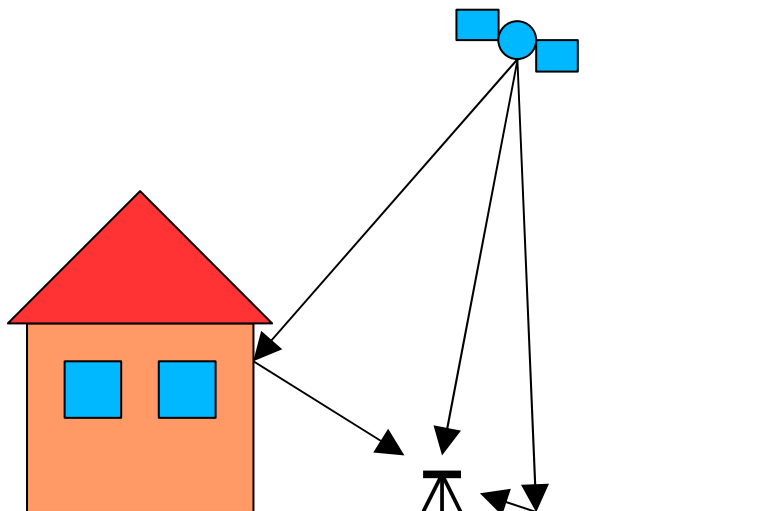
Družica GPS nevysiela elektromagnetické vlny len smerom k určitému prijímaču, ale vysiela ich v širokom kuželi tak, aby bola pokrytá celá Zem a jej okolie. Z hľadiska príjmu signálu potom môže nastať situácia znázornená na obr. 6.2, kde družicou vyslaný signál sa dostáva k prijímaču viacerými cestami (multipath effect - efekt viacestného šírenia sa signálu). Priama cesta signálu je v súlade s predpokladmi o šírení sa signálu. V prípade existencie odrazových plôch v okolí antény sa však dostáva signál k anténe aj nepriamo, pričom vykoná väčšiu dráhu. Výsledkom je, že meraná vzdialenosť medzi družicou a prijímačom je väčšia ako ich priama spojnica. Efekt ovplyvňuje mnoho činiteľov -geometrické rozloženie družice, antény a odrazovej plochy, reflexné vlastnosti plochy, konštrukcia antény GPS a i.

Vzhľadom na premenlivosť geometrickej konfigurácie (družica sa vzhľadom k anténe pohybuje), nemožno zostaviť všeobecný model efektu a jeho eliminácie. Existenciu a veľkosť vplyvu viacestného šírenia sa signálu na konkrétnom stanovisku však možno odhadnúť pomocou kombinácie kódových a fázových meraní na dvoch frekvenciách. Využíva sa k tomu skutočnosť, že troposféra, chyby hodín a relativistické efekty ovplyvňujú kódové a fázové merania rovnakým spôsobom. Na rozdiel od nich sú vplyvy ionosféry a viacestného šírenia závislé od frekvencie. Utvorením vhodných lineárnych kombinácií možno dosiahnuť elimináciu všetkých uvedených systematických vplyvov okrem efektu viacestného šírenia.

Z geometrického hľadiska je zrejme, že pri družiciach nízko nad horizontom je možnosť efektu väčšia, ako pri družiciach blízko zenitu. Kódové merania sú viacestným šírením ovplyvnené v oveľa väčšom rozsahu ako merania fázy nosnej vlny. Podľa [2] môže dosiahnuť vplyv na pseudovzdialenosti určované pomocou kódov 10 m - 20 m, kým pri fázových meraniach nie je väčší ako 1 cm. Pri dlhodobých meraniach, keď sa vystriedajú rozličné polohy družíc, efekt viacestného šírenia na určenie polohy sa minimalizuje. Nepriaznivo sa prejaví vtedy, ak sa pozorovanie uskutočňuje len počas krátkeho intervalu.

Redukcia vplyvu viacecestného šírenia je možná viacerými spôsobmi: konštrukciou antény GPS, technologickými zdokonaleniami prijímača a metódou spracovania prijatého signálu. Z konštrukčných prvkov antény sa uplatňuje najmä ochranný tanier pod anténou, ktorý zabráni prijmu signálov odrazených od Zeme, vodných hladín a nízkych reflexných plôch. O ďalších možnostiach súvisiacich s anténami GPS sa zmienime v stati 9.1.

Existenciu efektu viacecestného šírenia na konkrétnom stanovisku možno odhaliť analýzou výsledkov dlhodobého merania družíc GPS. Vychádza sa pritom zo skutočnosti, že veľkosť vplyvu efektu viacecestného šírenia sa signálu na kódové merania je o 2-3 rády väčšia ako na fázové merania.



Obr. 6.2.: Viacecestné šírenie sa signálu.

## 7 METÓDY MERANIA POMOCOU GPS

V tejto kapitole sa venujeme praktickej stránke využitia GPS v geodézii a pri práci s GIS. S cieľom zdôrazniť základné pojmy často sa vyskytujúce v praxi. Najprv zopakujeme ich význam a doplníme niektoré dôležité základné definície. Nakoľko prevažná väčšina literatúry o GPS, manuálov k prijímačom a spracovateľským softvérom je v angličtine, uvádzame aj originálnu anglickú terminológiu. Pripomíname však, že v súčasnosti ani v angličtine ešte nie je ustálená štandardná terminológia pre všetky pojmy používané v súvislosti s GPS.

Pri charakterizovaní presnosti GPS treba dôsledne odlišovať vnútornú presnosť metódy od vonkajšej (skutočnej) presnosti. Vnútorná presnosť (v angličtine sa používa termín precision) je charakteristická pre konkrétne, časovo obmedzené meranie pri nemienciach sa vonkajších podmienkach. Vnútorná presnosť GPS vyplýva z možností, ktoré vychádzajú z koncepcie a štruktúry použitého signálu, typu nosnej vlny a technických parametrov prijímača. Zvyšovaním počtu meraní, počtu pozorovaných družíc a predlžovaním intervalu pozorovania stredné chyby charakterizujúce vnútornú presnosť klesajú. Pre GPS je charakteristická vysoká vnútorná presnosť, a to ako pre kódové, tak aj fázové merania. Vo všeobecnosti však platí, že nezodpovedá skutočnej presnosti. Dôvodom je, že neplatí všeobecne prijímaný predpoklad, že merania určitým prijímačom za istý časový interval na tie isté družice sú vzájomne nezávislé. V skutočnosti sú takéto merania vzájomne korelované, modelovanie ich korelácií je však zložité a všeobecne sa pri spracovaní neuplatňuje. Preto pri práci s výsledkami krátkodobých meraní treba z hľadiska hodnotenia ich presnosti postupovať veľmi obozretne.

Skutočnú presnosť (v angličtine accuracy) charakterizuje vystriedanie všetkých vonkajších podmienok pri meraniach. Pri GPS sú to najmä atmosférické vplyvy, efekt viacestného šírenia, aktuálne rozloženie pozorovaných družíc ako aj technické parametre prijímačov a použité modely spracovania v softvéroch. Charakteristiky skutočnej presnosti GPS sa získajú z dlhodobých experimentov, pri menej presných metódach ich testovaním na bodových poliach určených presnými metódami. Charakteristiky uvádzané v tejto časti sa vzťahujú vždy k skutočnej, vonkajšej presnosti.

### 7.1 Základné pojmy

**Kódové merania vzdialeností** (code range): využívajú sa pseudonáhodné kódy (C/A-kód a P-kód) vysielané družicami GPS, výsledkom sú pseudovzdialenosti ovplyvnené nesynchronnosťou hodín prijímača so systémovým časom GPS. Všeobecne je presnosť kódových meraní 1 - 5 m, ovplyvňuje ju aktivácia režimu SA. Prijem kódového signálu je možný aj cez menšie prekážky (napr. redšia vegetácia), nie je treba spojitie sledovanie družíc. Určenie polohy je možné z jednotlivých simultánných meraní na 4 a viac družíc, každá epocha simultánného merania umožňuje nezávislé určenie polohy. Metóda nevyžaduje riešenie ambiguit.

**Fázové merania nosnej vlny** (carrier phase): merania rozdielov (prírastkov, resp. úbytkov) vzdialeností sledovanej družice. Uskutočňujú sa s milimetrovou presnosťou, požiadavkou je spojitý príjem signálu družice. Prerušenie príjmu spôsobia aj malé prekážky, treba sledovať a korigovať sklzy v počítaní celých cyklov. Určovanie polohy je spojené s riešením problému ambiguit.

**Absolútne určovanie polohy** (point positioning, absolute point positioning): jedným prijímačom sa na základe merania pseudovzdialeností určí priestorová poloha v geocentrickom súradnicovom systéme. Meranie a spracovanie nezávisí od polohy ostatných určovaných bodov.

**Relatívne, diferenciálne určovanie polohy** (relative positioning, differential positioning): simultánne meranie, ktoré vyžaduje dva a viac prijímačov. Určujú sa nové

súradnice bodu s využitím meraní na bode, ktorého poloha je známa. Pojem relatívne určovanie polohy sa spravidla používa, ak sa vychádza z merania fáz nosnej vlny. O diferenciálnom určovaní polohy sa hovorí, ak sa vychádza z meraní pseudovzdialeností redukovaných o tzv. diferenciálne korekcie určené na referenčnom bode.

**Statické metódy určovania polohy** (static positioning): prijímač je vzhľadom k Zemi počas merania v rámci jednej ucelenej observačnej série (session) v pokoji. Čas merania je niekoľko minút až niekoľko hodín, dní. Presnosť určenia polohy bodu závisí od použitej metódy a dĺžky observácie.

**Kinematické metódy určovania polohy** (kinematic positioning): prijímač, pre ktorý určujeme okamžitú polohu je v pohybe. Tento názov sa vo všeobecnosti používa aj v prípade ak sa pohyb prijímača zastaví na krátky čas (niekoľko sekúnd až niekoľko minút) potrebný na meranie. Táto metóda sa často bližšie špecifikuje prívlastkom pseudokinematická. Fázové kinematické merania vyžadujú simultánne merania na nepohybujúcej sa referenčnej stanici, kódové merania referenčnú stanicu v princípe nevyžadujú, jej použitie však zvyšuje presnosť určenia súradníc.

**Jednofrekvenčné merania** (single frequency measurements): využíva sa len nosná vlna L1 a C/A, resp. P-kód modulovaný na L1. Vplyv ionosféry sa redukuje pomocou matematických modelov atmosféry, numerické hodnoty koeficientov reprezentujúce aktuálny stav sa získajú z navigačnej správy. Pri relatívnych fázových meraniach je využitie jedno frekvenčných prijímačov obmedzené do vzdialenosti maximálne 10-15 km.

**Dvojfrekvenčné merania** (dual frequency measurements): súčasné merania kódov alebo fázy na oboch nosných vlnách L1 a L2. V lineárnych kombináciách L3 fázových alebo kódových meraní je eliminovaný vplyv ionosféry. Merania na dvoch frekvenciách sa uplatnia aj v niektorých technikách riešenia ambiguit.

Výber metódy merania pomocou GPS závisí od požiadaviek a charakteru projektu, rozhodujúca je požadovaná presnosť, prípadne časové limity. Výslednú presnosť determinuje najmä to, či sa využívajú merania pseudonáhodných kódov alebo fázové merania, jedna alebo obe frekvencie a parametre použitých prijímačov GPS. Závisí však aj od ďalších činiteľov:

- aktuálneho rozloženia družíc,
- stavu ionosféry,
- modelu eliminácie vplyvu troposféry,
- použitých polôh družíc (vysielané alebo presné efemeridy),
- aktivácie SA a AS,
- použitého softvéru pri spracovaní.

Základné rozdelenie metód je na dve skupiny:

- absolútne určovanie polohy výlučne na základe kódového merania pseudovzdialeností,
- relatívne určovanie polohy meraním fázy nosnej vlny.

## 7.2 Absolútne určovanie polohy pomocou kódových meraní

Ide o základnú metódu z hľadiska primárnej koncepcie systému, ktorá dovoľuje prácu v reálnom čase. Na určenie polohy stačí samostatné meranie jedným prijímačom. Výsledná presnosť závisí od toho, či ide o štandardnú polohovú službu (Standard Positioning Service) využívajúcu C/A-kód ktorá zabezpečuje s 95% pravdepodobnosťou polohovú presnosť 10 m alebo o presnú polohovú službu (Precise Positioning Service) s P-kódom ktorá zabezpečuje s 95% pravdepodobnosťou polohovú presnosť 1 m.

### 7.2.1 Diferenciálne určovanie polohy – DGPS

Metóda nazvaná ako diferenciálne určovanie polohy - DGPS (Differential GPS) využíva referenčný stacionárny prijímač umiestnený na bode, ktorého poloha je s dostatočnou presnosťou známa a využíva najmä skutočnosť, že zdroje chýb sú pre oba prijímače podobné, a teda eliminujú sa až do vzdialenosti 50 km. Metóda je vhodná pre tých používateľov, ktorí požadujú rýchle určovanie polohy a je pre nich postačujúca metrová presnosť. Presnosť diferenciálneho určovania polohy pomocou C/A-kódu je 1 až 5 m. a je funkciou počtu družíc a vzdialenosti pohybujúceho sa prijímača od referenčnej stanice.

### 7.2.2 DGPS pre rozsiahle územia – WADGPS

Rozšírenie DGPS pre väčšie územie je možné využitím siete referenčných staníc. Metóda nazývaná ako DGPS pre rozsiahle územia (Wide Area DGPS - WADGPS) pokrýva väčšie plochy ako DGPS s jednou referenčnou stanicou. Kvalita diferenciálnych korekcií neklesá so vzdialenosťou od referenčnej stanice, ale je rovnomerne rozložená na celom území. Najjednoduchšou alternatívou metódy WADGPS je výpočet diferenciálnych korekcií pre požadované miesto ako váženého priemeru z najbližších staníc, s tým, že váhy sú nepriamo úmerné vzdialenosti. Komplexnejší prístup spočíva v samostatnom modelovaní jednotlivých systematických efektov - troposféry, ionosféry, dráh a hodín družíc a následného výpočtu korekcií pseudovzdialeností pre každú referenčnú stanicu.

Najlepšie výsledky pre WADGPS sa dosiahnu výpočtom diferenciálnych korekcií pre tzv. virtuálne referenčné stanice. Ide o miesta, kde sa nemusí nachádzať žiadna skutočná referenčná stanica, ale o nezávisle zvolené miesto, napr. také, v ktorom sa aktuálne nachádza pohybujúci sa prijímač.

### 7.2.3 Metódy šírenia diferenciálnych korekcií

Využitie diferenciálnych korekcií je síce možné aj pri následnom spracovaní odmeraných hodnôt (postprocessing), ale hlavný význam má spracovanie v reálnom čase. K tomu je treba, aby sa aktuálne diferenciálne korekcie šírili k používateľom. Vysielacia stanica a pohybujúci sa prijímač GPS musia byť pritom vybavené kompatibilnými zariadeniami.

Na vysielanie diferenciálnych korekcií sa používajú dve základné komunikačné metódy:

- Globálne pokrytie sa dosiahne využitím telekomunikačných družíc, napr. INMARSAT, ktoré sa nachádzajú na geostacionárnych dráhach.
- Využitie pozemných vysielateľov prostredníctvom existujúcich sietí verejných alebo súkromných rozhlasových staníc. V porovnaní s družicovými systémami má obmedzený dosah, ich zriadenie a prevádzka sú však podstatne lacnejšie a jednoduchšie. Údaje sa môžu šíriť formou priameho vysielania na dlhých alebo stredných vlnách (prenosové rýchlosti 50 - 300 baudov), prostredníctvom modulácie na existujúce vysielanie v pásme FM (systém RDS - Rádio Data System) alebo v sieťach mobilných telefónov - GSM (prenosové rýchlosti 9600 baudov). Služby permanentného vysielania diferenciálnych korekcií pracujú v mnohých krajinách. Ako príklad uvádzame nemeckú sieť SAPOS (Satellite Positioning Service), ktorá vysiela na frekvencii 150 MHz, alebo švédsku sieť SWEPOS. Diferenciálne korekcie sa systematicky vysielajú aj vo Švajčiarsku a Rakúsku a iných krajinách prostredníctvom terestrických rozhlasových vysielaní.

Vysielané diferenciálne korekcie môžu byť v tvare, ktorý je špecifický pre konkrétny prijímač. Vhodnejšie je však používať štandardný formát, nezávislý od typu prijímača. V súčasnosti sa na komunikáciu medzi referenčným prijímačom a pohybujúcimi sa prijímačmi využíva formát RTCM, verzia 2.2 [2]. Svojou štruktúrou sa podobá navigačnej správe GPS, obsahuje diferenciálne korekcie GPS, parametre referenčnej stanice, merané

pseudovzdialenosti, korekcie kódových a fázových meraní referenčnej stanice. Okrem korekcií družíc GPS sú v RTCM 2.2 rezervované miesta aj pre diferenciálne korekcie družíc GLONASS.

### 7.3 Metódy relatívneho určovania polohy

Najvyššia presnosť využitia GPS sa dosahuje relatívnymi meraniami fázy nosnej vlny. Určenie priestorových zložiek vektora základnice je založené na simultánnom meraní na oboch jej koncových bodoch. Základnou metódou je statické meranie. Jeho modifikáciami vznikli metódy kinematických fázových meraní, pri ktorých sa jeden prijímač pohybuje. Znamená to, že sa priebežne určujú zložky vektorov, ktoré majú začiatok v jednom bode a v dôsledku pohybu druhého bodu sa mení ich veľkosť a orientácia. Pôvodne sa spracovanie fázových meraní mohlo uskutočniť len po ich ukončení a zhromaždení do jedného miesta - ide o metódu následného spracovania, tzv. postprocessing. V súčasnosti je možné pre kratšie základnice zabezpečiť rádiový prenos meraní medzi koncovými bodmi, čo viedlo k metódam kinematických meraní v reálnom čase (RTK - Real Time Kinematics).

#### 7.3.1 Relatívne určovanie polohy statickou metódou

Statické relatívne fázové meranie je základnou a najčastejšie používanou metódou v geodézii. Jedinou podmienkou jeho realizácie je nezatielený prístup signálov družíc na meraných bodoch. Presnosť určenia základnice je v milimetroch a závisí od viacerých faktorov, akými sú dĺžka základnice, počet simultánne meraných družíc a geometrická konfigurácia družíc.

Nevyhnutnou požiadavkou statických meraní je simultánne meranie na najmenej 4 družice a podľa možnosti spojitý neprerušovaný príjem signálu na oboch meraných bodoch. Dĺžka observácií je všeobecne viac ako 20 minút a závisí od dĺžky meranej základnice, počtu frekvencií, počtu družíc a očakávanej presnosti. Východiskové hodnoty pre dĺžku meraní môžeme získať podľa vzťahu [2]

$$\begin{aligned} L1: & 30 \text{ min} + 3 \text{ min/km} \\ L1+L2: & 20 \text{ min} + 2 \text{ min/km} \end{aligned}$$

Uvedené údaje sú orientačné, platia pre normálne atmosférické podmienky a dobrú geometrickú konfiguráciu so 4 družicami pre vzdialenosti do 20 km. Väčší počet družíc má za následok skrátenie času približne o 20%.

Statická metóda dovoľuje určiť základnice od niekoľko metrov až po niekoľko 100 km, v krajnom prípade až 1000 km. Pre veľmi dlhé základnice sa stáva problémom simultánne pozorovanie dostatočného počtu družíc vzhľadom na obmedzenia ich viditeľnosti z koncových bodov základnice. Pri základniciach nad 300 km treba počítat s dlhými intervalmi meraní (12 h - 24 h). Podobne, ak sa vyžaduje vysoká presnosť nepresahujúca niekoľko milimetrov aj pre kratšie základnice (pre geodynamické výskumy, presné lokálne geodetické siete, overovanie antén GPS a pod.), treba uskutočniť najmenej 12 h, resp. 24 h observácie, aby sa vystriedali všetky družice systému a všetky konfigurácie pre meraní základnicu. Všeobecne platí, že čím dlhšie meranie, tým spoľahlivejšie výsledky. Pri plánovaní dĺžky meraní treba zväžiť ekonomické hľadiská a dať ich do súladu s požadovanou presnosťou.

Statické relatívne určovanie polohy vychádza z merania fázy nosnej vlny L1, prípadne oboch vln L1 a L2. Meranie na oboch frekvenciách je nevyhnutné pre základnice dlhšie ako 10 km kvôli eliminácii vplyvu ionosféry a je prínosom pri riešení ambiguit. Pri spracovaní jedno frekvenčných aj dvoj frekvenčných meraní sa využívajú najprv trojnásobné diferencie na získanie približných súradníc (presnejších ako zo spracovania kódových meraní, štandardná odchýlka 1 -3 cm) ako aj na kontroly a opravy sklzov počítania celých cyklov. V



druhej fáze spracovania sa využívajú dvojnásobné diferencie, pričom riešenie sa uskutočňuje vo viacerých iteráciách s ohľadom na metódu riešenia celočíselných hodnôt ambiguit. Určenie ambiguit je tým činiteľom, ktorý v hlavnej miere ovplyvňuje potrebu dlhších observácií pri vzrastajúcej dĺžke základnice.

Pre časový interval, počas ktorého sa vykonávajú simultánne merania na jednom alebo viacerých bodoch v jednej konfigurácii, sa v angličtine používa názov „session“. V slovenčine sa pre interval meraní využíva bez prekladu termín session, alebo opisné vyjadrenie „observačná séria“.

Obvyklými parametrami pre statické meranie je výškový filter  $15^\circ$  (v angličtine sa používa termín Elevation mask) a interval záznamu meraní 15 s. Pozorovanie družíc nižších ako  $15^\circ$  sa experimentálne využíva na dokonalejšie modelovanie troposféry a pri úsilí o spoľahlivejšie určenie elipsoidických výšok. Pri spracovaní sa potom meraniam prisudzuje váha v závislosti od zenitovej vzdialenosti  $z$  tak, že smerom k horizontu sa váha meraní znižuje. Záznam meraní 15 s je optimálny pre merania v lokálnych sieťach, pre permanentné stanice GPS a pre regionálne siete sa používa záznam v 30 s intervaloch. Hustejší záznam pre statické merania neprináša žiadne výhody.

### 7.3.2 Rýchla statická metóda

Rýchla statická metóda (Fast static, resp. Rapid static) je z hľadiska postupu pri meraní podobná statickej metóde, významne je však skrátená doba merania. Skrátenie času potrebného na meranie je umožnené tým, že pri spracovaní sa použijú metódy rýchleho vyriešenia ambiguit. Tieto techniky využívajú súčasné spracovanie fázových aj kódových meraní a v prípade dvoj frekvenčných prijímačov aj súčasne oboch frekvencií. Orientačné hodnoty pre čas potrebný na meranie sú podľa [2]

L1: 20 min + 2 min/km

L1+L2: 10 min + 1 min/km

Rýchle riešenie ambiguit je možné vďaka spresneným zariadeniam na kódové merania a vyvinutiu špeciálnych štatistických metód spracovaní fázových meraní. Tieto postupy pri väčšom počte družíc ako štyri a súčasnom spracovaní meraní na dvoch frekvenciách dovoľujú určiť ambiguity už z niekoľkokomínútového merania. Podmienkou je dostatočný počet dobre rozložených družíc, v prípade zatienenia časti družíc prekážkami rýchla statická metóda nie je vhodná. Vo väčšej miere ako pri statickej metóde býva riešenie ovplyvňované efektom viaccestného šírenia sa signálu.

### 7.3.3 Kinematické (polokinematické) relatívne určovanie polohy

Pre metódy, ktoré dovoľujú rýchle relatívne určovanie polohy z fázových meraní GPS za pohybu sa používa názov kinematické (kinematic). V geodetickej praxi sa však častejšie stretávame s metódami pomenovanými ako polokinematické (semikinematic) alebo ako metóda stop&go. Lepšie to vystihuje podstatu geodetického merania ako názov kinematické, keďže prijímač sa síce pohybuje, ale samotné meranie (a jeho záznam) sa uskutočňuje počas krátkych zastavení prijímača (od niekoľkých sekúnd až po niekoľko minút). Princíp metódy je v tom, že ambiguity sa vyriešia na začiatku merania a pokračuje sa následnými krátkymi zastaveniami s prijímačom na určených bodoch. Spracovanie využíva určené ambiguity s tým, že príjem signálu z identických družíc sa nesmie počas transportu prerušiť.

Na bode, ktorého súradnice sú známe sa umiestni tzv. referenčný prijímač, ktorý sa počas merania nepohybuje. Kinematické fázové meranie musí začať vyriešením ambiguit na referenčnom bode, tzv. inicializácia. Je niekoľko možností ako úspešne určiť začiatkové ambiguity. Jednou je meranie na krátkej základnici, ktorej parametre sú známe, čo umožní určiť ambiguity počas niekoľkých epoch meraní. Druhou možnosťou je rýchlou statickou metódou určiť na krátkej základnici jej parametre a súčasne aj ambiguity. Tretí postup využíva výmenu antén na krátkej základnici (Antenna swap). Prijímač A sa umiestni na referenčnom bode a prijímač B na zvolenom pevnom bode v blízkosti referenčného. Po

niekoľkých epochách meraní sa prijímače vymenia, pričom nesmie dôjsť ku prerušeniu príjmu signálu. Inicializácia sa ukončí opätovnou výmenou prijímačov.

V súčasnosti najprogressívnejšou metódou inicializácie je vyriešenie ambiguit počas pohybu tzv. metóda OTF (On-The-Fly). Tieto postupy majú spoločné východiská ako rýchla statická metóda. Priestor pre hľadanie ambiguit sa vymedzí pomocou kódových meraní. Pri C/A kóde to je kocka so stranami « 4 m. V rámci tohto priestoru sa potom testujú možné kombinácie ambiguit fázových meraní s tým, že sa stanoví tá, ktorá vedie k najmenšej disperzii. Skúsenosti z praktických meraní ukazujú, že OTF dokáže vyriešiť ambiguity a parametre základnice s centimetrovou presnosťou až do vzdialenosti 20 km.

Po úspešnej inicializácii sa môže uskutočniť samotné kinematické fázové meranie. Pohybujúcim prijímačom (v angličtine sa označuje ako rover) sa postupne merajú jednotlivé body, pričom referenčný prijímač ostáva stále na svojom mieste. Na určovaných bodoch pritom stačí merať niekoľko sekúnd. Podstatné však je, že sa nesmie prerušiť príjem signálu z minimálne štyroch družíc. Centimetrová presnosť sa môže dosiahnuť až do vzdialenosti 20 km. Metóda je použiteľná len v otvorenom teréne bez prekážok. V prípade straty kontinuity príjmu signálu treba inicializáciu opakovať. Spracovanie je formou postprocessingu, t. j. po ukončení a zhromaždení nameraných údajov.

#### 7.3.4 Kinematická metóda v reálnom čase - RTK

Osobitnou formou relatívnych kinematických meraní je kinematické metóda v reálnom čase - RTK (Real Time Kinematics). Prístrojové vybavenie pozostáva z jedného referenčného, nepohybujúceho sa prijímača a druhého pohybujúceho sa prijímača. Oba prijímače uskutočňujú simultánne fázové merania. Podstatné je, že medzi prijímačmi je trvalé rádiové spojenie prostredníctvom modemov. Vzhľadom na množstvo údajov určených na prenos musí mať modem vysokú prenosovú rýchlosť 19 200 baudov.

Princíp RTK tkvie v okamžitom prenose odmeraných údajov referenčného prijímača prostredníctvom rádiového spojenia do pohybujúceho sa prijímača. Tento má v sebe zabudovaný softvér na spracovanie fázových meraní, takže hneď po inicializácii sa z meraní prijatých z referenčného prijímača a z vlastných meraní môžu tvoriť diferencie a uskutočniť celkové spracovanie relatívneho určovania polohy s využitím vysielaných efemeríd.

Oneskorenie spracovania je len niekoľko sekúnd po meraní, takže ide prakticky o prácu v reálnom čase. Inicializácia sa uskutočňuje výlučne metódou OTF, pričom stačí meranie počas 30 sekúnd. Po inicializácii meranie môže pokračovať buď spojitým na stále sa pohybujúcim prijímači, alebo sa prijímač na krátky okamih zastaví na meranom bode. Ak sa príjem signálu preruší treba znova určiť ambiguity metódou OTF. Spoľahlivosť RTK závisí najmä od výkonu rádiového modemu zabezpečujúceho spojenie referenčného a pohybujúceho sa prijímača. Alternatívnou možnosťou je spojenie prijímačov prostredníctvom siete GSM.

Merania metódou RTK možno uskutočniť dvoma metódami:

- Statické meranie v reálnom čase: Najlepšie výsledky sa dosiahnu ak meranie na bode trvá niekoľko minút. Výsledné súradnice sú priemerom meraní z intervalu, počas ktorého bol prijímač na určovanom bode. Polohová presnosť sa udáva podľa vzťahu:  $5\text{mm} + 2\text{ppm}\cdot b$ , kde  $b$  je vzdialenosť medzi referenčným a pohybujúcim sa prijímačom.
- Kinematické meranie v reálnom čase: Pohybujúci sa prijímač plynulým mení svoju polohu, registrujú sa okamžité súradnice. Záznam súradníc môže byť v intervale 0,1 s až niekoľko desiatok sekúnd. Polohová presnosť sa udáva podľa vzťahu  $10\text{ mm} + 2\text{ ppm}\cdot b$ .

Softvéry pre metódu RTK poskytujú okrem možnosti práce v geocentrickom systéme (súradnice X, Y, Z alebo B, L, H na elipsoide WGS 84) aj prácu v rovinnom systéme s tým, že majú možnosť voľby kartografického zobrazenia. Okrem toho majú aj zabudovanú možnosť určenia transformačných parametrov na základe merania identických bodov. Súčasťou výsledku merania, ktorý sa indikuje na displeji pohybujúceho sa prijímača, sú okrem rovinných súradníc vo zvolenom súradnicovom systéme aj výšky (elipsoidické, alebo v prípade znalosti priebehu geoidu aj nadmorské) ako aj charakteristiky presnosti určenia okamžitej polohy.

### 7.3.5 Pseudokinematické relatívne určovanie polohy

Táto metóda je v princípe podobná statickej metóde, čas potrebný na meranie sa však skrúti tým, že sa nemeria spojité počas celého požadovaného intervalu. Meranie sa obmedzí len na začiatok a koniec intervalu potrebného na spoľahlivé vyriešenie ambiguit a určenie súradníc. Charakteristické pre túto metódu je, že na každom bode sa musí anténa umiestniť dva razy.

Postup merania vychádza zo stratégie, pri ktorej je jeden prijímač staticky umiestnený v referenčnom bode a druhý pohybujúci prijímač postupne prechádza všetkými určovanými bodmi. Na každom bode sa meria staticky 5 minút a potom sa prejde na ďalší bod. Po uplynutí najmenej 60 minút sa opäť podobným spôsobom prejdú všetky určované body. Prednosťou metódy je časová úspora, keď sa čas potrebný na statické určenie cca. 60 min skrúti na meranie 2x5 minút, treba však zarátat časy potrebné na opakované presuny medzi bodmi. Preto je metóda vhodná na určenie bodov, medzi ktorými je možný rýchly a jednoduchý presun. Počas presunov prijímač nemusí byť v činnosti.

Spracovanie sa uskutočňuje po ukončení merania. Presnosť pseudokinematickej metódy je lepšia ako 1 cm. Dosiahne sa to tým, že geometria družíc sa dostatočne zmení počas intervalu medzi meraniami (1 hodinu a viac), čo stačí na vyriešenie ambiguit. Meradlom toho, či bola relatívna zmena konfigurácie dostatočná je veličina PDOP. Výsledky určenia súradníc z meraní len na začiatku a konci intervalu sú svojou presnosťou porovnateľné s výsledkami z kontinuálneho merania počas celého intervalu. Metóda nevyžaduje dvoj frekvenčný prijímač ani žiadne dodatočné vybavenie (modemy a pod.) a na riešenie postačí aj minimálny počet štyroch družíc.

Použitie jednotlivých metód relatívneho určenia polohy vyplýva z technických parametrov prijímačov a charakteru úlohy. Rozhodujúcimi činiteľmi sú požadovaná presnosť, rýchlosť a ekonomické podmienky. Najvyššia presnosť sa dosiahne statickou metódou. Pre rýchle určovanie polohy najperspektívnejšou metódou je RTK.

## 7.4 Presnosť určovania polohy pomocou GPS

Presnosť určovania priestorovej polohy pomocou GPS je funkciou mnohých parametrov, a preto nemožno podať jednoznačné údaje vzťahujúce sa ku všetkým situáciám. Všeobecne platí, že určenie elipsoidických výšok je menej presné ako určenie horizontálnej polohy, a to 1,5 až 3-násobne. Príčinou je nesymetrické rozloženie družíc z hľadiska určenia výšky (družice možno merať len nad horizontom) a rozličný vplyv troposférickej refrakcie na meraných stanoviskách.

Pre geodetické aplikácie je rozhodujúca presnosť relatívneho určovania polohy. Najvýznamnejšími faktormi ovplyvňujúcimi skutočnú presnosť určenia súradníc pomocou relatívnych fázových meraní sú:

- dĺžka intervalu merania,
- počet družíc a ich rozloženie vzhľadom k meraným bodom,
- dĺžka meranej základnice,
- metóda spracovania, použité modely, stupeň eliminácie systematických chýb,

- metódy riešenia ambiguit,
- meranie na jednej alebo dvoch frekvenciách,
- typ prijímača a antény,
- typ efemeríd družíc (vysielané efemeridy alebo presné polohy určené IGS).

Pre dĺžku intervalu merania základníc do 20 km jedno frekvenčným prijímačom platia orientačne údaje uvedené v tab. 7.1. [2]. Treba si pritom uvedomiť, že pri zvyšovaní dĺžky merania nie je rozhodujúce dosiahnuť väčší počet meraní (ten by sa dal zvýšiť aj zhustením záznamu), ale získať dostatočnú zmenu geometrie družíc kvôli vyriešeniu ambiguit. Požadovaná zmena konfigurácie môže nastať len po uplynutí určitého časového intervalu.

Tab. 7.1 Doba merania základnice do 20 km statickou metódou jedno frekvenčným prijímačom

Základnica (km)	Trvanie merania (min)
1	20-35
5	25-45
10	35-60
20	55-90

Presnosť určenia horizontálnych súradníc pre krátke základnice (do 20 km) pri optimálnych podmienkach možno charakterizovať na základe vzťahov [2]

Statické merania:  $\sigma = 5 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm}$

Kinematické merania:  $\sigma = 5 \text{ cm} + 5 \text{ ppm}$

Predpokladom získania uvedených hodnôt je simultánne pozorovanie najmenej 5 družíc, stabilné ionosférické podmienky a vyriešenie ambiguit.

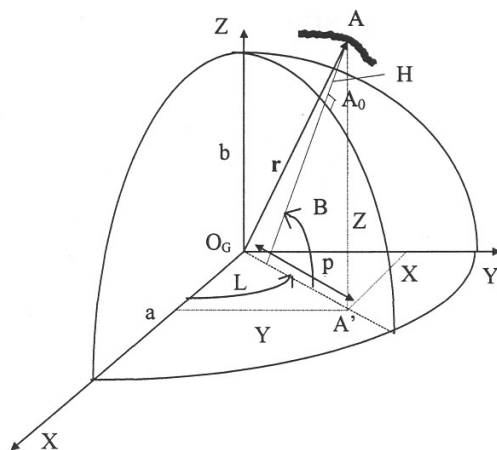
## 8 TRANSFORMÁCIE SÚRADNÍC

Globálny polohový systém NAVSTAR pracuje v referenčnom súradnicovom systéme, ktorý sa nazýva Svetový geodetický systém 1984 (WGS 84). Výsledkom spracovania pozorovaní GPS sú karteziánske geocentrické súradnice  $X, Y, Z$  určovaného bodu, prípadne súradnicové rozdiely  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  medzi známym a určovaným bodom.

Pri následnom využití výsledkov GPS však nie je obvykle vhodné pracovať s geocentrickými karteziánskymi súradnicami. Pre praktické účely sa využívajú geodetické súradnice  $B, L, H$  vzťahnuté k elipsoidu WGS 84, alebo lokálne topocentrické súradnice (vzťahnuté k bodu na povrchu Zeme). Pri topocentrickom trojrozmernom súradnicovom systéme pritom môže ísť o pravouhlé alebo polárne súradnice. V geodetickej praxi sa používajú rovinné súradnice a nadmorské výšky, v našich podmienkach je to súradnicový systém Jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej (S-JTSK) a výškový systém Baltský po vyrovnaní (Bpv). V nasledujúcich kapitolách sa budeme venovať najčastejšie používaným typom transformácií výsledkov GPS.

### 8.1 Transformácia medzi karteziánskymi a elipsoidickými súradnicami vo WGS-84

Uvažujme pravouhlé geocentrické súradnice  $X, Y, Z$  bodu  $A$  v systéme WGS-84 na povrchu Zeme a rotačný geocentrický elipsoid s hlavnou polosou  $a$ , vedľajšou polosou  $b$  a excentricitou  $e$ . Stred elipsoidu je v ťažisku Zeme a jeho rotačná os je totožná s osou  $Z$  karteziánskeho systému.



Obr. 8.1 Karteziánske súradnice  $X, Y, Z$  a elipsoidické súradnice  $\varphi, \lambda, H$ .

Polohu bodu  $A$  môžeme vyjadriť v súlade s obr. 8.1 elipsoidickými súradnicami  $B, L, H$ . Elipsoidickou šírkou  $B$ , elipsoidickou dĺžkou  $L$  a elipsoidickou výškou  $H$ , alebo karteziánskymi súradnicami  $X, Y, Z$ . Vzťahy medzi pravouhlými a polárnymi elipsoidickými súradnicami vyplývajú z geometrie rotačného elipsoidu [4]. Platí

$$\begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L \\ Z &= [N(1 - e^2) + H] \sin B = \left( \frac{b^2}{a^2} N + H \right) \sin B \end{aligned} \quad (8.1)$$

kde  $N$  je priečný polomer krivosti

$$N(B) = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}} = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} \quad (8.2)$$

V aplikáciách súvisiacich s GPS sa častejšie stretávame s inverznou transformáciou, nakoľko výsledkom spracovania GPS sú karteziánske súradnice  $X, Y, Z$  a treba z nich vypočítať elipsoidické súradnice  $B, L, H$ . V literatúre je publikovaných niekoľko spôsobov, ako riešiť túto úlohu, ich prehľad ako aj nové metódy sa uvádzajú napr. v [3].

Východiskom sú vzťahy (8.1), z ktorých pre geodetickú dĺžku dostávame

$$\operatorname{tg}L = \frac{Y}{X} \quad (8.3)$$

Pre výpočet  $B$  a  $H$  uvedieme dva postupy.

## 8.2 Výpočet pomocou iterácií

Zavedme pomocnú veličinu  $p$ , pre ktorú platí

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2} = (N + H) \cos B \quad (8.4)$$

Podielom súradnice  $Z$  danej treťou z rovníc a hodnoty  $p$  je

$$\frac{Z}{p} = \operatorname{tg}B \cdot \left(1 - \frac{e^2 N}{N + H}\right) \quad (8.5)$$

kde  $e^2$  je prvá numerická excentricita elipsoidu. Zlomok na ľavej strane možno vypočítať z karteziánskych súradníc, na pravej nepoznáme hodnoty  $B$  a  $H$  a navyše ani  $N$ , ktoré je funkciou  $B$ . Úpravou dostaneme vzťah

$$\operatorname{tg}B = \frac{Z}{p} \cdot \frac{N + H}{N + H - e^2 N} \quad (8.6)$$

V 0-tej aproximácii použijeme  $H = 0$  a vypočítame  $B_0$  a následne  $N_0$  zo vzťahov

$$\operatorname{tg}B_0 = \frac{Z}{p} \cdot \frac{1}{1 - e^2} \quad N_0 = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 B_0 + b^2 \sin^2 B_0}} \quad (8.7)$$

Zo vzťahu (8.4) vypočítame potom

$$H_0 = \frac{p}{\cos B_0} - N_0 \quad (8.8)$$

Pre  $i$ -tu iteráciu ( $i \neq 1$ ) s využitím (8.6) potom platí

$$\operatorname{tg}B_i = \frac{Z}{p} \cdot \frac{N_{i-1} + H_{i-1}}{N_{i-1} + H_{i-1} - e^2 N_{i-1}} \quad (8.9)$$

a ďalej

$$N_i = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 B_i + b^2 \sin^2 B_i}} \quad H_i = \frac{p}{\cos B_i} - N_i \quad (8.10)$$

Výpočet sa opakuje, kým nie sú splnené podmienky  $|B_i - B_{i-1}| < 0.00003''$  a  $|H_i - H_{i-1}| < 1\text{mm}$ , ktoré zabezpečia transformáciu s milimetrovou presnosťou.

## 8.3 Metóda výpočtu podľa Bowringa

Metódu, ktorá pre body na povrchu Zeme nevyžaduje iterácie, uvádza Bowring (1976). Zavádza pomocný uhol  $\theta$ , ktorého hodnota je blízka ku hodnote  $B$  a je daná vzťahom

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{Z \cdot a}{p \cdot b} \quad (8.11)$$

Potom pre geodetickú šírku a výšku platí

$$\operatorname{tg}B = \frac{Z - e^2 b \sin^3 \theta}{p - e^2 a \cos^3 \theta} ; \quad H = \frac{p}{\cos B} - N ; \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} . \quad (8.12)$$

kde  $e^2$  je druhá numerická excentricita elipsoidu.

#### 8.4 Transformácia súradníc WGS-84 do súradnicového systému JTSK

Družicová metóda GPS pracuje v globálnom geocentrickom trojrozmernom karteziánskom súradnicovom systéme WGS 84, pričom výsledky sa vzťahujú k okamihu pozorovania. Pre ďalšie využitie treba získané súradnice transformovať do iného súradnicového systému, ktorým býva najčastejšie národný referenčný súradnicový systém záväzný v určitej krajine. U nás je to S-JTSK. Transformačné koeficienty môžu byť vopred zadané, alebo ich treba určiť na základe súboru identických bodov, ktorých súradnice sú známe v oboch súradnicových systémoch. Pre tento typ úloh sa používajú modely transformácií medzi trojrozmernými priestorovými systémami, pričom môžeme použiť zhodnostné, podobnostné, afinné, prípadne polynomické modely. Voľba konkrétneho typu závisí od charakteru a presnosti súradníc, ktoré treba transformovať.

Na spoľahlivé určenie transformačných parametrov pre priestorovú transformáciu treba poznať 4 až 5 identických bodov s vhodnou geometrickou konfiguráciou. Pre konformnú transformáciu je rozsah územia obmedzený do 20-30 km, pre rozsiahlejšie územie sú výhodné polynomické modely. Pri výpočte elipsoidických výšok sa musí použiť model kvázigeoidu.

#### 8.5 Lineárna konformná transformácia

Ak nie sú k dispozícii nadmorské výšky, alebo nie je známy priebeh geoidu s dostatočnou presnosťou, nemožno použiť elipsoidické výšky pri výpočte karteziánskych súradníc referenčného systému. V takom prípade je vhodné použiť model 2D transformácie, kde  $(x,y)$  sú súradnice pôvodnej sústavy,  $(X,Y)$  súradnice druhej sústavy,  $\omega$  je uhol rotácie a  $q$  je mierka, potom

$$\begin{aligned} X &= q(x \cos \omega - y \sin \omega) + k_x \\ Y &= q(x \sin \omega + y \cos \omega) + k_y \end{aligned} \quad (8.13)$$

Ak sa  $q=1$  ide o shodnostnú transformáciu ak je  $q \neq 1$  ide o podobnostnú transformáciu. Hodnoty  $\omega$  a  $q$  určíme nasledovne:

$$\begin{aligned} \omega = \alpha - \alpha' \quad \text{kde} \quad \tan \alpha = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad \text{a} \quad \tan \alpha' = \frac{\Delta y}{\Delta x} \\ q^2 = \frac{\Delta X^2 + \Delta Y^2}{\Delta x^2 + \Delta y^2} \end{aligned} \quad (8.14)$$

V niektorých špeciálnych prípadoch je vhodné použiť na transformáciu rozdielne mierky  $q_x$  a  $q_y$

$$q_x = \frac{\Delta X}{\Delta x} \quad q_y = \frac{\Delta Y}{\Delta y} . \quad (8.15)$$

#### 8.6 Podobnostná transformácia súradníc v priestore

Pri tejto transformácii sa uplatnia tri rotácie  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , tri posuny  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$  a zmena mierky  $q$ . Celkovo je to sedem prvkov, preto sa jej niekedy hovorí aj sedemprvková transformácia. Transformáciu môžeme zapísať nasledovnou rovnicou:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = q R \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} \quad (8.16)$$

Kde rotačnú maticu  $R$  vyjadrujeme rovnicou

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8.17)$$

po roznásobení dostávame

$$R = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \beta \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \\ -\cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \\ \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \quad (8.18)$$

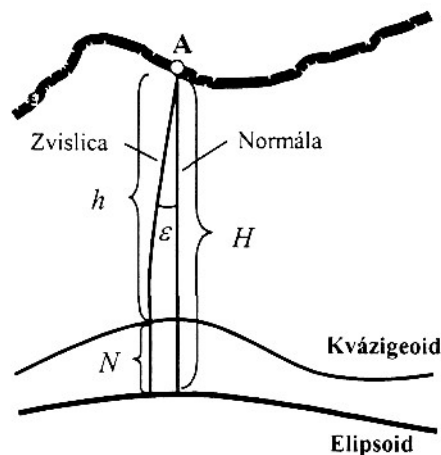
## 8.7 Transformácie výšok

Výsledkom transformácie karteziánskych súradníc  $X, Y, Z$  určených pomocou GPS na elipsoidické súradnice sú súradnice  $B, L$  a výšku  $H$  nad elipsoidom WGS 84 (alebo GRS 80). V geodetickej praxi nie je obvyklé pracovať s výškami, ktoré udávajú odľahlosť bodu  $A$  od elipsoidu meranú po normále. Sú na to minimálne dva závažné dôvody: v predružicovej ére nebolo možné priame určenie  $H$  pomocou terestrických geodetických metód a tiež, že používanie geodetických výšok nie je v súlade s praktickými požiadavkami (ustálená hladina vodnej plochy nemá rovnakú geodetickú výšku). Používané výškové systémy sú budované na báze nadmorských výšok  $h$ , ktoré sa vzťahujú ku geoidu, resp. kvázigeoidu (podľa toho, či sa využívajú ortometrické alebo normálne výšky). Pre jednoduchosť budeme ďalej pracovať len s normálnymi výškami a kvázigeoidom, problémy geoidu a kvázigeoidu sa podrobne analyzujú [5]

Obr. 8.2 znázorňuje jednoduchý vzťah medzi výškami nad elipsoidom a kvázigeoidom pričom platí

$$H = h + \zeta \quad (8.19)$$

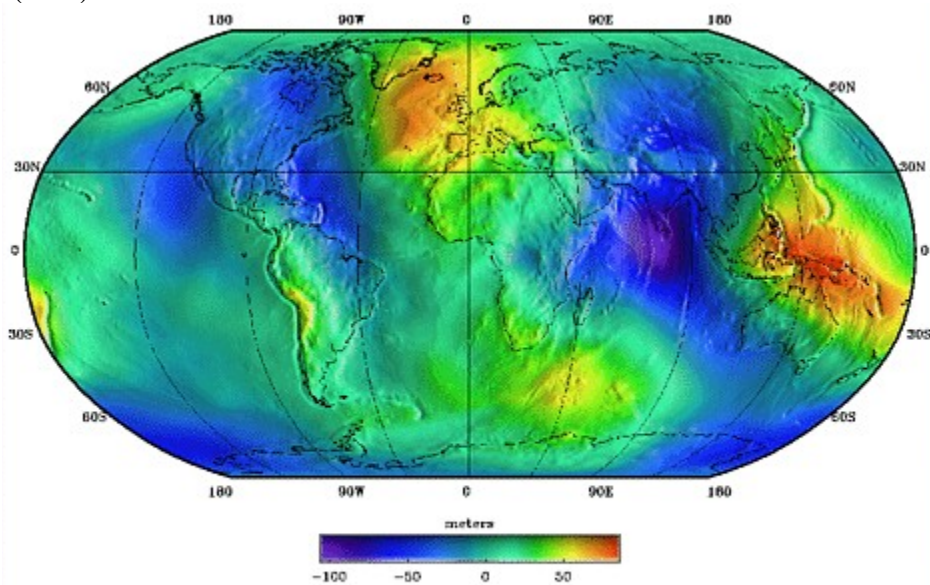
kde  $\zeta$  je výška kvázigeoidu nad elipsoidom. Vplyv uhla  $\varepsilon$ , ktorý predstavuje zvislicovú odchýlku, ktorá je obvykle menšia ako  $30''$  a len v hornatých terénoch dosahuje hodnoty max.  $1-2'$ , môžeme v tejto súvislosti zanedbať.



Obr 8.2 Nadmorská normálna výška  $h$ , elipsoidická výška  $H$  a výška  $\zeta$  kvázigeoidu nad elipsoidom

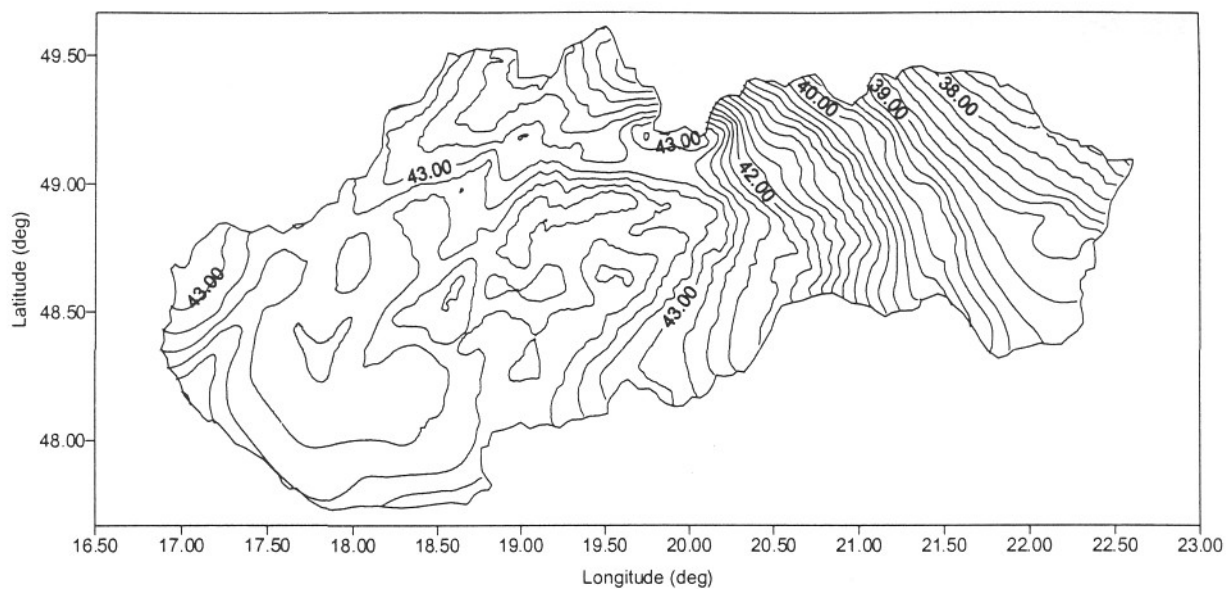


Ak okrem elipsoidickej výšky  $H$  určenej pomocou GPS poznáme  $h$ , resp.  $\zeta$  môžeme druhú z veličín určiť zo vzťahu (8.19). V bodoch, pre ktoré poznáme nadmorskú výšku  $h$  určenú pomocou geometrickej nivelácie a elipsoidickú výšku  $H$  určenú pomocou GPS, môžeme určiť výšku kvázigeoidu  $\zeta$ . Naopak, v bodoch, kde poznáme priebeh výšok kvázigeoidu môžeme určiť nadmorské výšky. Je pritom dôležité, aby sa všetky tri veličiny - elipsoidické výšky, nadmorské výšky a výšky kvázigeoidu vzťahovali k jednotnému systému. Geodetické výšky a výšky kvázigeoidu musia byť definované k rovnakému, zhodne umiestnenému a orientovanému elipsoidu. Musí byť jednoznačne určené o aký typ nadmorských výšok ide: ortometrické alebo normálne, t.j. stanoviť, či vzťažnou plochou je geoid alebo kvázigeoid. Na určenie priebehu geoidu (kvázigeoidu) sa využíva kombinácia družicových modelov Zeme, pozemných meraní tiažového zrýchlenia, modelov hustoty a modelov topografie terénu. Rozdiely sú aj v absolútnej a relatívnej presnosti jednotlivých veličín  $H$ ,  $h$  a  $\zeta$ . Vzhľadom na uvedené problémy teda nie je praktická aplikácia jednoduchej rovnice (8.19) triviálna.



Obr. 8.3 Priebeh geoidu EGM96

Na tvorbu kvázigeoidu pre územie Slovenska z gravimetrických údajov sa použila technológia remove-restore [6]. Dlhovlnná časť sa určila z gravimetrického modelu Zeme EGM96 s uvažovaním všetkých členov do rádu a stupňa 360. Krátkovlnná časť sa určila z reziduálnych anomálií tiažového zrýchlenia metódou dvojrozmernej rýchlej Fourierovej transformácie v rovinnej aproximácii. Z územia Slovenska sa použili údaje z gravimetrického mapovania v mierke 1:25000. Z územia mimo Slovenska sa použili úplné Bougerove anomálie a stredné výšky v sieti 5' x 7,5' do vzdialenosti 100 km od štátnej hranice. Na určenie topografickej korekcie sa použil digitálny model terénu 100 m x 100 m. Pomocou polynomickej plošnej transformácie sa výšky gravimetrického geoidu transformovali na výšky odvodené z porovnania GPS a nadmorských výšok v systéme Bpv. [7]. Výsledný kvázigeoid Slovenska, označený ako model GMSQ98BF je na obr. 8.4. Z jeho testovania vyplynulo, že odchýlky nadmorských výšok určených pomocou elipsoidických výšok a výšok kvázigeoidu od nadmorských výšok určených niveláciou a pripojením na Štátnu nivelačnú sieť SR nepresahujú 5 cm, v mnohých lokalitách sa dosahuje vyššia presnosť. Znamená to, že v súčasnosti možno pomocou GPS určovať nadmorské výšky s presnosťou do  $\pm 5$  cm, okrem vysokohorských terénov, kde určovanie výšok má špecifické problémy, ako z hľadiska presnosti kvázigeoidu, tak aj z hľadiska problémov pri eliminácii systematického vplyvu troposféry [8].



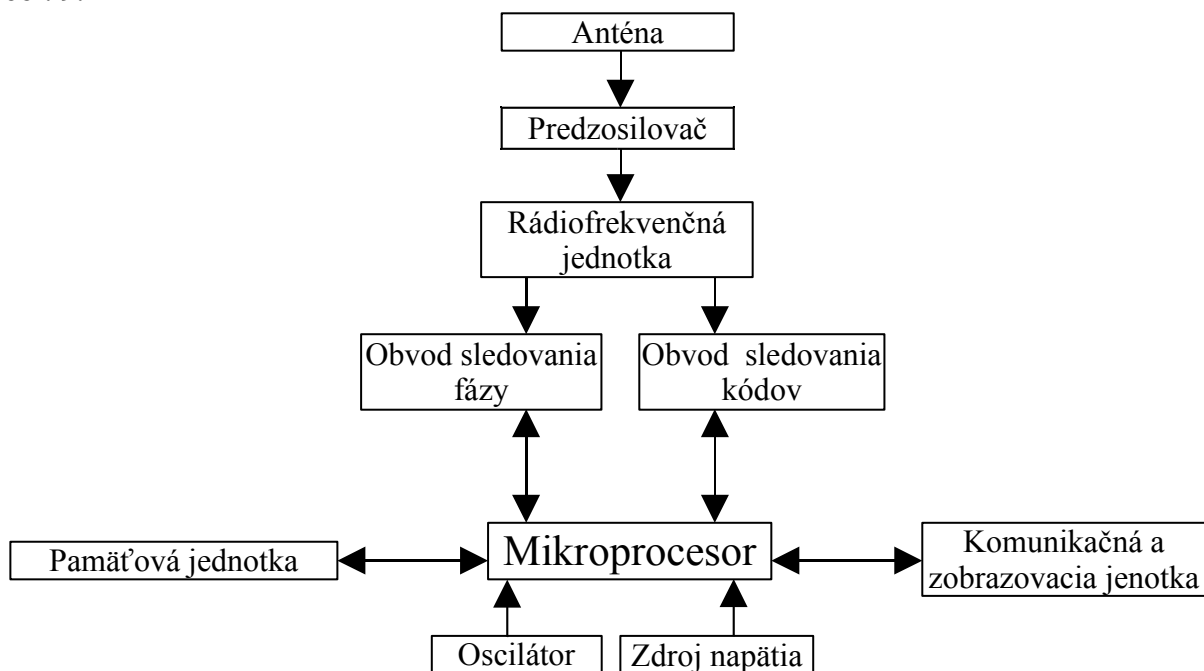
Obr. 8.4 Model kvázigeoidu Slovenska GMSQ98BF s intervalom izočiar 0,2 m [6]

## 9 PRIJÍMAČE A SOFTVÉRY

### 9.1 Všeobecná koncepcia geodetického prijímača GPS

Na príjem, meranie a spracovanie signálov družíc GPS sú vyvinuté špeciálne zariadenia, ktoré nazývame prijímače GPS. Prijímače konštruované pre kódové aj fázové merania, ktoré sa využívajú v geodézii a GIS, tvoria len malú časť v súčasnosti vyrábaných zariadení na prácu s GPS. Rozhodujúca časť produkcie sa orientuje na prijímače pre okamžité určovanie polohy a navigáciu pomocou merania pseudovzdialeností. Vývoj všetkých typov prijímačov sa neustále zdokonaľuje, a preto nie je účelné sa venovať detailnému opisu konštrukcie konkrétnych prijímačov. My sa zameriame na základné princípy a stavebné jednotky, ktoré obsahuje každý geodetický prijímač GPS. Podrobnejšie technické údaje a najmä postup pri práci s konkrétnym výrobkom sú obvykle uvedené v technickej dokumentácii a používateľskom návode ku každému prijímaču.

Základnými blokmi prijímača GPS sú anténa s predzosilovačom, rádio-frekvenčná jednotka, moduly sledovania signálu, komunikačná a zobrazovacia jednotka, frekvenčný oscilátor a zdroj napätia. Hlavné moduly geodetického prijímača a ich vzájomné väzby sú na obr. 9.1



Obr. 9.1. Základné moduly geodetického prijímača GPS

**Anténa prijímača** GPS má funkciu premeniť energiu elektromagnetických vln prichádzajúcich z družice na elektrický prúd, ktorý sa môže ďalej spracovávať v prijímači GPS. Veľkosť a tvar antény sú veľmi dôležitými charakteristikami, nakoľko od nich závisí schopnosť prijať slabý signál GPS a poskytnúť ho na ďalšie spracovanie prijímaču. Antény môžu byť konštruované len na príjem frekvencie L1 alebo oboch frekvencií L1 a L2. Existuje viacero typov konštrukcií antén GPS - tzv. špirálové kužeľové, špirálové valcové alebo ploché mikroprúžkové (microstrip). V ideálnom prípade konštrukcia antény GPS zabezpečí, že fázové centrum je totožné s geometrickým stredom antény. Poloha fázového centra by mala byť stabilná a nezávislá od smeru, z ktorého prichádza signál družice GPS. V skutočnosti je však fázové centrum citlivé na orientáciu a sklon antény. Preto sa pri presných geodetických odporúča pri meraní orientovať antény vždy rovnakým smerom (zvyčajne na sever).

Signál GPS prijatý anténou je veľmi slabý, preto je anténa doplnená nízkošumovým **predzosilovačom** ktorý zvyšuje hladinu signálu predtým, než sa dostane k samotnému prijímaču. Signál sa z antény a predzosilovača prenáša do prijímača koaxiálnym káblom, v ktorom sa signál mierne zoslabuje a oneskoruje. Preto je dĺžka kábla obmedzená, v prípade požiadavky na dlhší prenos treba použiť v trase kábla vhodný predzosilovač. Oneskorenie v prenosovom kábli je rovnaké pre všetky merané družice, preto sa tento efekt pri spracovaní prejaví spoločne s korekciou hodín prijímača.

**Rádiofrekvenčná jednotka.** Úlohou tejto časti prijímača je najprv zmeniť vysokú frekvenciu nosných vln signálu GPS na nižšiu, tzv. medzifrekvenciu. Dôvodom je, že nižšia frekvencia sa v ďalších častiach prijímača jednoduchšie spracováva ako pôvodne prijatý signál s frekvenciou 1,2 a 1,6 GHz.

Referenčný signál je generovaný kremenným **oscilátorom**. Prijímače sú obvykle vybavené štandardným oscilátorom, ktorý parametrami odpovedá oscilátorom komerčných náramkových hodín. Frekvenčné oscilátory musia byť spoľahlivé najmä z hľadiska krátkodobej stability. Niektoré prijímače, od ktorých sa požaduje dlhodobá stabilita, majú možnosť pripojenia na externý atómový štandard - rubídiový alebo céziový.

Anténa prijímača GPS súčasne prijíma signály viacerých družíc, prijímač ich musí od seba oddeliť, aby sa každá meraná družica mohla využiť na kódové a fázové merania. Signál sa rozčlení do jednotlivých kanálov, v ktorých už ďalšie sledovanie a spracovanie družice prebieha samostatne. Minimálny potrebný počet sú štyri kanály pre frekvenciu L1. Tieto sú nevyhnutné na určenie polohy a korekcie hodín prijímača. Ďalšie kanály dovoľujú meranie viacerých družíc na L1 ako aj meranie na frekvencii L2 kvôli eliminácii vplyvu ionosféry. Väčšina geodetických prijímačov má 8-12 kanálov pre L1, alebo 16-24 kanálov pre obe frekvencie L1 a L2. Takto sa môžu simultánne sledovať všetky pozorovateľné družice, pričom signál každej družice (L1 alebo L2) sa spojíť sníma jedným kanálom počas celej dráhy nad horizontom.

**Obvody sledovania kódov a fázy** sú zariadenia na meranie prijatého signálu, ktorý sa mení s časom a mení sa aj jeho frekvencia. V obvodoch so spätnou väzbou sa priebežne porovnáva prijatý signál družice so signálom generovaným v prijímači s cieľom vytvorenia chybového signálu ako ich rozdielu. Minimalizáciou chybového signálu sa hľadá replika družicového signálu posunutého v čase a frekvencii.

Obvod sledovania kódov sa používa pri kódových technikách na priradenie postupnosti pseudonáhodného kódu (C/A-kódu alebo P-kódu) vyslaného družicou a prijatého prijímačom k identickému kódu generovaného prijímačom. V zariadení nazývanom ako korelátor sa postupne posúvajú v čase a vzájomne porovnávajú oba signály. Sleduje sa pritom výstupná hodnota korelátora, ktorá je maximálna ak sú signály stotožnené. Časový posun  $\Delta t$ , ktorý bol potrebný, aby sa dosiahlo vzájomné priradenie signálov, je rovný času potrebnému na šírenie sa signálu od družice k prijímaču. Keďže okamihy vysielania pseudonáhodných kódov družicou sú synchronizované v systémovom čase GPS, prijaté signály poskytujú aj informáciu o presnom čase.

V prijímačoch vybavených len C/A-kódmi sa môže týmto spôsobom rekonštruovať len nosná vlna frekvencie L1. Na rekonštrukciu L2 treba poznať aj štruktúru P-kódu, resp. metódu jeho dešifrovania z Y-kódu. Postupnosť P-kódu je veľmi dlhá, preto na nastavenie referenčného signálu do blízkosti prijatého signálu sa využíva informácia získaná dešifrovaním C/A-kódu a tým sa urýchljuje práca korelátora.

Po identifikácii pseudonáhodných kódov sa tieto odstránia z prijatého signálu a spracovanie pokračuje v **obvode sledovania fázy**. Priradením fázy prijatého filtrovaného medzifrekvenčného signálu k fáze signálu generovaného prijímačom sa demoduluje obsah navigačnej správy. Ak je oscilátor zosynchronizovaný s družicovým signálom v ďalšom sa sleduje plynulá zmena jeho fázy. Meranou veličinou je počet celých cyklov prijatej vlny a

aktuálny zlomok fázy indikovaný oscilátorom. Aktuálna vzdialenosť k družici je zložená z dvoch častí: z hodnoty fázového merania prenášobného príslušnou vlnovou dĺžkou a začiatočného neurčitého počtu celých cyklov - ambiguity.

**Mikroprocesor** riadi celkovú činnosť prijímača, vykonáva numerické operácie s prijatým a demodulovaným signálom, umožňuje interaktívnu prácu s prijímačom a jeho programovanie. Mikroprocesor pracuje na digitálnej báze, preto je treba, aby prijatý analógový medzifrekvenčný signál bol najprv zdigitalizovaný. Po spustení prijímača sa v mikroprocesore začne spracovanie prijatých a do digitálnej formy prevedených informácií: výpočet časového intervalu  $\Delta t$  z kódového merania a následne určenie pseudovzdialeností, počítanie celých cyklov a určenie zlomkovej časti merania fázy nosnej vlny. Mikroprocesor zabezpečuje dekódovanie navigačnej správy a určenie okamžitej polohy pomocou pseudovzdialeností. Okrem toho sa v ňom dekoduje aj almanach a na základe približných dráhových elementov všetkých družíc systému (aj tých, ktoré sa nepozorovali) vypočíta ich polohy v horizontálnom súradnicovom systéme so začiatkom v mieste prijímača. Mikroprocesor umožňuje aj ďalšie numerické operácie, akými sú výpočty rýchlosti pri pohybujúcom sa prijímači, výpočty parametrov pre navigáciu, určenie okamžitých hodnôt veličín DOP a transformácie z WGS 84 do lokálnych súradnicových systémov. Okrem výpočtov zabezpečuje mikroprocesor spracovanie pokynov zadaných užívateľom, zobrazenie informácií na displeji prijímača a obsluhu vstupných a výstupných portov.

V prijímačoch GPS, ktoré umožňujú prácu v reálnom čase sú v mikroprocesore zabudované programy na výpočet diferenciálnych korekcií kódových meraní, resp. programy na diferencovanie fázových meraní, ich spracovanie pri použití rýchlych algoritmov riešenia ambiguit a inicializáciu. Prenos údajov potrebných na diferenciálne spracovanie v reálnom čase sa zabezpečuje medzi jednotlivými prijímačmi rádiovým spojením pomocou modemov a terestrického vysielania.

**Komunikačná jednotka a zobrazovacia jednotka.** Väčšina geodetických prijímačov GPS má klávesnicu a displej, ktoré umožňujú komunikáciu s používateľom. Klávesnica sa využíva na zadávanie parametrov režimu práce prijímača (interval meraní, výškový filter, spôsob merania), zadávanie doplnkových informácií, akými sú identifikačné údaje bodu, výška antény, prípadne údajov potrebných pre navigáciu (cieľové súradnice a pod.). Na displeji sa zobrazujú jednotlivé ponuky prijímača pomocou menu, doplneného v niektorých prípadoch aj názornými piktogramami. Klávesnica a displej umožňujú komunikáciu pri spojení prijímača s osobným počítačom, ku ktorému sa prijímač pripája sériovým portom RS-232. Pri niektorých nových typoch prijímačov sa práca v základnom režime aktivuje len spustením bez nutnosti dodatočných nastavení.

**Pamäťová jednotka.** Pre post-processingové spracovanie simultánných pozorovaní sa kódové a fázové merania GPS ako aj navigačná správa zaznamenávajú do internej pamäte prijímača. Pamäť má obvykle kapacitu 1-10 Mbyte, čo dovoľuje záznam od 24 h do niekoľkých dní s ohľadom na počet družíc a zvolený interval. Alternatívnou možnosťou záznamu výsledkov je použitie PCMCIA pamäťových kariet. Pre dlhodobé meranie majú prijímače možnosť záznamu priamo na pevný disk PC.

**Zdrojom napätia** prijímača GPS sú interné nabíjateľné batérie (NiCd, NiMH, LiPol...), ktoré dodávajú potrebné napätie. Najnovšie typy prijímačov majú znížené nároky na zdroje napätia tak, aby sa dosiahla dlhšia prevádzka bez nutnosti dobíjania vnútorných batérií. Alternatívnou možnosťou napájania prijímačov sú externé batérie, napr. olovené autobatérie, alebo pripojenie na sieť 220V. Rozmery a váha prijímačov GPS sa postupne zmenšujú tak, že súčasné zariadenia na príjem, spracovanie a záznam meraní na družice GPS sú porovnateľné, alebo sú menšie ako klasické geodetické prístroje teodolity a diaľkomery.

Vývoj prijímačov GPS sleduje technologické pokroky v oblasti miniaturizácie elektronických komponentov, zvyšovania ich citlivosti, zvyšovania rýchlosti a výkonu mikroprocesorov a znižovanie energetickej náročnosti. Základné prvky geodetického

prijímača tak, ako je to naznačené na obr. 9.1, však vyplývajú z celkovej koncepcie GPS a musia byť obsiahnuté v každom zariadení na meranie a určovanie polohy pomocou GPS.

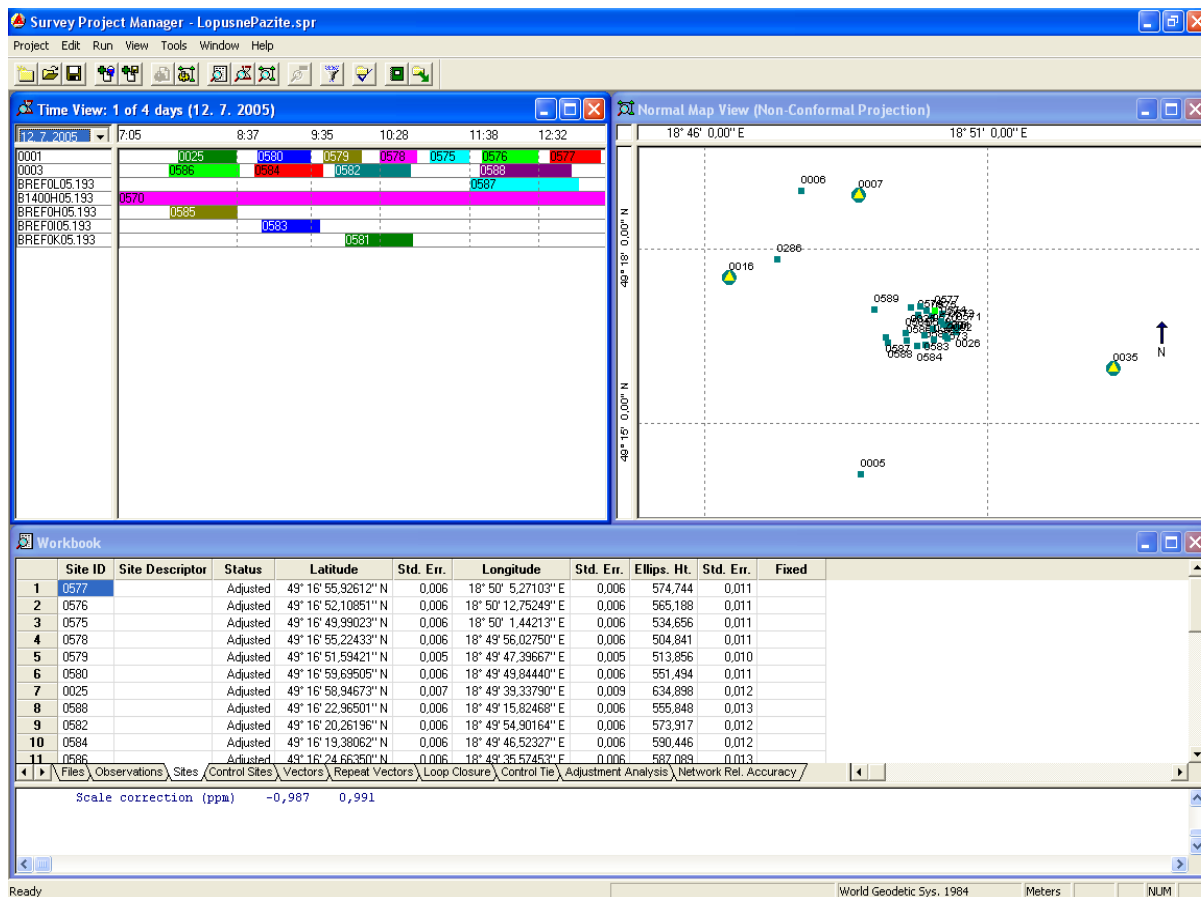
## 9.2 Ashtech ProMark II

Na katedre Geodézie ŽU v Žiline máme k dispozícii tri GPS prijímače ProMark II firmy Ashtech. Môžu súčasne spracovávať C/A kód a fázu na frekvencii L1 z dvanástich družíc systému GPS NAVSTAR a WAAS/EGNOS.

- Statické meranie:
  - Polohová presnosť: 0.005 m + 1 ppm
  - Výšková presnosť: 0.010 m + 2 ppm
  - Presnosť určenia azimutu: < 1 arcsecond
- Kinematické meranie:
  - Polohová presnosť: 0.012 m + 2.5 ppm
  - Výšková presnosť: 0.015 m + 2.5 ppm
  - Doporučený čas observácie na bode: 15min
  - Doporučený čas inicializácie: 5 min
- Real-Time meranie pomocou WAAS:
  - Polohová presnosť: 3 m s anténou ProAntenna.
  - Polohová presnosť: 5 m s internou anténou.
  - Observačný čas: 1 s.
- Veľkosť a rozmery:
  - Váha:
    - Prijímač: 0.14 kg
    - Externá anténa: 0.45 kg
    - Batérie (2xAA): 0.05 kg
  - Rozmery:
    - Prijímač: 15.8 cm x 5.1 cm x 3.3 cm
    - Externá anténa: 19 cm x 9.6 cm
- Ostatné údaje:
  - Displej: 5.6 cm x 3.4 cm
  - Klávesnica: 12 kláves.
  - Prepojenie s PC: RS232, 2400 – 115200 baud.
  - Pracovná teplota: -10°C to 60°C.
  - Interval ukladania dát: 1 - 30 s.
  - Veľkosť vnútornej pamäte: 8 MB (postačuje na uloženie dát z 10 satelitov po dobu 14 hod. pri dvojsekundovom ukladaní dát).
  - Typ batérií : 2 batérie typu AA uložené v prístroji.
  - Kapacita batérií: do 8 hodín s alkalickými batériami pri teplote 25°C.

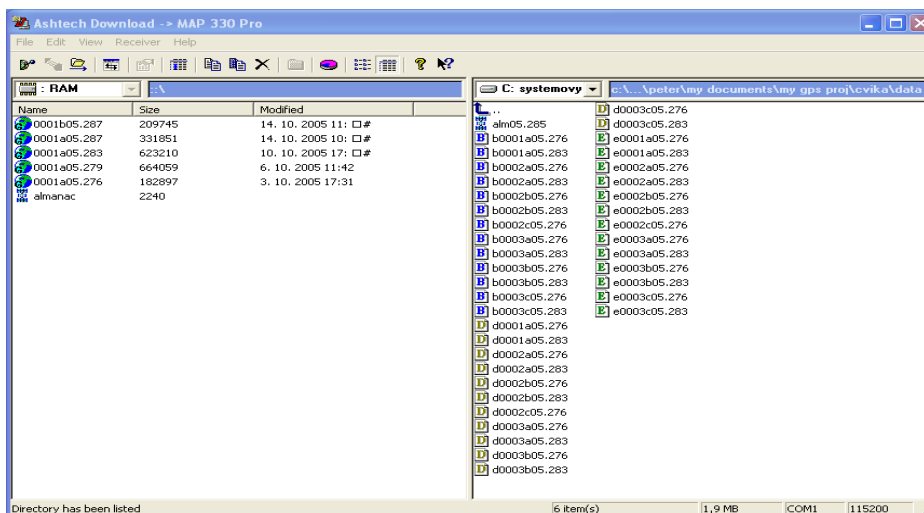


Na spracovanie nameraných dát je k prijímačom dodávaný firemný program Ashtech Solution. Program pracuje pod operačným systémom Windows 95/98/ME/NT/200/XP. Vyžaduje počítač s procesorom minimálne Pentium 133, 32 MB RAM a 90MB voľného miesta na HDD.



Obr. 9.2. Ashtech Solution

Na prenos nameraných dát z prijímača slúži program Ashtech Download, ktorý je súčasťou programu Asthech Solution.



Obr. 9.2. Ashtech Download

## 10 Štandardné výmenné formáty pre údaje GPS

Široké spektrum prijímačov a softvérov GPS je charakteristické tým, že formát, v akom sú zapisované a ukladané odmerané údaje, sa pre jednotlivých výrobcov (a niekedy aj pre jednotlivé prijímače toho istého výrobcu) vzájomne odlišuje. Obvykle pritom ide o binárne súbory, ktoré nemožno čítať a editovať bez špeciálnych programov. Na spracovanie meraní rozličných prijímačov bol preto definovaný špeciálny textový výmenný formát, nezávislý od typu prijímača RINEX (Receiver INdependent EXchange formát) [9]. V súčasnosti sa využíva pre nasledovné súbory údajov:

- súbor meraní GPS a GLONASS,
- súbor navigačnej správy GPS,
- súbor meteorologických údajov,
- súbor navigačnej správy GLONASS,
- súbor navigačnej správy geostacionárnych družíc,
- súbor údajov hodín družíc a prijímačov.

Každý súbor sa skladá z dvoch častí - hlavičky a časti, ktorá obsahuje odmerané údaje. Dĺžka súboru je premenlivá a zodpovedá objemu údajov. Formát RINEX dovoľuje kombinovať viaceré typy družicových meraní (napr. GPS a GLONASS) získané rozličnými prijímačmi. V súčasnosti je RINEX všeobecne prijatým štandardom pre archiváciu a výmenu údajov GPS. Možnosť vstupu údajov vo formáte RINEX má väčšina firemných aj akademických softvérov. Okrem uvedeného formátu vstupných údajov RINEX bol definovaný formát SINEX (Solution INdependent EXchange formát) [10] pre jednotné vyjadrenie výsledkov riešenia siete GPS.

### 10.1 Formát RINEX pre súbor meraní GPS nezávislý od typu prijímača

Príklad záznamu meraní GPS vyjadrených vo formáte RINEX je v tab. 10.1. Úplný opis všetkých možností a položiek vo formáte RINEX sa uvádza v [9]. Tu sa zameriame len na základné informácie. V tab. 10.1 je uvedená hlavička formátu RINEX a príklad záznamu piatich epoch nameraných hodnôt.

Hlavička súboru:

- Verzia a typ programu na generovanie formátu RINEX (G - pre údaje GPS, R - pre GLONASS, S - pre geostacionárne družice).
- Názov programu, inštitúcia, ktorá vytvorila záznam a dátum.
- Riadky označené ako COMMENT obsahujú doplňujúce údaje, pri spracovaní sa neuvažujú.
- Názov bodu (referenčnej značky).
- Číslo bodu.
- Operátor prijímača a pracovisko.
- Výrobné číslo a typ prijímača, verzia softvéru.
- Výrobné číslo a typ antény GPS.
- Približné karteziánske súradnice antény v systéme WGS 84.
- Výška antény a excentricita antény relatívne k referenčnej značke geodetického bodu vyjadrené v horizontálnych súradniciach.
- Faktor vlnovej dĺžky pre frekvencie L1 a L2 potrebný na riešenie ambiguit: 0 – jedno-frekvenčný prijímač, 1 - celé cykly, 2 - polovičné cykly (získané kvadrátovaním).



- Typ meraní: L1 a L2 - fázové merania na L1 a L2, C1 - pseudovzdialenosti na L1 z merania C/A-kódu, P1 a P2 - pseudovzdialenosti na L1 a L2 z merania P-kódu. Jednotky pre fázové merania sú celé cykly, jednotky pre pseudovzdialenosti sú metre.
- Interval meraní v sekundách.
- Okamih prvého merania v časovom systéme GPS (rok, mesiac, deň, hodina, minúta, sekunda)

Okrem uvedených riadkov môže hlavička obsahovať aj ďalšie informácie o pozorovaných družiciach a parametroch súvisiacich s časom.

Odmerané údaje:

- Epocha merania (rok, mesiac, deň, hodina, minúta, sekunda), merané družice (počet a označenie číslom PRN), pomocné údaje.
- Merania jednotlivých družíc v danej epoche a identifikátory sklzu počítania cyklov, kvality príjmu signálu a merania v režime Antispoofing. Tento riadok je samostatný pre každú družicu.

Blok odmeraných údajov sa opakuje pre každú ďalšiu epochu merania. Názov súboru nameraných údajov vo formáte RINEX sa označuje ako ssssdddf.yyo, kde

- ssss - názov bodu,
- ddd - deň GPS,
- f - poradové číslo merania na bode ssss v deň ddd,
- yy - dvojčísle označujúce rok merania.
- o - zvyrazňuje, že ide o súbor meraných hodnôt (observations)

Súčasťou softvéru na transformáciu do formátu RINEX bývajú procedúry na editovanie, spájanie a rozdeľovanie súborov meraní GPS. Pre úplnosť ešte uvedieme, že kvôli úspore miesta na pamäťových médiách sa využíva komprimácia meraní v súbore RINEX do formátu Hatanaku. Súbory označené ako ssssdddf.yyd zaberajú v pamäti len asi 20% pôvodného miesta.

Tab. 10.1 Pozorovania družíc GPS uvedené vo formáte RINEX

OBSERVATION DATA		G (GPS)		RINEX VERSION / TYPE	
2	ASHTORIN	01	- JUN - 05 07:09	PGM / RUN BY / DATE	COMMENT
????				MARKER NAME	MARKER NUMBER
	ProMark	110115	Unknown	OBSERVER / AGENCY	REC # / TYPE / VERS
				ANT # / TYPE	APPROX POSITION XYZ
	0.0000	0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N	WAVELENGTH FACT L1/2
	0.0000	0.0000	0.0000	# / TYPES OF OBSERV	INTERVAL
1	0			LEAP SECONDS	TIME OF FIRST OBS
3	L1 C1 D1			TIME OF LAST OBS	END OF HEADER
15.0000					
2005	5 30 13 0	15.0000000	GPS		
2005	5 30 17 0	30.0000000	GPS		
05	5 30 13 0	15.0000000 0	6G02G23G13G20G24G04	0.000000000	
	5974365.738 1	23264500.137	2733.998		
	13491518.600 3	20350413.179	-1158.229		
	19225453.354 4	20353054.644	898.098		
	12253789.202 1	22011778.720	-2732.024		
	14393040.266 1	21880459.793	-2549.422		
	20365611.999 3	21301401.908	-151.299		
05	5 30 13 0	30.0000000 0	6G02G23G13G20G24G04	0.000000000	
	5932969.853 1	23256629.745	2754.281		

```

13508499.937 4 20353632.094 -1137.162
19211594.102 4 20350409.769 918.632
12294366.221 1 22019495.211 -2709.459
14430892.817 2 21887654.770 -2528.765
20367515.966 3 21301771.936 -133.700
05 5 30 13 0 45.0000000 0 6G02G23G13G20G24G04 0.000000000
5891766.066 1 23248784.557 2693.308
13525660.145 3 20356906.003 -1197.134
19197921.745 4 20347802.687 858.120
12335099.037 1 22027243.737 -2767.900
14468929.195 1 21894901.251 -2589.021
20369651.586 4 21302174.467 -197.221

```

## 10.2 Formát RINEX pre navigačnú správu

Príklad súboru s časťou navigačnej správy je v tab. 10.2. Do jedného súboru možno transformovať aj viacej prijatých navigačných správ. Význam symbolov použitých pre jednotlivé parametre definujúce dráhu družice a jej polohu sme uviedli v stati 2.2.2.

Hlavička súboru:

- Verzia a typ programu na generovanie formátu RINEX.
- Názov programu, inštitúcia, ktorá vytvorila záznam a dátum.
- Riadky označené ako COMMENT obsahujú doplňujúce údaje.
- Parametre stavu ionosféry  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ .
- Parametre stavu ionosféry  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ .
- Parametre pre výpočet UTC pre potreby almanachu, číslo týždňa GPS.
- Rozdiel GPST-UTC .

Údaje pre jednotlivé družice:

- Číslo družice, epocha (rok, mesiac, deň, hod, min, sec), koeficienty polynómu pre korekciu hodín družice  $a_{f0}, a_{f1}, a_{f2}$
- Poradové číslo aktuálnej verzie efemeríd IODE, korekčný člen  $C_{rs}$ , lineárna zmena stredného pohybu  $\Delta n$  v závislosti od času, stredná anomália  $M_0$  .
- Korekčný člen  $C_{uc}$ , excentricita  $e$ , korekčný člen  $C_{us}$ , odmocnina hlavnej polosi  $\sqrt{a}$
- Referenčný okamih pre efemeridy  $t_{oe}$ , korekčný člen  $C_{ic}$ , uhlová odľahlosť výstupného uzla  $\Omega_o$ , korekčný člen  $C_{is}$ .
- Sklon roviny dráhy  $i_o$ , korekčný člen  $C_{rc}$ , argument perigea  $\omega_o$ , zmena uhlovej odľahlosti výstupného uzla  $\Omega$  v závislosti od času.
- Presnosť určenia vzdialenosti k družici URE, stav družice, korekcia vplyvu ionosféry  $T_{GD}$ , okamih vytvorenia časti správy o korekcii hodín družice IODC.
- Okamih vyslania navigačnej správy, voľné pozície pre ďalšie použitie.

Všetky uvedené hodnoty vychádzajú z vysielaných efemeríd. Rozdiel je v použitých jednotkách. Údaje o čase sú uvedené v sekundách v rámci týždňa GPS, koeficienty pre lineárne a kvadratické členy sú v jednotkách s/s, resp. s/s<sup>2</sup>. Dĺžkové veličiny sú v metroch a uhlové veličiny v radiánoch, ich zmeny v rad/s. Označenie súboru s navigačnou správou vychádza z označenia súboru meraní, ale má koncový znak n, t.j. ssssdfff.yyn.

Tab. 10.2 Navigačná správa vo formáte RINEX

```

2 NAVIGATION DATA RINEX VERSION / TYPE
ASHTORIN 01 - JUN - 05 07:09 PGM / RUN BY / DATE
COMMENT
END OF HEADER
4 05 5 30 13 59 44.0 .187761615962D-03 -.2444267011101D-10 .000000000000D+00
.720000000000D+02 .706250000000D+01 .498520695634D-08 .268172785170D+01
.350177288055D-06 .698534189720D-02 .674463808537D-05 .515362771793D+04

```

```

.136784000000D+06 -.180676579475D-06 .560781728820D+00 .651925802231D-07
.954671324480D+00 .248343750000D+03 .477897271370D-01 -.818498379457D-08
-.308584260546D-09 .000000000000D+00 .132500000000D+04 .000000000000D+00
.000000000000D+00 .000000000000D+00 .000000000000D+00 .720000000000D+02
.133245000000D+06 .000000000000D+00 .000000000000D+00 .000000000000D+00
24 05 5 30 14 0 0.0 .207466073334D-04 .284217094304D-11 .000000000000D+00
.196000000000D+03 .103750000000D+02 .473305429357D-08 -.175705956830D+01
.678002834320D-06 .873388664330D-02 .657141208649D-05 .515363683131D+04
.136800000000D+06 -.184401869774D-06 .591019290230D+00 .219792127609D-06
.964939928300D+00 .257375000000D+03 -.115318003879D+01 -.813890974929D-08
-.323227749447D-09 .000000000000D+00 .132500000000D+04 .000000000000D+00
.100000000000D+01 .000000000000D+00 .000000000000D+00 .452000000000D+03
.133305000000D+06 .000000000000D+00 .000000000000D+00 .000000000000D+00

```

### 10.3 Štandardný formát výsledkov riešenia siete GPS (SINEX)

Formát SINEX pre riešenia sietí GPS bol formulovaný s cieľom umožniť kombináciu výsledkov získaných rozličnými softvérmi. Vzhľadom na to, že obsahuje výsledný vektor odhadnutých parametrov, maticu kofaktorov a odhad štandardnej odchýlky s jednotkovou váhou, dovoľuje štatisticky korektné spájanie geodetických sietí, vkladanie nových meraní do existujúcich sietí, výpočty zmien polôh bodov z meraní v rozličných epochách a ďalšie operácie s výsledkami riešení bez nutnosti spracovávať všetky merania v jednom procese. Ide pritom o významné zefektívnenie procesu spracovania meraní bez straty informácií. Ďalšou dôležitou vlastnosťou formátu SINEX je jeho univerzálnosť. Okrem GPS umožňuje vyjadriť aj výsledky iných kozmických geodetických metód, napr. SLR, VLBI a DORIS.

Štruktúra a obsah formátu SINEX sú veľmi komplexné, možno sa s nimi oboznámiť napr. v [11]. My sa obmedzíme len na základné informácie. SINEX je alfanumerický súbor ASCII s max. 80 znakmi v riadku. Skladá sa z viacerých blokov premenlivej dĺžky, formát ich začiatkov a koncov je však jednoznačne definovaný a nemôže nastať zámena ich významu. Niektoré bloky pritom môžu mať rozsah aj niekoľko 10000 riadkov (napr. matica kofaktorov). Povinné bloky sú označené (P), nepovinné (N).

Bloky formátu SINEX:

- Hlavička s identifikáciou súboru SINEX, verziou formátu, kódom použitých techník, počtom parametrov a typom výsledkov, napr. súradnice, rýchlosti, dráhy družíc, troposférické parametre a i. (P).
- Základné informácie o súbore - organizácia, ktorá spracovala merania, použitý softvér a hardvér, všeobecné informácie o použitých meraniach (N).
- Komentáre k súboru SINEX, špecifické informácie, odkazy pre ďalších používateľov (N).
- Podrobnejšie informácie o procese vzniku záznamu - začiatok a koniec intervalu meraní použitých pri odhade parametrov, ďalšie informácie doplnujúce údaje v hlavičke súboru (N).
- Názvy organizácií, ktoré sa podieľali na tvorbe údajov obsiahnutých v súbore SINEX (N).
- Základné informácie o zúčastnených bodoch, jednoznačná identifikácia bodov, metóda merania, približné súradnice (P).
- Podrobnejšie údaje o bodoch, relácie medzi vstupnými hodnotami a údajmi v zázname SINEX (N).
- Údaje o prijímačoch GPS na jednotlivých bodoch (N).
- Údaje o anténach GPS na jednotlivých bodoch (N).
- Polohy fázových centier antén GPS v horizontálnom lokálnom systéme, hodnoty pre L1 a L2 (N).

- Excentricity pre polohu antény vzhľadom k referenčnej značke, typ súradnicového systému použitého na vyjadrenie excentricít, časové údaje o začiatku a konci merania na excentrickom stanovišti (N).
- Epoque riešenia pre každý bod, začiatok a koniec meraní na bode, typ riešenia (na báze kódov alebo fáz) (P).
- Štatistické informácie o riešení - počet meraní, počet parametrov, interval meraní GPS, reziduálny súčet štvorcov ( $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}$ ) štandardné odchýlky s jednotkovou váhou pre kódové a fázové merania, počet stupňov voľnosti (P).
- Odhadnuté parametre - pre každý parameter jeho typ, názov bodu, identifikátor bodu, epocha, jednotky parametra, apriórne zadaná presnosť parametra, odhad parametra a jeho štandardná odchýlka (P).
- Apriórne (približné) hodnoty parametrov, apriórne štandardné odchýlky parametrov, epocha, ku ktorej sa vzťahujú apriórne hodnoty (N).
- Odhad kovariančnej matice (matice korelačných koeficientov alebo informačnej matice), prvky matice - indexy prvku a príslušná hodnota prvku matice. Zobrazuje sa len trojuholníková matica (vzhľadom na symetriu kovariančnej matice), nulové prvky môžu byť vynechané. Používajú sa rovnaké jednotky ako v bloku s odhadmi parametrov (P).
- Kovariančná matica v prípade apriórne zadaných parametrov presnosti (N).
- Ukončenie súboru SINEX (P).

## Literatúra

- [1] Seeber, G. Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1993.
- [2] Hofmann-Wellenhof a kol. Global Positioning System, Theory and Practice. Wien, New York: Springer-Verlag, 2001.
- [3] Fukushima, T. Fast transform from geocentric to geodetic coordinates. Journal of Geodesy 73, 1999.
- [4] Kuska, F. Vyššia geodézia. Bratislava: VEDA, 1974.
- [5] Vykutíl, J. Vyšší geodesie. Praha: Kartografie, 1982.
- [6] Mojzeš, M., Janák, J. Gravimetric Model of Slovak Quasigeoid. Proceedings of the Second Continental Workshop on the Geoid in Europe. Report of the Finnish Geodetic Institute 98/4, Maasala 1998.
- [7] Hefty, J. – Mojzeš, M. Problematika výšok v Slovenskej geodynamickej referenčnej sieti. Sborník referárú: GPS a výšky. Brno. VUT, Ústav geodezie 1999.
- [8] Hefty, J. - Galgonová, R. Využitie meteorologických údajov pri určovaní výšok pomocou GPS vo vysokých horách. Prednesené na seminári „Tatranské štíty – geodézia vo vysokohorskom prostredí“. Podbanské, 1999.
- [9] Gurtner, W. RINEX. The Receiver-Independent Exchange Format. GPS World, Volume 5, Number 7, 1994.
- [10] Blewitt, G. a kol., Constraining the IGS polyhedron by distributed processing. Proceedings of workshop: Densification of ITRF through regional GPS networks. Pasadena, JPL, 1994.
- [11] International GPS service. IGS Information and Resources, Pasadena, IGS central Bureau, 2001.
- [12] Hefty, J. – Husár, L. Družicová geodézia, STU Bratislava, 2003.

### Internetové zdroje:

<ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps>  
<http://www.estec.esa.nl>  
<http://www.esa.int>  
<http://www.rssi.ru>  
<http://www.astronautic.com>  
<http://www.gps-applications.com>  
<http://www.gps.faa.gov>  
<http://www.ashtech.com>