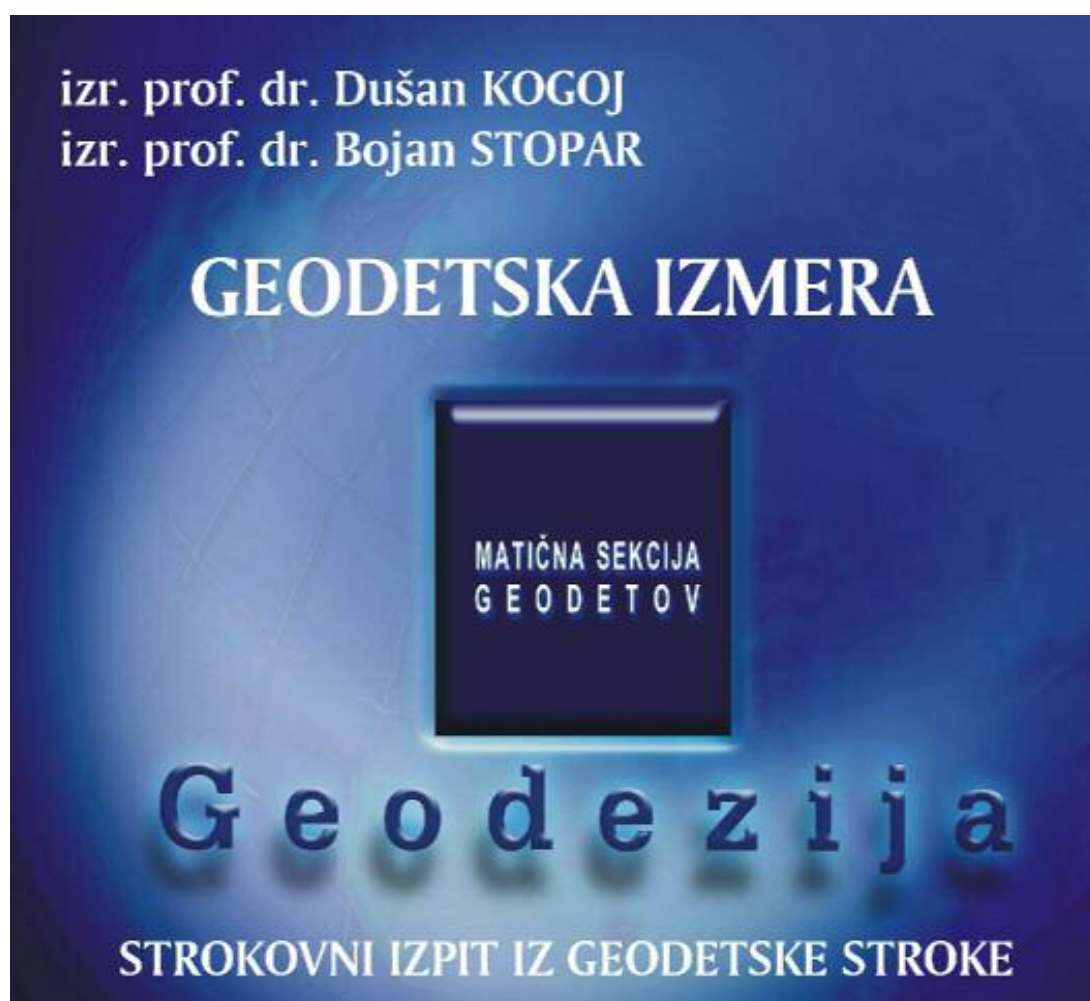


<b>Projekt:</b>	<b>Programska zasnova in priprava gradiv za izvedbo strokovnega dela izpita iz geodetske stroke</b>
<b>Naročnik:</b>	<b>Inženirska zbornica Slovenije, Matična sekcija geodetov</b> Dunajska 104, Ljubljana Odgovorna oseba: Matjaž Grilc, predsednik upravnega odbora
<b>Izvajalca:</b>	Geodetski inštitut Slovenije (GI) Jamova cesta 2, Ljubljana Odgovorna oseba: mag. Roman Rener, v.d. direktorja  Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (FGG), Oddelek za geodezijo Jamova cesta 2, Ljubljana Odgovorna oseba: prof. dr. Jurij Banovec, dekan

**GEODETSKA  
IZMERA**MATERIALI  
ZA  
PRIPRAVO  
NA  
STROKOVNI  
IZPIT  
IZ  
GEODETSKE  
STROKE

izr. prof. dr. Dušan KOGOJ  
izr. prof. dr. Bojan STOPAR

# GEODETSKA IZMERA

## Kazalo

1 UVOD.....	4
2 PROJEKTIRANJE GEODETSKIH MREŽ.....	4
3 KLASIČNE TERESTRIČNE METODE IZMERE.....	6
3.1 Izmera horizontalnih kotov.....	6
3.1.1 TEODOLIT PRI MERJENJU HORIZONTALNIH KOTOV.....	6
3.1.2 METODE MERJENJA HORIZONT. KOTOV, POGREŠKI, NATANČNOST MERITEV.....	7
3.1.3 OBDELAVA PODATKOV MERITEV HORIZONTALNIH KOTOV.....	8
3.2 Trigonometrično višino­merstvo.....	8
3.2.1 TEODOLIT PRI MERJENJU ZENITNIH RAZDALJ.....	8
3.2.2 METODE MERITEV ZENITNIH RAZD., POGREŠKI, OCENA NATANČNOSTI MERITEV.....	9
3.2.3 OBDELAVA PODATKOV MERITEV ZENITNIH RAZDALJ.....	10
3.3 Geometrični nivelman.....	10
3.3.1 NIVELIRJI.....	11
3.3.2 METODE MERITEV NIVELMANA, POGREŠKI, OCENA NATANČNOSTI MERITEV.....	11
3.3.3 OBDELAVA PODATKOV MERITEV NIVELMANA.....	12
3.4 Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljemerji.....	12
3.4.1 ELEKTRONSKI RAZDALJEMERI.....	13
3.4.2 POGREŠKI PRI MERJENJU DOLŽIN IN NATANČNOST ELEKTRONSKIH RAZDALJ.....	13
3.4.3 KALIBRIRANJE ELEKTRONSKIH RAZDALJEMEROV.....	14
3.4.4 OBDELAVA PODATKOV MERITEV DOLŽIN.....	15
4 GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS).....	16
4.1 Splošno o GPS.....	17
4.2 Zgradba GPS.....	18
4.2.1 GPS SIGNAL.....	18
4.2.2 GPS SPREJEMNIK.....	19
4.3 Tipi opazovanj v GPS.....	19

4.3.1 KODNA OPAZOVANJA.....	20
4.3.2 FAZNA OPAZOVANJA.....	19
4.4 Vplivi na GPS opazovanja.....	20
4.5 Metode geodetske GPS izmere.....	21
4.5.1 STATIČNA GPS IZMERA.....	22
4.5.2 HITRA STATIČNA METODA GPS IZMERE.....	22
4.5.3 KINEMATIČNA METODA GPS IZMERE.....	22
4.5.4 RTK-GPS METODA IZMERE.....	22
4.5 Obdelava GPS opazovanj.....	23
<b>5 IZRAVNAVA IN ANALIZA OPAZOVANJ V GEODETSKI MREŽI.....</b>	<b>24</b>
5.1 Predhodna ocena opazovanj.....	25
5.2 Ocenjevanje rezultatov izravnave.....	25
5.2.1 ODKRIVANJE GROBIH POGREŠKOV.....	25
5.2.2 GLOBALNI TEST MODELA IN PREGLED OPAZOVANJ.....	25
5.2.3 ODKRIVANJE POPRAVKOV VERJETNO GROBO POGREŠENIH OPAZOVANJ.....	26
5.2.4 TAU TEST.....	26
5.3 Merila kakovosti geodetske mreže.....	26
5.4 Merila natančnosti geodetske mreže.....	27
5.4.1 GLOBALNA MERILA NATANČNOSTI GEODETSKE MREŽE.....	27
5.4.2 LOKALNA MERILA NATANČNOSTI GEODETSKE MREŽE.....	28
5.5 Zanesljivost geodetske mreže.....	29
<b>6 TRANSFORMACIJE KOORDINATNIH SISTEMOV.....</b>	<b>29</b>
6.1 Metode transformacij koordinatnih sistemov.....	30
6.2 Matematični model podobnostne transformacije.....	31
6.3 Izravnava transformacije.....	32
<b>7 DETAJLNA GEODETSKA IZMERA.....</b>	<b>33</b>
7.1 Splošno o izmeri detajla.....	33
7.2 Metode klasične terestrične detajlne izmere.....	35
7.3 Uporaba GPS tehnologije v detajlni geodetski izmeri.....	36
7.3.1 NATANČNOST GPS METOD IZMERE.....	38
7.3.2 DETAJLNA GPS IZMERA.....	38
7.3.3 PROSTO DOLOČANJE POLOŽAJA.....	39
7.3.4 PRIHODNOST GPS IZMERE V ZEMLJIŠKEM KATASTRU.....	39
7.4 Kombiniranje GPS in terestričnih metod izmere.....	40
<b>8 LITERATURA.....</b>	<b>41</b>
<b>9 VPRAŠANJA.....</b>	<b>41</b>

## 1. UVOD

Poglavitni namen geodetske izmere je izdelava topografskih in katastrskih načrtov in kart. Podlaga za opravljanje teh nalog je mreža geodetskih točk, določenih v izbranem koordinatnem sistemu. V geodeziji običajno ločeno obravnavamo horizontalno in višinsko mrežo, sodobne metode pa zagotavljajo direktno prostorsko določitev položaja točke. Mreža geodetskih točk je razvita po vsej državi. Geodeti določamo koordinate geodetskih točk z natančnimi instrumenti za merjenje kotov, dolžin, višinskih razlik ter z inštrumenti in metodami satelitske geodezije. Z metodami izmere in izračuna (triangulacijo, trilateracijo, trigonometričnim višinomerstvom, nivelmanom in satelitsko geodezijo) določamo medsebojni položaj teh točk v prostoru. Mreža geodetskih točk nam omogoča, da lahko kjerkoli dokaj hitro določimo položaj katerega koli objekta na zemeljskem površju in tudi pod njim. Točke v geodetski mreži so osnova za nadaljnje meritve, za izdelavo topografskih načrtov in katastrsko izmero, s katero določamo stanje parcel in objektov, pa tudi za izdelavo kart in načrtov v najrazličnejših merilih.

## 2. PROJEKTIRANJE GEODETSKIH MREŽ

Projektiranje geodetskih mrež je ena najpomembnejših faz vzpostavljanja geodetskih mrež. Dober projekt je predpogoj za izpolnitev zahtev investitorja glede kakovosti oblike geodetske mreže in natančnosti končnih rezultatov ter zagotavlja izvedbo del z optimalnimi stroški. Način projektiranja in vsebina projekta formalno nista predpisana z zakonskimi akti. Posamezne faze projektiranja se lahko zelo razlikujejo glede na vrsto mreže ter predvideno metodo izmere. Od tega je odvisna tudi končna vsebina projekta.

**Vhodni podatki** za projektiranje mreže so *vrsta mreže, velikost mreže, gostota točk mreže ter zahtevana natančnost določitve koordinat točk mreže* skupaj z obstoječo vrsto in obliko naravnega terena z zgrajenimi objekti ali oblika in značilnosti opazovanega objekta (deformacije) oz. projektiranega objekta (zakoličba). Za zagotovitev uspešnosti opravljenega dela so za razvijanje geodetskih mrež definirana **pravila**, katerih cilj je predvsem zagotoviti primerno obliko in trajnost mreže.

**Vrste in oblike mrež ter metode izmere:**

- trigonometrična mreža - triangulacija, trilateracija, poligonska mreža (način stabilizacije točk, navezava glede na red mreže, zagotovitev idealnih presekov, enakomerna oddaljenost med točkami, vrsta in število smeri, način zagotavljanja vidnosti (ekscentri), metoda merjenja smeri in število ponovitev, način merjenja dolžin, vklapljanje obstoječih točk, orientacijske točke, ...);
- trigonometrična mreža, poligonska mreža - trigonometrično višinomerstvo (način stabilizacije točk, navezava glede na red mreže, zagotovitev višinskih vozišč, maksimalna in enakomerna oddaljenost med točkami, način zagotavljanja vidnosti (ekscentri), metoda merjenja zenitnih razdalj in število ponovitev, vklapljanje obstoječih točk trigonometrične in nivelmanske mreže, ...);
- nivelmanska mreža – geometrični nivelman (način stabilizacije točk, navezava višinske mreže, način in oblika razvijanja mreže, dolžina vlakov in zank, oddaljenost med reperji, potek nivelmanskih vlakov, dolžine vlakov, niveliranje v ekstremnih pogojih (prenos višine, strmi vzponi in spusti, nestabilen teren, vklapljanje obstoječih reperjev, ...);
- GPS (čas meritev - vidnost in razporeditev satelitov, izločitev odboja signala, način navezave na obstoječo terestrično mrežo, metoda izmere, število sprejemnikov,

število serij, dane in nove točke in dostopnost točk, razmerje dolžin in vektorjev, ...).

Vsebina projekta mreže mora ne glede na vrsto mreže in metodo izmere vsebovati nekatere nujne sestavine. Izbira je prepuščena projektantu.

V projektu je potrebno navesti:

1. **Opis zastavljene naloge** z osnovnimi podatki o vrsti in velikosti mreže, gostoti točk ter zahtevani natančnosti določitve koordinat točk mreže skupaj z opisom območja razvijanja mreže ali opazovanega oz. projektiranega objekta.
2. **Skico mreže** na topografski podlagi ali na načrtu objekta oz. projekta v primernem merilu, z vrisanimi danimi in novimi oz. opazovalnimi in detajlnimi točkami in medsebojnimi povezavami v primernem merilu. Na ta način je definirana **oblika mreže** – (modelna matrika) **B**.
3. **Opis vrste in načina stabilizacije točk mreže**, ki poleg pisnega dela vrste vsebuje tudi skice stabilizacij točk ter opis postopka postavitve točk. V nekaterih primerih je vrsta stabilizacije posebej predpisana.
4. **Opis inštrumentarija in pribora**, ki bo uporabljen pri meritvah. Kratek opis vsebuje tudi osnovne tehnične podatke o inštrumentih (predvsem natančnost) in priboru (npr. način postavitve na točke - centriranje, vrsta signalizacije točk ...).
5. **Opis uporabljenih metode izmere**, ki vsebuje kratek opis načina meritev (girusna metoda, dvostranske meritve, značilnosti generalnega nivelmana, GPS ..., število ponovitev, predvideni dnevni čas meritev ...).
6. **Opis načina izračuna iskanih vrednosti**, ki vsebuje kratek opis postopka izravnave (vrsto mreže, način izravnave, datum mreže, koordinatni sistem ...).
7. **A priori oceno natančnosti meritev**, ki je pogoj za oceno določitve natančnosti iskanih količin. Natančnost merjenih količin je mogoče oceniti po zakonu o prenosu varianc in kovarianc na osnovi oblike in dimenzij mreže, natančnosti uporabljenega inštrumentarija ter uporabljenih metode meritev in izkušenj opazovalca. Ocena je lahko subjektivna ali objektivna, rezultat so standardne deviacije  $\sigma_{ij}$  merjenih količin. Vrednosti so osnova za izračun uteži meritev – matrike uteži **P** ter matrike **B**.
8. **A priori oceno natančnosti iskanih količin** na osnovi elementov variančno kovariančne matrike neznanek: vhodni podatki so modelna matrika **B** in matrika uteži **P**. Referenčna standardna deviacija  $\sigma_0$  je enaka 1. Kovariančna matrika bo  $\Sigma_{\Delta\Delta} = \sigma_0^2 (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1}$ . Elementi kovariančne matrike  $\Sigma_{\Delta\Delta}$  definirajo natančnost položaja točk v smeri koordinatnih osi in so osnova za izračun elementov elips ali elipsoidov pogreškov glede na izbrani datum mreže.  
A priori ocena je mogoča tudi z izravnavo simuliranih opazovanj. Postopek zahteva ustrezno programsko opremo, končni rezultat pa je praktično isti.  
Na osnovi dobljenih vrednosti predhodne izravnave je mogoče mrežo optimizirati (sprememba oblike mreže ali natančnosti meritev).
9. **Opis poteka terenskih meritev**, ki opisuje postopek terenskih meritev in ga terminsko opredeljuje. Navaja se tudi število terenski ekip oz. izvajalcev meritev.
10. **Finančno ovrednotenje projekta**, ki vsebuje izračun stroškov izvedbe projekta v celoti in po delih.

Projekt naj bo izdelan tako, da je mogoča njegova 100% realizacija. Zato projektiranje geodetskih mrež zahteva tudi nujen predhodni ogled terena (rekognosciranje terena), kar pomeni odkrivanje točk že obstoječe mreže ter določitev mikro lokacij novih točk (pri izboru je potrebno upoštevati dodatna pravila, ki zagotavljajo varnost točke pred uničenjem, lokalno stabilnost točke in možnost realizacije povezav točk v mrežo). Rezultat ogleda je tudi odločitev o izbiri načina stabilizacije in signalizacije točk ter odločitev o postopku zagotovitve pogojev za merjenje.

Detajlna izmera sloni na geodetski mreži, ki predstavlja geometrično osnovo izmere. Položaj točk mreže mora poleg zagotavljanja primerne oblike mreže zagotoviti tudi možnost snemanja detajla. Točke so stabilizirane na mestih, kjer je vidnost detajlnih točk optimalna. To velja predvsem za klasično numerično izmero. Zahteve za GPS izmero so nekoliko specifične. Potrebno je zagotoviti sprejem signalov satelitov na detajlnih točkah. Natančnost določitve položaja točk geometrične osnove se direktno odraža v natančnosti detajlne izmere.

### 3. KLASIČNE TERESTRIČNE METODE IZMERE

Pod pojmom *klasična terestrična izmera* razumemo izmero (mreže in tudi detajlov – detajlna izmera) z uporabo klasičnih »zemeljskih« metod izmere, h katerim štejemo *triangulacijo, trilateracijo, trigonometrično višinomerstvo* in *geometrični nivelman*. Metode omogočajo razvijanje geodetskih mrež, v katerih povezujemo geodetske točke s terestričnimi geodetskimi meritvami in sicer z merjenjem *horizontalnih kotov, dolžin, zenitnih razdalj* in *višinskih razlik* z uporabo klasičnih geodetskih instrumentov - teodolitov, elektronskih razdaljemerov in nivelirjev.

#### 3.1 Izmera horizontalnih kotov

Horizontalne kote danes merimo predvsem v lokalnih geodetskih trigonometričnih mrežah, kjer se zahteva velika natančnost meritev. Velikokrat le-te kombiniramo z dolžinskimi meritvami, s tem odpravimo eventualne slabosti oblike mreže. Kotne meritve so nujne pri mrežah, ki jih sestavljajo tudi takoimenovane nedostopne točke (točke na pregradah, 3D industrijski merski sistemi ...), v poligonski mreži, pri polarni detajlni topografski ali katastrski izmeri ter v številnih primerih inženirske geodezije pri opazovanju premikov tal in objektov in gradnji objektov (zakoličbe). Horizontalne kote merimo tudi pri nekaterih nalogah klasične geodetske astronomije.

##### 3.1.1 TEODOLIT PRI MERJENJU HORIZONTALNIH KOTOV

Za merjenje horizontalnih kotov danes uporabljamo praktično le še elektronske teodolite, ki so najpogosteje kombinirani z elektronskimi razdaljemerji. Govorimo o *elektronskih tahimetrih*. Elektronski teodolit je optično mehanični in elektronski instrument za merjenje horizontalnih in vertikalnih kotov (zenitnih razdalj).

Osnova je klasični optični teodolit z elektronskimi dodatki in izboljšavami, kot so

- elektronski način določanja odčitkov na krogih,
- elektronski dodatek kompenzatorju (postavitev indeksa, korekcija nagiba stojliščne osi ...),
- digitalni zapis merskih vrednosti (shranjevanje, prenos),
- notranji procesor (elektronsko justiranje, preračun merskih vrednosti, pretvorba v grafično obliko),
- drugi dodatki, kot so lasersko grezilo ali stopenjski motorji, CCD kamera in sistem za avtomatsko viziranje (ATR), idr.

Kljub navidezni popolnosti se pri elektronskih teodolitih prav tako pojavljajo inštrumentalni pogoški, ki omejujejo natančnost meritev. Nujen je nadzor nad

pravilnim delovanjem inštrumenta. Ob njihovih ekstremnih vrednostih je vpliv na mersko vrednost lahko kritičen.

**Najpogosteje pri merjenju horizontalnih kotov omenjamo tri inštrumentalne pogoške:**

- Kolimacijski pogošek:** (nepravokotnost Y- in X-osi –  $c$ )  $\Delta_c = c/\sin z$ . Velikost  $c$  določimo na osnovi razlike odčitkov smeri proti izbrani točki pri horizontalni vizuri v obeh krožnih legah. Pogošek se eliminira z merjenjem v obeh krožnih legah (girusna metoda).
- Pogošek horizontalnosti Y osi:** (nepravokotnost Y- in Z-osi -  $i$ )  $\Delta_i = i \cdot \cot z$ . Velikost pogoška ugotovimo klasično s spuščanjem vizure v obeh krožnih legah, pri elektronskih teodolitih pa opazujemo v obeh krožnih legah smer proti izbrani točki pri strmi vizuri ( $z \approx 45^\circ$ ). Pogošek se eliminira z merjenjem v obeh krožnih legah.
- Pogošek alhidadnih libel (kompensatorja):** (nepravokotnost Z- in L-osi)  $\Delta_a = \delta \cdot \cot z \cdot \sin \theta$ . Velikost pogoška zmanjšamo z justiranjem alhidadnih libel in delovanja kompensatorja. Elektronski kompensator zagotavlja korekcijo merskih vrednosti na osnovi ugotovljenega nagiba v mejah njegove natančnosti. Pogoška ni mogoče eliminirati z merjenjem v obeh krožnih legah. Velja, da pogošek alhidadnih libel najbolj vpliva na natančnost merjenja horizontalnih kotov.

Nadzor oz. kontrola inštrumentalnih pogoškov je mogoča s periodičnim preizkusom inštrumenta. Za teodolit v normalni situaciji (brez nepredvidenih dogodkov) zadostuje letni preizkus. S preizkusi določimo vrednosti pogoškov, z elektronskim justiranjem pa inštrumentu »ukazemo«, da na osnovi teh vrednosti korigira merske vrednosti. Druga možnost sprotne kontrole inštrumentalnih pogoškov je uporaba primerne metode meritev. Iz rezultatov meritev je mogoče sklepati na velikost pogoškov, metode pa tudi omogočajo sočasno eliminacijo večine teh.

Natančnost teodolitov pri merjenju horizontalnih kotov je eden glavnih tehničnih podatkov inštrumenta. Pri podajanju natančnosti se proizvajalci najpogosteje sklicujejo na standardizirana postopka preizkusa inštrumenta *DIN 18723-3* ali *ISO 8322-4*. Vrednosti  $s_{DIN 18723-THEO-Hz}$  in  $s_{ISO}$  sta ocenjeni iz rezultatov meritev po girusni metodi (*DIN 60* meritev, *ISO 32* meritev) in opisujeta standardni odklon horizontalne smeri, opazovane enkrat v obeh krožnih legah.

### 3.1.2 METODE MERJENJA HORIZONTALNIH KOTOV, POGREŠKI, NATANČNOST MERITEV

Znane so številne **metode merjenja horizontalnih kotov**. Izbira je odvisna predvsem od namena meritev in zahtevane natančnosti. Z izjemo polarne detajlne izmere in primerov meritev geodetske astronomije je z namenom eliminiranja inštrumentalnih pogoškov in povečanja natančnosti meritev horizontalne kote potrebno meriti v dveh krožnih legah. Osnova vsem danes uporabljenim metodam je *girusna metoda*: merjenje več kotov z istim temenom istočasno v obeh krožnih legah v pravilnem zaporedju z zamikom limba s sprotno kontrolo merskih vrednosti. Rezultat meritev so reducirane smeri, ki so med seboj mersko odvisne vrednosti, obremenjene s pogoškom začetne smeri. Ena najbolj natančnih metod, ki jo še danes uporabljamo, je Schreiberjeva metoda – metoda merjenja vseh kombinacij kotov med smermi  $s$  na posameznem stojišču, kjer vsak kot med dvema smerema merimo ločeno po girusni metodi. Rezultat meritev je  $s \cdot (s-1)/2$  merjenih kotov, ki so mersko neodvisni.

Poleg inštrumentalnih pogoškov so rezultati meritev horizontalnih kotov obremenjeni še z objektivnimi **pogreški** (pogreški okolja – pogošek faze, centriranja, signaliziranja) in subjektivnimi pogoški (pogreški operaterja – pogošek viziranja, koincidiranja).

Z namenom ugotavljanja prisotnosti grobih pogreškov, ocene kakovosti meritev ter določitve uteži merjenim vrednostim je potrebno **oceniti natančnost meritev** pred izravnavo mreže.

**Meritve horizontalnih kotov oz. smeri najpogosteje ocenjujemo na štiri načine, odvisno tudi od uporabljene metode meritev, in sicer**

- iz odstopanj od aritmetične sredine,
- iz rezultatov stojiščne izravnave,
- na osnovi odstopanj pri zapiranju horizonta in
- na osnovi odstopanj pri zapiranju likov.

Rezultat ocene so standardne deviacije merjenih kotov ali smeri, ki opisujejo kvaliteto meritev. Primerjava s pričakovano ali predpisano vrednostjo nam da odgovor o primernosti meritev za nadaljnji izračun.

### 3.1.3 OBDELAVA PODATKOV MERITEV HORIZONTALNIH KOTOV

Narava meritev pogojuje predhodno obdelavo podatkov oz. pretvorbo merskih vrednosti v obliko, primerno za izravnavo. Specifičnost opazovanj v določenih primerih (ekscentrična stojišča in signali) zahteva dodatne meritve elementov ekscentricitete in redukcijo merskih vrednosti. Na osnovi nadštevilnih meritev izračunamo najverjetnejše merske vrednosti. V praksi se pojavljajo različni primeri, od enostavnega računanja aritmetičnih sredin, spojitve skupin opazovanj, do stojiščne izravnave. Definitivne vrednosti opazovanih smeri, določene ob upoštevanju vseh opazovanj (izločeni so sistematični in grobi pogreški), so vhodni podatek izravnave.

## 3.2 Trigonometrično višinerstvo

Trigonometrično višinerstvo je ena od dveh geodetskih metod višinerstva. Višinsko razliko med točkama določimo na osnovi merjene zenitne razdalje in znane horizontalne ali merjene poševne dolžine. Metodo uporabljamo pri določanju višin trigonometričnih točk, poligonskih točk, višin točk v lokalnih inženirskih mrežah, višinskih položajev objektov na zahtevnih terenih, detajlni polarni topografski ali katastrski izmeri idr. Metoda je nenadomestljiva pri določanju višin nedostopnih točk (točke na pregradah, 3D industrijski merski sistemi itn.) in v kombinaciji z geometričnim nivelmanom pri prenosu višin na daljše oddaljenosti. Metoda je v kombinaciji z natančnimi meritvami poševnih dolžin z elektronskimi razdaljermi pridobila na pomenu, saj v veliko primerih doseženo natančnost lahko primerjamo z natančnostjo geometričnega nivelmana. Zenitne razdalje merimo tudi pri nekaterih nalogah klasične geodetske astronomije.

### 3.2.1 TEODOLIT PRI MERJENJU ZENITNIH RAZDALJ

Tudi za merjenje zenitnih razdalj (vertikalnih kotov) danes uporabljamo praktično le še elektronske teodolite. Kadar imamo na voljo elektronski tahimeter, inštrument na osnovi merjene zenitne razdalje in poševne dolžine takoj izračuna višinsko razliko. Vendar se pri izračunu lahko pojavi problem upoštevanja števila merskih vrednosti in izbire enačb za izračun. Ni nujno, da so vgrajene redukcijske enačbe dovolj natančne in



morda ne upoštevajo specifičnosti lokalnega področja, kjer meritve potekajo (lokalno merilo, projekcija...).

Pri merjenju zenitnih razdalj omenjamo dodatni inštrumentalni pogrešek - **indeksni pogrešek**, ki predstavlja pogrešek položaja mesta čitanja. Kotno vrednost pogreška določimo na osnovi razlike odčitkov zenitne razdalje proti izbrani točki v obeh krožnih legah. Pogrešek je ne glede na nagib vizure konstantna vrednost, lahko zelo velika, se pa eliminira z merjenjem v obeh krožnih legah. Za zagotavljanje konstantnosti tega pogreška imajo sodobnih inštrumenti vgrajen kompenzator, ki skrbi, da je indeks vertikalnega kroga vedno na istem mestu glede na položaj vertikalne osi, kljub temu, da je stojšična os nagnjena za določen manjši kot. Za nadzor in kontrolo inštrumentalnih pogreškov pri merjenju zenitnih razdalj velja podobno kot za merjenje horizontalnih kotov.

Natančnost pri merjenju zenitnih razdalj je drugi glavni tehnični podatek teodolita. Pri podajanju natančnosti se proizvajalci najpogosteje sklicujejo na standardizirana postopka preizkusa inštrumenta *DIN 18723-3* ali *ISO 8322-4*. Vrednosti  $s_{DIN\ 18723-THEO-V}$  in  $s_{ISO}$  sta ocenjeni na osnovi odstopanj od aritmetične sredine iz rezultatov niza meritev v izbrani mreži (DIN 48 meritev, ISO 32 meritev) in opisujeta standardni odklon zenitne razdalje, opazovane enkrat v obeh krožnih legah.

### 3.2.2 METODE MERITEV ZENITNIH RAZDALJ, POGREŠKI, OCENA NATANČNOSTI MERITEV

Z razliko od horizontalnih kotov pri izbiri **metode** merjenja zenitnih razdalj nimamo veliko možnosti. Potrebno je opraviti dovolj velik niz meritev, ki nam zagotavlja ustrezno natančnost (izjema je polarna detajlna izmera, kjer za določitev koordinat detajlne točke opravimo minimalno število meritev). Pri tem lahko uporabljamo vse tri horizontalne niti nitnega križa ali pa viziramo le s srednjo nitjo. Novejši inštrumenti imajo le srednjo nit. Meritve lahko opravimo izjemoma le na eni krajni točki (enostranske meritve – detajlna izmera, nedostopne točke). Včasih se poslužujemo metode preskoka (stojišče inštrumenta je na sredini med obema točkama – zmanjšanje oddaljenosti). Z namenom povečanja natančnosti in predvsem zmanjšanja neznanega vpliva vertikalne refrakcije pri trigonometričnem višinerstvu pa se najpogosteje poslužujemo obojestranskih meritev. Zenitni razdalji merimo istočasno na obeh krajnih točkah. Pri tem je potrebno uporabiti poseben način signalizacije ciljne točke (tarča na nosilcih daljnogleda teodolita). Zelo pomembno pri merjenju zenitnih razdalj je dobro definirano in enolično določeno mesto viziranja (višina signala).

Tudi pri metodi trigonometričnega višinerstva poznamo poleg inštrumentalnih pogreškov pri meritvah zenitnih razdalj dodatne objektivne in subjektivne **pogreške**, ki omejujejo natančnost te metode višinerstva. Predvsem in največji problem predstavlja **vertikalna refrakcija**, ki je posledica spreminjajočih se optičnih lastnosti zraka. Zaradi svoje nekonstantnosti in nedoločljivosti lahko pogrešek, ki se zaradi tega pojavlja, zmanjšamo, ne moremo pa ga odpraviti.

Ob običajni natančnosti meritev s sodobnimi inštrumenti in z uporabo znanih metod meritev velja, da do oddaljenosti 600 m pogrešek višinske razlike narašča linearno z dolžino po enačbi  $\sigma_{\Delta h} \approx a \cdot 10^{-6} S$ , kjer je vrednost  $a$  med 5 in 7, pri daljših dolžinah pa je to naraščanje kvadratično po enačbi  $\sigma_{\Delta h} \approx b \cdot (10^{-6} S)^2$ , kjer je  $b$  običajno med 8 in 12. Vrednosti te konstante pa so predvsem zaradi neupoštevanja prave vrednosti koeficienta refrakcije lahko bistveno večje. Razume se, da je vertikalna refrakcija glavni problem trigonometričnega višinerstva. Njen vpliv zmanjšamo z uporabo obojestranskih meritev ter zmanjšanjem oddaljenosti med točkami (postavitev vmesnih točk, metoda preskoka).

**Natančnost meritev** zenitnih razdalj in izračunanih višinskih razlik zaradi znanih razlogov ocenjujemo že pred izravnavo.

**Najpogosteje izbiramo med štirimi načini ocene in sicer :**

- iz odstopanj od aritmetične sredine,
- iz razlik dvojnih merjenj,
- na osnovi odstopanj v zaključenih zankah in
- na osnovi primerjave višinskih razlik s »pravimi« vrednostmi (primerjava z višinskimi razlikami, določenimi z metodo geometričnega nivelmana).

Rezultat ocene so standardne deviacije merjenih zenitnih razdalj ali izračunanih višinskih razlik. Primerjava z zahtevano vrednostjo nam da odgovor o primernosti meritev za nadaljnji izračun.

### 3.2.3 OBDELAVA PODATKOV MERITEV ZENITNIH RAZDALJ

Narava meritev pogojuje predhodno obdelavo podatkov oz. pretvorbo merskih vrednosti v obliko, primerno za izravnavo. Specifičnost opazovanj v določenih primerih (ekscentrična stojišča in signali) zahteva dodatne meritve elementov vertikalne ekscentricitete in redukcijo merskih vrednosti. Na osnovi nadštevilnih meritev izračunamo najverjetnejše merske vrednosti. Običajno že pred izravnavo na osnovi merjenih vrednosti in dodatnih danih (ali predhodno izračunanih vrednosti) računamo višinske razlike med točkami. Vhodni podatek izravnave so tako višinske razlike. Na ta način že v predhodnem izračunu upoštevamo predvsem sistematične vplive ukrivljenosti izbrane primerjalne ploskve ter sistematične vplive okolja na izračunano višinsko razliko (ukrivljenost Zemlje, refrakcija).

**Postopek izračuna višinskih razlik** je odvisen od razpoložljivih merjenih in danih vrednosti. V preteklosti so se najprej določale horizontalne koordinate med točkami (metoda triangulacije). Na osnovi teh koordinat je bila izračunana horizontalna dolžina v projekcijski ravnini, ki je bila nato uporabljena za izračun višinske razlike. Podobno bi ravnali danes v primeru, kadar določamo višino nedostopne točke. V drugih primerih pa za izračun višinske razlike po metodi trigonometričnega višinomerstva uporabimo z elektronskim razdaljemerom direktno merjeno dolžino med točkama. Govorimo o izračunu višinske razlike na osnovi poševno merjene dolžine. Pomembno je, da je dolžina izmerjena dovolj natančno in da za izračun uporabimo čimbolj eksaktno enačbo. V splošnem velja, da so uporabljene enačbe izpeljane ob določeni predpostavkah (koeficient refrakcije) in poenostavitvah. Takoimenovana zaokrožitvena napaka ne sme bistveno vplivati na končni rezultat.

## 3.3 Geometrični nivelman

Geometrični nivelman je najbolj natančna geodetska metoda višinomerstva in je eden najnatančnejših geodetskih merskih postopkov (metod). Višinsko razliko med dvema točkama določimo s pomočjo nivelirja, ki zagotavlja horizontalno vizurno linijo, in čitanja razdelbe na nivelmanskimi letah, ki sta postavljeni vertikalno na teh dveh točkah. Metodo uporabljamo pri določanju višin višinskih geodetskih točk (reperjev), ki jih povezujemo v višinske oz. nivelmanske geodetske mreže, za določanje višin točk v lokalnih inženirskih mrežah, nenadomestljiva pa je tudi pri natančnih meritvah višinskih

deformacij in premikov objektov (detajlni nivelman) ter natančnih višinskih zakoličbah pri gradnji objektov.

### 3.3.1 NIVELIRJI

Pri merjenju višinskih razlik z metodo geometričnega nivelmana uporabljamo nivelirje. To so v osnovi (predvsem nivelirji majhne in srednje natančnosti) dokaj preprosti optično mehanski in v današnjem času kompleksni elektronski inštrumenti, katerih najpomembnejša funkcija je zagotavljanje horizontalne smeri opazovanja. Sodobni digitalni nivelirji so s svojimi prednostmi praktično že izpodrinili klasične nivelirje in so kompleksni elektronski inštrumenti, ki pa so za uporabo enostavni. Način določanja odčitka na lati je popolnoma avtomatiziran, princip horizontiranja vizurne osi pa je enak kot pri klasičnih instrumentih, zato prav tako zahtevajo ustrezno kontrolo instrumenta in uporabo primerne postopka meritev. Pri merjenju z nivelirjem zato najpogosteje obravnavamo bistveni instrumentalni pogrešek - *pogrešek horizontalnosti vizurne osi*. Ob uravnani dozni libeli (približno horizontiranem instrumentu) mora biti vizurna os horizontalna. Kot nehorizontalnosti določimo z različnimi metodami. Vse temeljijo na primerjavi dvakrat na različni način določene višinske razlike med izbranimi točkama z vsakič enkratno postavitvijo instrumenta (niveliranje iz sredine in krajišča, Förstner, Näbauer, Kukkamäki). Metode preizkusa se razlikujejo po zahtevnosti in natančnosti, izbira pa je odvisna predvsem od natančnosti instrumenta in namena izmere. Rezultat preizkusa je kot nehorizontalnosti, ki ga vnesemo v pomnilnik instrumenta in tako zagotovimo korekcijo merjenih vrednosti (analogni kompenzacijski nivelir – premik nitnega križa). Digitalni nivelir ob preciznih meritvah na ta način preizkušamo vsak dan ob začetku meritev.

Natančnost nivelirjev je običajno podana z dvema parametroma, ki sta vezana tudi na vrsto uporabljene nivelmanske late (navadna, invar). Natančnost pri merjenju na daljše oddaljenosti določa standardna deviacija kilometra dvojnega nivelmana (dolžina poti niveliranja je 1 km, niveliramo v obeh smereh), posebej pa je podana natančnost instrumenta pri prenosu višine (enkratna postavitve). Pri podajanju natančnosti se proizvajalci sklicujejo na standardizirana postopka preizkusa instrumenta *DIN 18723-2* ali *ISO 8322-2*. Vrednosti  $S_{DIN\ 18723-NIV-1000}$ ,  $S_{DIN\ 18723-NIV-20}$  in  $S_{ISO}$  so ocenjene na osnovi odstopanj od aritmetične sredine iz rezultatov niza meritev v izbrani mreži (DIN 40 meritev, ISO 10 meritev).

### 3.3.2 METODE MERITEV NIVELMANA, POGREŠKI, OCENA NATANČNOSTI MERITEV

Ločimo dva postopka niveliranja in sicer generalni in detajlni nivelman. V primeru slednjega velja, da z njim določamo višine detajlnim točkam. Posebnosti: dolžine od instrumenta do late so različne, z enega stojišča običajno posnamemo večje število detajlnih točk idr. Z generalnim nivelmanom določamo višine točk višinske geodetske mreže. Glede na red višinske mreže, zahtevano natančnost idr. so tudi s pravilnikom predpisane zahteve izmere (max. dolžina vizure, število ponovitev, čas niveliranja, dopustna odstopanja idr.). Pri merjenju je potrebno zagotoviti dvojnost in izbrati način, s katerim eliminiramo nekatere vplive okolja (niveliranje iz sredine, izbira vrste late, zaporedje čitanja, izbira poti, višina vizure ...).

Pri geometričnem nivelmanu, glede na uporabo digitalnega nivelirja, poznamo predvsem dodatne objektivne **pogreške**, pa tudi občutne sistematične vplive, ki kvarijo natančnost meritev. Vpliv ukrivljenosti Zemlje in nehorizontalnost vizurne osi eliminiramo z niveliranjem iz sredine. Večji del vpliva *nivelmanske refrakcije* odpravimo z niveliranjem iz sredine in izbiro poti in časa niveliranja. Vpliv posedanja late in stativa zmanjšamo z zaporedjem čitanja na laticah in niveliranjem v obeh smereh. Pri digitalnih

nivelirjih se kot posledica zunanjih vplivov pojavljajo dodatni specifični pogreški. Pogosto predstavljata problem slabša osvetljenost late in tresenje tal. Slabe zunanje vplive je mogoče zmanjšati z izbiro krajše oddaljenosti late od instrumenta (optimalna oddaljenost, določena na osnovi praktičnih raziskav za instrument Leica je 18 m).

Posebno poglavje predstavljajo precizne meritve z uporabo invar nivelmanskih lat. Tudi lata ima konstrukcijske pomanjkljivosti. Za resno delo se zahteva uporaba kompariranih nivelmanskih lat. Komparacija omogoča določitev merila razdelbe late, popravka prve črtice razdelbe ter določitev razteznostnega koeficienta razdelbe. Na osnovi teh parametrov korigiramo merske vrednosti. Komparacijo lat opravljamo periodično. Edini komparator nivelmanskih lat v Sloveniji je na Katedri za geodezijo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Dodatno pogrešek nevertikalnosti nivelmanske late predstavlja enega od bistvenih pogreškov pri niveliranju. Late vertikaliziramo s pomočjo dozne libele, ki pa mora biti justirana.

**Natančnost izračunanih višinskih razlik** ocenjujemo; najpogosteje uporabimo tri načine, podobno kot pri trigonometričnem višinomerstvu in sicer dobimo oceno:

- iz razlik dvojnih merjenj,
- na osnovi odstopanj v zaključenih zankah in
- na osnovi primerjave višinskih razlik s »pravimi« vrednostmi (primerjava z višinskimi razlikami, določenimi z metodo geometričnega nivelmana).

Rezultat ocene so natančnosti višinskih razlik na utežno enoto, ki je najpogosteje 1 km, pri lokalnih mrežah manjšega obsega pa 100 m.

### 3.3.3 OBDELAVA PODATKOV MERITEV NIVELMANA

Narava meritev pogojuje predhodno obdelavo podatkov oz. pretvorbo merskih vrednosti v obliko, primerno za izravnavo. Ta preračun je pri geometričnem nivelmanu dokaj enostaven, če izvzamemo dejstvo, da pogosto operiramo z množico opazovanj. Predvsem je potrebno merjene vrednosti (že pred oceno natančnosti) reducirati za popravke lat, vpliv ukrivljenosti Zemlje in refrakcije in dodatne vplive, ki pa so odvisni od vrste mreže in zahtevane natančnosti.

Merjene vrednosti so eden od vhodnih podatkov izravnave. V primeru nivelmanske mreže so to na ta način reducirane višinske razlike nivelmanskih linij ter dolžine nivelmanskih linij in vlakov.

## 3.4 Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljemerji

Prvi elektronski razdaljemerji, namenjeni geodetskim meritvam, so se pojavili v štiridesetih in petdesetih letih 20. stoletja. Množično pa so se tudi daljše dolžine v geodeziji pričele meriti takrat, ko so elektronski razdaljemerji zagotavljali dovolj veliko – geodetsko natančnost in so bili instrumenti cenovno dostopni običajnim uporabnikom. To je bilo v sedemdesetih letih 20. stoletja. Z elektronskimi razdaljemerji merimo danes dolžine v trigonometričnih mrežah manjših dimenzij (trilateracija), v poligonskih mrežah, pri polarni detajlni topografski ali katastrski izmeri ter v številnih primerih inženirske geodezije pri opazovanju tal objektov (merjenje premikov in deformacij) in gradnji objektov (zakoličbe).

### 3.4.1 ELEKTRONSKI RAZDALJEMERI

Različne tehnične rešitve omogočajo različne načine merjenja dolžin z elektronskimi razdaljemerji. Poznamo *impulzni, interferenčni in fazni način*.

**Elektrooptične elektronske razdaljemere razdelimo na tri skupine:**

- a. **Impulzni razdaljemerji** določajo dolžino na osnovi direktno merjenega časa, ki ga svetlobni impulz potrebuje, da prepotuje razdaljo od instrumenta do reflektorja in nazaj. Prednosti impulznih razdaljemerov so predvsem krajši čas merjenja, omogočajo merjenje daljših dolžin ter dolžin do 300 m brez uporabe pasivnih reflektorjev. Slabosti pa so predvsem višja cena, dodatni kvarni vpliv atmosfere ter prekinitev meritve ob kratkočasovni prekinitvi merskega žarka.
- b. **Interferenčni razdaljemerji** so predvsem laboratorijski instrumenti za merjenje kratkih dolžin, ki jih v geodetske namene uporabljamo kot etalone za dolžino (komparatorji nivelmanskih lat) ter za zelo natančne meritve v inženirski geodeziji. Na osnovi interference svetlobe instrument izmeri velikost premika merske prizme merskega sistema. Slabosti Michelsonovega interferometra dopolnjuje tim. dvofrekvenčni interferometer, kjer merjenje temelji na merjenju frekvence elektromagnetnega valovanja, ki nastane z interferenco svetlobe, in časa. Ti instrumenti zagotavljajo najnatančnejši način merjenja dolžin (absolutna natančnost), slabost pa so drag instrumentarij in pribor ter zahteven postopek meritev. V laboratorijskih pogojih je z interferenčnim razdaljemerom smiselno meriti dolžine do največ 50 m.
- c. **Fazni razdaljemerji:** delovanje faznih razdaljemerov temelji na moduliranem elektromagnetnem valovanju. Nosilno valovanje zagotavlja premočrtnost razširjanja, mersko valovanje pa določa dolžinsko mersko enoto. Dolžina je večkratnik enot in ostanek, ki ga instrument določi s primerjavo faz merskega in referenčnega žarka. Fazni način meritev je najbolj preizkušen način merjenja z elektrooptičnimi razdaljemerji, ti instrumenti so cenejši in so večinoma sestavni del elektronskih tahimetrov. Meritev je neobčutljiva na kratkočasovno prekinitev signala. Novejši instrumenti celo omogočajo merjenje krajših dolžin (do 100 m) brez uporabe reflektorja.

### 3.4.2 POGREŠKI PRI MERJENJU DOLŽIN IN NATANČNOST ELEKTRONSKIH RAZDALJEMEROV

Pri merjenju dolžin z elektronskimi razdaljemerji obravnavamo dva bistvena sistematična vpliva. Ob njunem neupoštevanju se merjena dolžina lahko občutno razlikuje od pričakovanih vrednosti. To sta:

- a. **Vpliv atmosfere:** Razdaljemer računa dolžino ob predpostavki, da v atmosferi veljajo izbrani referenčni pogoji (različni predvsem glede na proizvajalca). Z merjenjem meteoroloških parametrov (temperatura zraka, zračni tlak, delni tlak vodne pare) določimo dejansko stanje atmosfere. Upoštevamo spremembo hitrosti razširjanja elektromagnetnega valovanja zaradi spremenjene optične gostote zraka. Sprememba dolžine za srednje pogoje v atmosferi bo (elektrooptični razdaljemerji,  $p, e$  v [torr],  $t, v$  [°C]):

$$dD = -D \cdot dn = (-0.38 \cdot dp + 0.98 \cdot dt + 0.06 \cdot dt_m) \cdot 10^{-6} \cdot D.$$

Enačba opisuje odvisnost spremembe dolžine od sprememb merjenih meteoroloških parametrov. Iz enačbe je razvidno, da posamezna sprememba 3 torr zračnega tlaka ali 1°C suhe temperature ali 17°C mokre temperature ali 20 torr delnega tlaka vodne pare povzroči relativno spremembo vrednosti merjene dolžine 1 ppm (oz. 1 mm/km).

b. **Instrumentalni pogreški** so posledica konstrukcijske nepopolnosti instrumenta in pribora, uporabljenega pri meritvah. Najznačilnejši so *pogrešek merske frekvenca* (dejanska merska frekvenca se zaradi različnih vzrokov razlikuje od nominalne – tiste, ki jo instrument upošteva pri izračunu dolžine), *pogrešek merjenja faze* (omejena ločljivost instrumenta je posledica nepopolnosti sistema, ki določa fini odčitek dolžine, ciklični popravek faze je običajno tovarniško določen in softversko upoštevan) in *pogrešek adicijske konstante* (horizontalna ekscentriciteta stojliščnih osi instrumenta in reflektorja in točk oddaje odboja in sprejema elektromagnetnega valovanja). Pri današnjih elektronskih razdaljemernih se pojavljajo naslednje numerične vrednosti (velja za fazne razdaljemere, podobno je pri impulznih):

**Pogreški, neodvisni od velikosti dolžine**

• ločljivost merjenja faze	$a_1 = 1 \dots 2 \text{ mm}$
• nehomogenost faze	$a_2 = 1 \dots 10 \text{ mm}$
• ciklični pogrešek faze	$a_3 = 1 \dots 6 \text{ mm}$
• pogrešek adicijske konstante	$a_4 = 1 \dots 10 \text{ mm}$
<i>skupno</i>	$a = \pm (1 \dots 15) \text{ mm}$

**Pogreški, odvisni od velikosti dolžine**

**i. modulacijska frekvenca**

• zagonski efekt	$b_1 = 1 \dots 5 \text{ ppm}$
• stabilnost frekvenca	$b_2 = 0 \dots 3 \text{ ppm}$
• temperaturna odvisnost	$b_3 = 1 \dots 10 \text{ ppm}$
• odvisnost od napetosti	$b_4 = 0 \dots 2 \text{ ppm}$
• staranje kristala	$b_5 = 1 \text{ ppm}$

**ii. lomni količnik**

• natančnost merjenja t,p,e	$b_6 = 1 \text{ ppm}$
• natančnost interpolacije	$b_7 = 1 \dots 10 \text{ ppm}$
<i>skupno</i>	$b = \pm (2 \dots 16) \text{ ppm}$

Natančnost razdaljemero je podana z dvema parametroma. Prvi definira vpliv konstantnega dela pogreškov, drugi pa je vpliv pogreškov, ki so odvisni od velikosti dolžine. Natančnost merjene dolžine opisuje standardna deviacija merjene dolžine, ocenjena na osnovi uporabljenega instrumentarija in vpliva spreminjajočih pogojev atmosfere:

$$\sigma_D = \sqrt{a^2 + (b \cdot D)^2}$$

Pri podajanju natančnosti razdaljemero se proizvajalci običajno ne sklicujejo na standardizirana postopka preizkusa instrumenta *DIN 18723-8* ali *ISO 8322-9*, saj postopka opisujeta določitev natančnosti razdaljemero kratkega dosega (največ 1 km).

**Natančnost** že izmerjenih **dolžin** ocenjujemo pred izravnavo, najpogosteje iz razlik dvojnih merjenj. Pri tem običajno določamo konstantni in linearni del pogreška.

### 3.4.3 KALIBRIRANJE ELEKTRONSKIH RAZDALJEMEROV

Kakor vsak merski pribor moramo tudi elektrooptične razdaljemere od časa do časa preizkusiti in umeriti. Za rutinsko delo zadošča *preizkus*, s katerim se prepričamo, da razdaljemer dosega natančnost, ki jo deklarira proizvajalec. Tak preizkus opravimo najbolje na testni bazi, ki seveda ustreza predhodno zahtevanim pogojem. Rezultat preizkusa je običajno določitev adicijske konstante kombinacije razdaljemera in reflektorja ter, če je mogoče, tudi tim. multiplikacijska konstanta oz. popravek merila. V primeru, da želimo natančnost razdaljemera potrditi, predvsem za posebne namene s

področja inženirske geodezije, ali pa želimo boljši vpogled v pravilno delovanje instrumenta in učinek posameznih pogreškov, so priporočljivi posamezni postopki *umerjanja* (kalibriranja) razdaljemera, ki nam omogočajo določitev določenih komponent pogreškov. Instrument kalibrirajo na ustreznih servisih ali pri proizvajalcu oz. na za to usposobljenih raziskovalnih institucijah. Določitev dejanske vrednosti merske frekvence, cikličnega pogreška faze, fazne nehomogenosti, popravka ničelne točke razdaljemera so rezultat meritev s preciznimi frekvenčnimi merilniki oz. preizkusa na kompleksnih interferenčnih komparatorjih v zato prirejenih laboratorijih.

#### 3.4.4 OBDELAVA PODATKOV MERITEV DOLŽIN

Vrednost dolžine, ki jo prikaže elektronski razdaljemer, ni takoj uporabna za nadaljnja natančna računanja. Na terenu izmerimo dejansko dolžino med dvema točkama. Ta dolžina je največkrat poševna, zaradi meteoroloških vplivov tudi ukrivljena. Ker je dolžina merjena na neki nadmorski višini, še ni uporabna za računanje na izbrani skupni površini (izbrana primerjalna ploskev – plašč referenčnega elipsoida ali plašč krogle). Merjeno dolžino moramo zato reducirati, kar pomeni, da jo popravimo za izračunano vrednost. Ločimo:

- a. **Meteorološke (fizikalne) popravke**, kar pomeni izračun razlike med vrednostjo, ki jo prikaže instrument in geometrično dolžino poti svetlobnega žarka med razdaljemerom in reflektorjem. Ločimo prvi popravek hitrosti (upoštevanje dejanske hitrosti svetlobe zaradi spremenjenih optičnih lastnosti atmosfere), ki ga moramo vedno obvezno upoštevati, in drugi popravek hitrosti (napaka interpolacije meteoroloških parametrov), katerega velikost je bistvena pri daljših dolžinah.
- b. **Geometrične popravke** je potrebno upoštevati zaradi oblike refrakcijske krivulje, s katero opišemo pot žarka, ter zaradi horizontalnih in vertikalnih ekscentricitet razdaljemera in reflektorja. Rezultat je poševna dolžina na nivoju točk (dolžina kamen-kamen). Te redukcije zahtevajo dodatne dane oz. merjene količine, vezane tudi na izbrano referenčno ploskev (višinska razlika, zenitna razdalja, ukrivljenost Zemlje ...)
- c. **Projekcijski popravki**: Izračun in upoštevanje projekcijskih popravkov pomeni prehod s prostorske poševne dolžine na nivoju točk na dolžino sfernega loka na nivoju referenčnega horizonta (na referenčni ploskvi) ter nato v izbrano projekcijsko ravnino. Tu so potrebne elipsoidne višine, problem pa je, da so na splošno na razpolago le nadmorske oz. ortometrične višine, ki se nanašajo na ploskev geoida.

**Obraunavane geometrične redukcije se delijo na 2 skupini in sicer:**

- razlike med dolžinami tetiv v odvisnosti od naklona in višine,
- razlike med dolžino na izbrani referenčni ploskvi in v izbrani projekcijski ravnini.

Način preračuna je odvisen od razpoložljivih danih oz. dodatno merjenih vrednosti. Pri tem pogosto uporabimo poenostavljene enačbe, izpeljane ob določenih predpostavkah oz. poenostavitvah (velikokrat so le-te že vgrajene v programski opremi razdaljemera oz. tahimetra). Zaokrožitvena napaka ne sme bistveno vplivati na končni rezultat.

## 4. GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)

Z začetkom uporabe GPS tehnologije se je v geodetski praksi začelo novo obdobje, ki temeljito spreminja današnje postopke geodetske izmere. Podobne, vendar mnogo manjše spremembe sta v geodetsko prakso prinesla uvedba elektronskih računalnikov in nekoliko kasneje elektrooptičnih razdaljemerov.

**Prednosti GPS tehnologije pred klasičnimi geodetskimi merskimi postopki so:**

- visoka produktivnost meritev,
- vremenski pogoji za izvedbo meritev niso pomembni,
- višja natančnost določitve položaja na razdaljah, daljših od 1 km,
- za določitev položaja točke ne potrebujemo medsebojne vidnosti točk, kar pomeni, da jih lahko postavljamo na enostavno dostopnih mestih,
- določitev tridimenzionalnega položaja,
- položaj, ki ga pridobimo na osnovi GPS opazovanj, je geometrijski položaj (neodvisen od geometrije težnostnega polja v opazovališču),
- nižja cena izmere, ki temelji na visoki produktivnosti GPS tehnologije,
- z vzpostavitvijo permanentnih GPS postaj bo cena tovrstnega določanja položaja še nižja.

**Poleg prednosti pa ima GPS tehnologija glede na klasične merske postopke tudi nekaj slabosti:**

- v okolici opazovane točke ne sme biti ovir, ki bi onemogočale sprejem GPS signala,
- elipsoidna višina točke, pridobljena na osnovi GPS opazovanj, ni primerna za praktično uporabo, za pridobitev ortometrične višine točke moramo poznati obliko ploskve geoida,
- GPS je last ZDA, ki s sistemom prosto razpolaga.

**GPS omogoča pridobivanje položajev različne natančnosti. Višjo natančnost v splošnem omogoča:**

- višja cena instrumentarija za GPS izmero,
- dolgotrajnejše meritve in
- obsežnejši postopki obdelave opazovanj.

Pri uporabi GPS opazovanj za reševanje različnih nalog določitve položaja je potrebno poznati nekatera osnovna dejstva o sistemu GPS, sestavi GPS signala, metodah GPS izmere in vplivih na GPS opazovanja.

Hiter razvoj GPS tehnologije omogoča pojavljanje vedno novih merskih tehnik geodetske GPS izmere. Merske tehnike geodetske GPS izmere so praviloma vedno bolj učinkovite in vedno bolj produktivne. Klasične metode geodetske GPS izmere, kot sta statična in hitra statična metoda GPS izmere, so se izkazale kot zelo zanesljivo sredstvo za določanje položajev točk na velikih območjih z veliko natančnostjo, ob velikem prihranku časa in dokaj nenapornem terenskem delu. Med metodami geodetske GPS izmere, ki so se pojavile v novejšem času in so primerne za uporabo na manjšem območju, so posebno pomembne kinematična, Stop-and-Go ter Real Time Kinematic - RTK metoda GPS izmere. V povezavi s prefinjenimi algoritmi za določitev neznanega začetnega števila celih valov, predvsem z algoritmom On-the-Fly (OTF), omenjene metode omogočajo pridobitev položajev z natančnostjo, ki ustreza praktično vsem zahtevam geodetske izmere.



Razvoj GPS instrumentarija, programske opreme ter računalništva in informatike nasploh omogoča obdelavo vedno večjega števila informacij ter uporabo vedno bolj prefinjenih postopkov izmere in obdelave podatkov izmere, ki jih vzpodbujajo tudi zahteve po višji natančnosti določitve položaja.

**V pripravi, izvedbi in ovrednotenju geodetske GPS izmere je potrebno obravnavati z največjo možno pozornostjo naslednje:**

- pridobitev podatkov, ki ustrezajo zahtevam o natančnosti položaja,
- skladnost s specificiranimi postopki izmere in obdelave podatkov opazovanj,
- odstranitev ali zmanjšanje znanih in možnih sistematičnih vplivov na opazovanja,
- zadostno nadštevilnost opazovanj za zanesljivo ugotovitev točnosti ocenjenih količin,
- ustrezno obdelavo in analizo podatkov opazovanj,
- zadostno dokumentiranje postopkov izmere in obdelave podatkov opazovanj, kar omogoča ovrednotenje in ponovitev obdelave podatkov opazovanj,

Metode GPS izmere moramo v geodetski praksi obravnavati kot vse druge merske tehnike, kar pomeni, da jih moramo imeti v vseh fazah izvedbe naloge popolnoma »pod nadzorom«.

#### 4.1 Splošno o GPS

Določitev položaja na osnovi GPS opazovanj lahko primerjamo s trilateracijo. Obe tehniki uporabljata za določitev položaja opazovane razdalje med danimi in novimi točkami. V primeru GPS so dane točke sateliti, katerih položaj je v vsakem trenutku znan. Osnova za določitev razdalje pa je časovni interval, ki ga signal (elektromagnetno valovanje) potrebuje za pot od oddajnika do sprejemnika. Časovni interval, potreben za pot signala od oddajnika do sprejemnika, je določen kot razlika časovnih trenutkov oddaje in sprejema signala. Časovni interval je v primeru elektrooptičnega razdaljemera izmerjen z uro, ki je registrirala trenutek oddaje in sprejema signala, v primeru GPS pa je časovni interval, pridobljen na osnovi trenutka oddaje signala s satelitovim sistemom ur, trenutek sprejema signala pa je pridobljen s sprejemnikovo uro. GPS signal mora zato vsebovati tudi podatek o točnem času v trenutku oddaje signala. Določitev položaja novih točk v obeh primerih temelji na koordinatah znanih točk. V primeru GPS so točke z znanimi koordinatami sateliti. To pomeni, da mora GPS signal vsebovati tudi informacije o položajih satelitov v trenutku oddaje signala. Tako v primeru trilateracije kot tudi v primeru GPS signal potuje od oddajnika do sprejemnika v Zemljini atmosferi. Je pa dolžina poti, ki jo GPS signal opravi v Zemljini atmosferi, bistveno daljša od poti, ki jo opravi signal v primeru trilateracije, zato morajo biti vplivi Zemljine atmosfere na GPS signal obravnavani kompleksneje. Vsaj del te informacije mora biti vsebovan tudi v GPS signalu.

Določitev položaja na osnovi GPS opazovanj temelji torej na prenosu dokaj obsežnih količin informacij od satelita do sprejemnika. Tako mora GPS signal vsebovati: podatke za identifikacijo posameznega satelita, podatek o času satelita, trenutnem položaju satelita in informacije o stanju Zemljine atmosfere. Prenos velike množice informacij s satelita do sprejemnika je mogoč samo s pomočjo ustreznih kod.

## 4.2 Zgradba GPS

Lastnik sistema so Združene države Amerike in je v osnovi namenjen vojaški uporabi, uporabljamo pa ga tudi civilni uporabniki. GPS sistem sestavljajo navigacijski sateliti ali t.i. vesoljski segment GPS, zemeljski ali t.i. kontrolni segment GPS, ki upravlja s sistemom, in uporabniški segment, t.j. uporabniki, ki uporabljajo GPS za reševanje svojih nalog.

**Vesoljski segment** predstavlja sistem 24 navigacijskih satelitov, ki »krožijo« okrog Zemlje na višini približno 20200 km in neprekinjeno oddajajo signal, ki vsebuje informacije za določitev položaja in časa. Z razvojem sistema je potekal tudi razvoj GPS satelitov, kar je razlog za delitev satelitov na t.i. generacije oz. skupine satelitov. Prva generacija GPS satelitov s konca sedemdesetih let 20. stoletja so bili t.i. Block I sateliti. Ravnina tirnice teh satelitov je bila nagnjena proti ravnini ekvatorja za 63°, sateliti pa so bili sposobni samostojno delovati 3-4 dni. Druga generacija GPS satelitov so bili t.i. Block II sateliti. Prvi satelit iz te skupine je začel delovati v začetku leta 1989. Samostojno lahko delujejo do 14 dni. Prvi satelit iz skupine Block IIA satelitov je začel operativno delovati novembra 1990. Od satelitov iz skupine Block II se razlikujejo v tem, da so sposobni samostojno delovati do 180 dni. Naslednja skupina satelitov je skupina Block IIR satelitov. Na krovu imajo opremo, ki omogoča samostojno pripravo navigacijskih sporočil. Avtonomno lahko delujejo do pol leta. Vsi sateliti skupin Block II, IIA in IIR se gibljejo po ravninah, proti ravnini ekvatorja, nagnjeni za 55°. Sateliti so razporejeni na 6 ravninah, označenih z oznakami od A do F, ki so enakomerno razporejene od smeri pomladišča proti vzhodu. Na vsaki ravnini se nahajajo 4 sateliti, ki zaradi optimalne pokritosti celotne Zemlje z GPS signalom niso po ravninah popolnoma enakomerno razporejeni. Satelit na posamezni ravnini je opremljen s številko od 1 do 4. Tako imajo sateliti oznake od A1 do F4.

**Kontrolni segment** sestavljajo kontrolne postaje, enakomerno razporejene vzdolž ekvatorja, in glavna kontrolna postaja (*Master Control Station*) v bližini Colorado Springsa v ZDA. Glavna naloga kontrolnega segmenta je ugotavljanje stanja sistema in posameznih satelitov GPS na osnovi sprejetih signalov GPS satelitov, določanje parametrov tirnic GPS satelitov, ugotavljanje urnega teka satelitovih ur in periodično obnavljanje navigacijskega sporočila. Kakovost signala posameznega satelita mora ustrezati sistemskim zahtevam. Če stanje satelita ni ustrezno, kontrolni segment poskrbi za odstanitev nastalih težav. Informacije o tirnici GPS satelita so zbrane v t.i. »s satelita oddanih efemeridah« (broadcast ephemeris), ki so del navigacijskega sporočila GPS signala. Glavna kontrolna postaja lahko komunicira s sateliti in odstranjuje nastale težave, prav tako posreduje satelitom parametre o njihovih tirnicah.

**Uporabniški segment** sestavljajo uporabniki GPS sistema. Uporabniki GPS sistema opazujejo, shranjujejo in obdelujejo sprejeti signal, na osnovi katerega določajo svoj položaj, hitrost in pridobivajo podatek o času.

### 4.2.1 GPS SIGNAL

Oscilatorji na krovu GPS satelita generirajo časovno zelo stabilno osnovno frekvenco  $f_0 = 10.23 \text{ Mhz}$ . Dve nosilni valovanji L1 in L2 sta izvedeni iz osnovne frekvence in imata frekvenci  $f_{L1} = 154 * f_0 = 1575,42 \text{ Mhz}$  in  $f_{L2} = 120 * f_0 = 1227,6 \text{ Mhz}$ . Valovni dolžini obeh valovanj sta  $\lambda_{L1} \approx 0,19 \text{ m}$  in  $\lambda_{L2} \approx 0,24 \text{ m}$ . Frekvenci valovanj L1 in L2 sta izbrani tako, da je vpliv ionosfere na signal minimalen. Satelitski signal je kodiran z dvema PRN (Pseudo Random Noise) kodama, ki sta modulirani na osnovni valovanji L1 in L2. V osnovi ločimo tri kode: P (Precise) kodo, C/A (Coarse Acquisition) kodo in navigacijsko kodo. Kodo si

lahko predstavljamo kot nosilca informacij. Kode in satelitsko sporočilo so nanesene na nosilno valovanje z modulacijo. Valovanje L1 je modulirano s C/A kodo, P kodo in navigacijskim sporočilom. Valovnje L2 je modulirano s P kodo in navigacijskim sporočilom. Obe valovanji L1 in L2 sta torej modulirani s P-kodo, C/A koda je postavljena samo na nosilni val L1, v faznem zamiku za 90° glede na P-kodo.

#### 4.2.2 GPS SPREJEMNIK

Trenutno je na tržišču več kot 1000 različnih GPS sprejemnikov, namenjenih različnim potrebam (navigacija, geodetska izmera, GPS sprejemniki za neprekinjeno delovanje). Najpogostejše merilo za izbiro GPS sprejemnika je potrebna natančnost določitve položaja ali časa na osnovi GPS opazovanj. Sprejemniki so v osnovi zelo različni, vendar imajo vsi naslednje sestavne dele: anteno, radio frekvenčni del, mikroprocesor, kontrolno enoto, zaslon in tipkovnico, spominsko enoto in vir energije. Običajno so vse komponente, razen antene, zbrane v skupnem ohišju - GPS sprejemniku.

### 4.3 Tipi opazovanj v GPS

Razdaljo med oddajnikom in sprejemnikom določimo na osnovi hitrosti potovanja signala ter časovnega intervala med trenutkom oddaje in trenutkom sprejema signala.

#### 4.3.1 KODNA OPAZOVANJA

Kodna opazovanja obravnavamo kot opazovanja časovnega intervala od trenutka oddaje do trenutka sprejema kode. Časovni interval, pomnožen s svetlobno hitrostjo, predstavlja geometrijsko razdaljo med satelitom in sprejemnikom. Za tako enostavno določitev razdalje med satelitom in sprejemnikom bi morali biti uri satelita in sprejemnika med drugim popolnoma usklajeni, kar je fizično nemogoče. Koda, generirana v sprejemniku, je izvedena na osnovi sprejemnikove ure, s satelita oddana koda je izvedena na osnovi satelitovega sistema ur. Izmerjeni časovni interval vključuje torej napake satelitove in sprejemnikove ure. Te neizogibne napake ur se neposredno izražajo v geometrijski razdalji med satelitom in sprejemnikom. Odtod izhaja tudi ime za tako pridobljeno razdaljo - psevdorazdalja. Psevdorazdalja je mera za razdaljo med GPS satelitom in anteno GPS sprejemnika. Iz teorije izračuna neznanih količin je znano, da v enačbah, ki povezujejo dane, merjene in neznane količine, nastopa osem neznank. To so tri koordinate sprejemnika, pogrešek urnega stanja sprejemnikove ure, pogrešek ure satelita, vpliv ionosfere in troposfere na izmerjeno vrednost razdalje in vpliv odboja signala od objektov v bližini antene, skupaj s šumom sprejemnika. Predpostavljamo, da poznamo položaj satelita v trenutku oddaje signala. Stanje ur v satelitih je s kontrolnih postaj na Zemlji ves čas nadzorovano in usklajevano z GPS časom, zato lahko predpostavimo, da je stanje satelitskih ur pravilno. Vrednost vpliva ionosfere in troposfere na izmerjeno psevdorazdaljo zanemarimo ali modeliramo z uporabo modelov ionosfere in troposfere. Odboj signala in šum sprejemnika zanemarimo. Ostanje štiri neznanke: tri koordinate sprejemnika in pogrešek urnega stanja sprejemnika. Določimo jih lahko le, če v nekem trenutku poznamo psevdorazdaljo od sprejemnika do najmanj štirih satelitov.

Določitev absolutnega položaja na osnovi kodnih opazovanj omogoča določitev položaja z natančnostjo  $\sigma_p = 10\text{-}30\text{ m}$ , določitev relativnega položaja dveh sprejemnikov na osnovi kodnih opazovanj je mogoča z natančnostjo  $\sigma_p = 2\text{-}3\text{ m}$ . Ta natančnost v

splošnem ne zadovoljuje potreb geodezije. Opazovane psevdorazdalje pa so primarnega pomena za navigacijo, pri kartografiji malih meril, za potrebe različnih GIS-ov... Glavni tip opazovanj za potrebe geodezije so fazna opazovanja.

#### 4.3.2 FAZNA OPAZOVANJA

Fazna opazovanja so za obravnavo nekoliko bolj težavna kot kodna, vendar so jim v osnovi podobna. Osnova za izračun razdalje med satelitom in sprejemnikom je zopet čas potovanja signala med satelitom in sprejemnikom. Fazna opazovanja temeljijo na nemoduliranih sinusnih nosilnih valovanjih L1 in L2. Matematični izrazi opazovanja faze nosilnega valovanja vključujejo dejstvo, da se faza valovanja spremeni za vrednost  $2\pi$ , ko se razdalja med satelitom in sprejemnikom spremeni za geometrijsko razdaljo, enako eni valovni dolžini.

Za izmero faze valovanja potrebujemo dve valovanji enakih frekvenc. V primeru GPS opazovanj pa sprejeto in v sprejemniku generirano valovanje nimata enake frekvence. Vzrok za to je dejstvo, da se satelit kot oddajnik valovanja glede na sprejemnik vedno giblje. Posledica tega gibanja je sprememba sprejete frekvence (glede na oddano) za vrednost vpliva Dopplerjevega efekta. V primeru GPS opazovanj se tako izmerjena vrednost faze nanaša na razliko med za vrednost Dopplerjevega efekta spremenjenim sprejetim valovanjem in v sprejemniku generiranim valovanjem nominalne frekvence. Postopek izmere faze ne zagotavlja nosilnega valovanja (geometrijske razdalje) v celoti. Sprejemnik namreč ne more zaznati celih valov  $N$  valovanja med satelitom in sprejemnikom. Sprejemnik lahko zazna samo valovanje med satelitom in sprejemnikom v okviru ene valovne dolžine in beleži kumulativne spremembe le-te.

Sprejemnik ob začetku izvajanja opazovanj sprejme s satelita oddano valovanje in vzpostavi interno kopijo tega valovanja. Sprejeto valovanje neprekinjeno spremlja in v naprej predvidenih časovnih intervalih izvaja fazna opazovanja. Če predpostavimo, da v času izmere ni prišlo do prekinitve spremljanja valovanja, je vrednost števila celih valov  $N$  ostala ves čas izmere nespremenjena. Ob prekinitvi sprejema signala pa se razdalja med satelitom in sprejemnikom spremeni za neznano vrednost celih valov. Pojavi se t.i. cycle slip, ki povzroči težavo v obdelavi faznih opazovanj. Število celih valov med satelitom in sprejemnikom v začetnem trenutku opazovanj je neznanka, ki jo je potrebno določiti v fazi obdelave opazovanj.

#### 4.4 Vplivi na GPS opazovanja

Natančnost določitve položaja na osnovi GPS opazovanj je odvisna od geometrijske razporeditve opazovanih satelitov in od kakovosti opravljenih opazovanj. Kakovost opravljenih opazovanj pa je poleg kakovosti sprejemnika odvisna tudi od kakovosti obravnave vplivov na opazovanja.

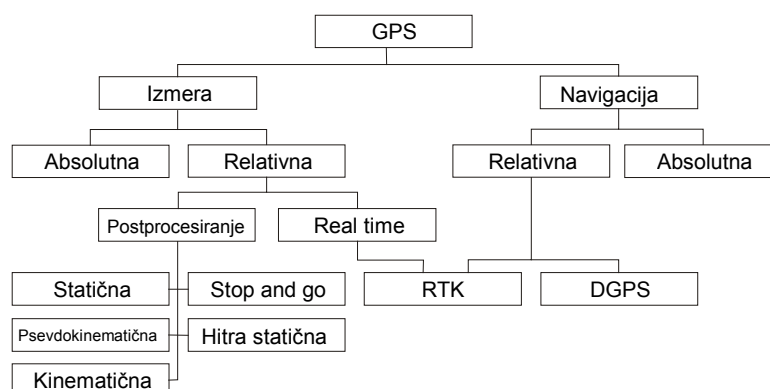
**Vplive na GPS opazovanja lahko glede na njihov izvor razdelimo v tri skupine:**

- vplivi z **izvorom v satelitih**, ki v glavnem vključujejo pogreške ur in tirnic satelitov,
- vplivi z **izvorom v sprejemniku**, ki vključujejo pogrešek ure sprejemnika, odboj signala oziroma »multipath«, spreminjanje položaja faznega centra antene in šum sprejemnika,
- vplivi z **izvorom v mediju**, v katerem signal potuje, ki vključujejo ionosfersko in troposfersko refrakcijo.

Nekateri omenjeni vplivi so sistematični, drugi slučajni. V postopku obdelave GPS opazovanj je potrebno oceniti predvsem sistematične vplive na GPS opazovanja. Sistematične vplive lahko odstranimo z uporabo ustreznih matematičnih modelov, lahko jih zmanjšamo ali celo odstranimo s primernimi kombinacijami opazovanj ali z ustrezno opravljeno geodetsko GPS izmero.

#### 4.5 Metode geodetske GPS izmere

Od začetkov praktične uporabe GPS opazovanj za potrebe geodezije v sredini osemdesetih let prejšnjega stoletja je geodetska GPS izmera postala praktično edina metoda izmere za vzpostavitev geodetskih mrež za najrazličnejše namene in najrazličnejših natančnosti. Od začetkov devetdesetih let prejšnjega stoletja se metode GPS izmere uporabljajo tudi pri topografski in katastrski izmeri. Tehnike geodetske GPS izmere predstavljajo v primerjavi s klasičnimi geodetskimi merskimi postopki takšen napredek, kot ga je prinesel do sedaj le pojav elektronskih računalnikov in nekoliko kasneje pojav elektrooptičnih razdaljemerov. Napredek, ki ga v geodezijo prinaša GPS, pa skupaj z internetom zahteva tudi nekoliko tesnejšo povezanost uporabnikov GPS-a z (bodočimi) domačimi in mednarodnimi službami, ki pripravljajo informacije za optimalno ter pravilno uporabo GPS-a.



Slika 1: Metode GPS izmere

Vse metode GPS izmere, ki jih uporabljamo v geodeziji, temeljijo na faznih opazovanjih. Vse metode po vrsti so metode za določanje **relativnega položaja**, ker le-te omogočajo doseganje natančnosti položaja, ki je primerna za uporabo v geodeziji. Po drugi metodologiji pa delimo metode GPS izmere tudi glede na način izvedbe meritev. Sprejemnik lahko med izmero miruje, je ves čas izmere na istem mestu ali pa določamo položaje točk tako, da se sprejemnik giblje po določenem območju. Po tej delitvi obstajata med metodami GPS izmere samo dve metodi, in sicer **statična** in **kinematična** metoda GPS izmere. Vendar se je v obdobju od začetkov prve praktične uporabe GPS opazovanj do danes razvilo nekaj metod izmere, ki v večji meri povzemajo značilnosti ene ali druge osnovne metode GPS izmere.

#### 4.5.1 STATIČNA GPS IZMERA

Statična GPS izmera je osnovna metoda za določanje relativnega položaja. Opazovanja pri tej metodi, ki trajajo tipično od 30 do 120 minut, temeljijo na spremembi geometrijske razporeditve satelitov v času opazovanj. Statično izmero običajno izvajamo s številom sprejemnikov, ki je manjše od števila točk, izvedemo v več serijah. Število serij, potrebnih za izmero, je odvisno od števila sprejemnikov, števila točk in od števila neodvisnih izmer posamezne točke. Vsaka točka naj bi bila neodvisno opazovana vsaj dvakrat. Rezultat statične izmere so bazni vektorji med pari točk. Matematični modeli za modeliranje ionosferske refrakcije ter zanesljivi algoritmi za določitev neznanega začetnega števila celih valov omogočajo ob izvedbi statičnih GPS opazovanj pridobitev baznih vektorjev dolžin  $d$ , z relativno natančnostjo do  $10^{-6}D$ , ki pa je lahko v primeru uporabe natančnih efemerid satelitov tudi do  $10^{-7}D$ . Za doseganje tako visoke natančnosti pa je, poleg kakovostne izvedbe opazovanj in uporabe natančnih tirnic satelitov ustrezne kakovosti, potrebno ustrezno izvesti tudi obdelavo opazovanj. Končne rezultate statične izmere običajno pridobimo z izravnavo baznih vektorjev v GPS mreži.

#### 4.5.2 HITRA STATIČNA METODA GPS IZMERE

Sama hitra statična metoda GPS izmere je v vseh bistvenih lastnostih enaka statični metodi izmere, z izjemo krajšega časa trajanja opazovanj. Ta metoda izmere, ki jo proizvajalci GPS opreme imenujejo tudi Rapid Static™ in Fast Static™ se je pojavila z razvojem algoritmov za učinkovito določitev neznanega začetnega števila celih valov ob uporabi različnih tipov opazovanj in različnih kombinacij teh opazovanj, kar omogoča hitro in zanesljivo določitev začetnih neznanih vrednosti celih valov. Določitev teh neznank je najučinkovitejša ob sprejemanju signalov petih ali več satelitov.

#### 4.5.3 KINEMATIČNA METODA GPS IZMERE

Kinematična metoda GPS izmere temelji na določitvi relativnih položajev premičnega sprejemnika glede na mirujoč referenčni sprejemnik. Običajna kinematična metoda GPS izmere, kjer se premični sprejemnik ves čas izmere premika, je za potrebe geodezije uporabna le izjemoma. Bolj uporabna je Stop-and-Go metoda, kjer izvajamo opazovanja na enak način kot pri kinematični GPS izmeri, vendar se na točkah, katerih položaj nas zanima, zaustavimo za nekaj sekund do nekaj minut. Pri kinematični metodi je najpomembnejša t.i. inicializacija meritev, to je določitev neznanih začetnih vrednosti za število celih valov med posameznimi sateliti in obema GPS sprejemnikoma. Temelj metode je poleg uspešne inicializacije zagotovljen neprekinjen sprejem signala najmanj 4 satelitov ves čas izmere. Zaradi kratkotrajnih opazovanj na posamezni točki so rezultati izmere lahko obremenjeni s sistematičnimi vplivi z izvorom v okolici GPS sprejemnika. S postopki izmere moramo zagotoviti pogoje, da v rezultatih izmere ne bo prisotnih sistematičnih vplivov.

#### 4.5.4 RTK-GPS METODA IZMERE

RTK-GPS metoda izmere je v osnovi kinematična metoda, ki je lahko tudi Stop-and-Go metoda ali tudi kombinacija kinematične in hitre statične metode GPS izmere. RTK-GPS metoda potrebuje radijsko povezavo med referenčnim in premičnim GPS sprejemnikom in ustrezno programsko opremo za obdelavo opazovanj referenčnega in premičnega GPS sprejemnika v času trajanja izmere. Metoda je primerna za najrazličnejše geodetske naloge, od detajlne izmere do nalog inženirske geodezije. Največja prednost omenjene

metode je med ostalimi v tem, da med samo izmero pridobimo informacijo o količini in kakovosti opravljenega terenskega dela. Pri drugih metodah teh podatkov med samo izmero namreč še nimamo. Ob običajnem odstotku neuspešnih meritev s kinematično ali Stop-and-Go metodo izmere, ki znaša približno 10%, je ta informacija vsekakor dobrodošla.

Danes je za potrebe topografske in katastrske geodetske izmere verjetno najboljša kombinacija različnih metod GPS izmere in sicer hitra statična metoda v kombinaciji z RTK metodo GPS izmere. Posamezne metode GPS izmere omogočajo pridobivanje položaja ustrezne natančnosti in zanesljivosti ob različnem obsegu terenskega dela ter ob različno kompleksni obdelavi teh opazovanj po opravljeni izmeri. Nekatere osnovne lastnosti posameznih metod GPS izmere podajamo v tabeli 1.

Metoda izmere	Relativna točnost	Trajanje opazovanj	Slabosti	Prednosti
Statična	0,1 ppm - 10 ppm	1 - 4 ure	Počasna	Visoka točnost
Hitra statična	1 ppm - 10 ppm	5 min. - 20 min.	Potrebujemo prefinjen hardver in softver	Hitra in visoke točnosti
Kinematična	1,5 ppm - 10 ppm	1 min. - 2 min.	Neprekinjen sprejem signala najmanj 4 satelitov	Hitra
RTK	1 ppm - 10 ppm	Skoraj Real Time	Neprekinjen sprejem signala 4 ali več satelitov ali ponovna inicializacija	Visoka točnost določitve položaja premičnega objekta

Tabela 1: Osnovne lastnosti metod geodetske GPS izmere

Danes je za potrebe topografske in katastrske geodetske izmere verjetno najboljša kombinacija različnih metod GPS izmere in sicer hitra statična metoda v kombinaciji z RTK metodo GPS izmere. Posamezne metode GPS izmere omogočajo pridobivanje položaja ustrezne natančnosti in zanesljivosti ob različnem obsegu terenskega dela ter ob različno kompleksni obdelavi teh opazovanj po opravljeni izmeri. Nekatere osnovne lastnosti posameznih metod GPS izmere podajamo v gornji tabeli.

Glede na omejitve v samem sistemu GPS (fizične ovire za sprejemanje satelitskega signala) bo v prihodnosti optimalna kombinacija terestričnih ter GPS metod izmere, ki bo zagotavljala trirazsežen položaj.

#### 4.6. Obdelava GPS opazovanj

Obdelava GPS opazovanj je ključna faza pri izvedbi projekta GPS izmere. Določene postopke obdelave opazovanj je priporočljivo izvajati med samo izmero, določene lahko izvedemo na koncu izmere. Grobi pogrški operaterjev, nezadovoljivi podatki izmere in neprimerna kakovost satelitskega signala posameznih satelitov lahko za uspešno izvedbo GPS izmere predstavljajo tolikšen problem, da je nemogoče pridobiti rezultate zelene kvalitete. Da bi se težavam izognili, je potrebno poskrbeti za ugotovitev njihovega izvora v času izmere, ko so stroški ponovne izmere še relativno majhni. Čeprav nam uspe odstraniti grobe pogrške, je še vedno potrebno zagotoviti, da med opazovanji ne bomo imeli sistematičnih vplivov, ki lahko močno obremenjujejo

rezultate GPS izmere. Obdelava GPS opazovanj naj bi tako omogočila pridobitev optimalnih rezultatov iz običajno velikega števila opazovanj. Ključna naloga obdelave podatkov GPS izmere je uspešna in zanesljiva določitev vseh, še posebej pa koordinatnih neznank ter pripadajoča informacija o natančnosti ocene le-teh.

Obdelava opazovanj v splošnem vključuje pregled in arhiviranje podatkov opazovanj, obdelavo faznih opazovanj za pridobitev baznih vektorjev in položajev novih točk, izravnavo opazovanj v geodetski mreži ter transformacijo položajev, določenih v koordinatnem sistemu GPS izmere, v državni koordinatni sistem. Za pridobitev rezultatov izmere točnosti moramo vsakega od korakov obdelave opazovanj oceniti strokovno korektno, pri čemer so nam v pomoč statistična merila za oceno kakovosti opravljenih opazovanj in pridobljenih rezultatov. Rezultati GPS izmere so, v splošnem, odvisni od metode GPS izmere, tipa GPS sprejemnika in antene, tipa opravljenih opazovanj ter programske opreme za obdelavo le-teh ter presoje strokovnjaka o ustreznosti opravljenih postopkov izmere ter obdelave opazovanj v vseh fazah do pridobitve koordinat točk v želenem koordinatnem sistemu.

## 5. IZRAVNAVA IN ANALIZA OPAZOVANJ V GEODETSKI MREŽI

Nepriistransko oceno za vse spremenljivke v matematičnem modelu bomo pridobili samo v primeru, ko bodo pravi pogreški opazovanj porazdeljeni slučajno. Ker pa so v opazovanjih vedno prisotni tudi grobi in sistematični pogreški, jim je potrebno posvetiti potrebno pozornost. Pri tem obravnavamo prisotnost grobih in/ali sistematičnih pogreškov v opazovanjih na osnovi predhodne analize opazovanj ter tudi na osnovi rezultatov izravnave opazovanj.

V današnjem času skoraj izključno uporabljamo posredno izravnavo opazovanj. Ko imamo opazovanja ustrezno obdelana, je potrebno vzpostaviti zvezo med opazovanimi in neznanimi količinami v geodetski mreži. Matematično predstavljajo te zveze lahko poddoločen, določen ali predoločen problem. Problem je poddoločen, če nimamo na razpolago dovolj neodvisnih opazovanih količin za enolično določitev neodvisnih iskanih količin v mreži. Problem je določen, ko imamo na razpolago toliko neodvisnih opazovanj, kolikor je neodvisnih neznank v mreži. Predoločen je problem, ko imamo na razpolago več neodvisnih opazovanj kot neodvisnih neznank.

Praktično uporabne rezultate lahko pridobivamo samo na osnovi predoločenega in določenega problema. Število opazovanj in tako torej tudi neodvisnih zvez med opazovanji in neodvisnimi neznankami je tako lahko samo večje ali enako številu neodvisnih neznank. Če nimamo na razpolago ustreznih geometričnih kontrol v smislu nadštevilnih opazovanj in pogojev, ki jih morajo opazovanja izpolniti, grobo pogrešenih opazovanj namreč ne moremo odkriti. Zato je vedno potrebno zagotoviti ustrezno število nadštevilnih opazovanj. V primeru nadštevilnih opazovanj imamo torej opravka s predoločenim problemom, ki ga rešimo pod pogojem, da mora biti vsota kvadratov popravkov opazovanj minimalna. Izravnavo nadštevilnih opazovanj pod tem dodatnim pogojem imenujemo izravnavo po metodi najmanjših kvadratov.



## 5.1 Predhodna ocena opazovanj

Potrebnost predhodne ocene opazovanj izhaja iz dejstva, da izravnava po metodi najmanjših kvadratov zmanjša možnost odkritja grobih pogreškov opazovanj. Predhodna analiza opazovanj v glavnem temelji na izpolnjevanju pogojnih enačb, ki jih morajo opazovanja izpolniti. Enostavne kontrole, ki jih pri tem uporabljamo, so npr.: vsota kotov v mnogokotniku, vsota niveliranih višinskih razlik v zaključenem nivelmanskem vlaku, vsota komponent baznih vektorjev v zaključenem liku itd. Osnova za vse postopke ugotavljanja prisotnosti grobih pogreškov v opazovanjih so statistični testi. Statistični testi, ki jih v tej zvezi uporabljamo, so povezani s porazdelitvijo popravkov opazovanj in njihovo skladnostjo z vnaprej predpostavljeno porazdelitvijo le-teh.

## 5.2 Ocenjevanje rezultatov izravnave

Rezultat izravnave geodetske mreže je vektor izravnanih opazovanj in vektor ocenjenih koordinat točk mreže. Pred izravnavo naj bi opazovanja popravili za vrednosti sistematičnih vplivov na opazovanja ter odstranili grobo pogrešena opazovanja iz niza opazovanj. Kljub temu pa moramo pred nadaljnjo uporabo ugotoviti, ali so pridobljeni rezultati izravnave zanesljivi. To je tudi glavna naloga ocenjevanja rezultatov izravnave.

### 5.2.1 ODKRIVANJE GROBIH POGREŠKOV

Ocenjevanje rezultatov izravnave je v glavnem omejeno na ugotavljanje in odstranjevanje grobo pogrešenih opazovanj, ki so po velikosti pogreškov »malo grobo pogrešena«. Pri tem predpostavljamo, da smo »zelo grobo pogrešena« opazovanja odstranili med samo izmero ali s predhodno obdelavo opazovanj ali z obojim. Popravki opazovanj so merilo kakovosti opazovanj ter tudi merilo kakovosti matematičnega modela, v katerega so opazovanja vključena. Teoretično naj bi bili vzrok za pojav popravkov opazovanj slučajni pogreški opazovanj. Prisotnost grobih pogreškov poveča velikost popravkov opazovanj. Izravnava po metodi najmanjših kvadratov teži k odstranitvi vpliva grobo pogrešenega opazovanja na rezultate izravnave. Tako se veliki popravki opazovanj pojavijo za opazovanja v bližini grobo pogrešenega opazovanja in ne nujno za grobo pogrešeno opazovanje.

### 5.2.2 GLOBALNI TEST MODELA IN PREGLED OPAZOVANJ

Globalni test modela in pregled opazovanj (data snooping) sta najpogosteje uporabljana postopka za ocenjevanje popravkov opazovanj. Z globalnim testom modela ugotovimo prisotnost grobih pogreškov opazovanj, s postopkom pregleda opazovanj pa lociramo grobo pogrešena opazovanja. Po izravnavi najprej izvedemo globalni test modela, s katerim testiramo skladnost referenčne variance a-posteriori  $\hat{\sigma}_0^2$  z referenčno varianco a-priori  $\sigma_0^2$ . Če je globalni testa modela neuspešen, je potreben pregled opazovanj. Pričakovana vrednost referenčne variance a-posteriori naj bi bila skladna z referenčno varianco a-priori. Pregled opazovanj je kombiniran proces odkrivanja »popravkov verjetno grobo pogrešenih opazovanj« (outlier) ter lociranja in odstranitve grobih pogreškov opazovanj.

### 5.2.3 ODKRIVANJE POPRAVKOV VERJETNO GROBO POGREŠENIH OPAZOVANJ

Na osnovi popravkov opazovanj, pridobljenih z izravnavo, ne moremo trditi, katera opazovanja so grobo pogrešena. V okviru odkrivanja grobo pogrešenih opazovanj s tehniko pregleda opazovanj predpostavljamo, da je v vektorju opazovanj samo eno opazovanje grobo pogrešeno. Kot testno statistiko uporabimo za nekorelirana opazovanja standardizirani popravek  $w_i$ , ki se porazdeljuje po standardni normalni porazdelitvi:

$$w_i = \frac{V_i}{\sigma_{v_i}}$$

Postopek »pregled opazovanj« se nanaša na enodimenzionalni test, s katerim obravnavamo naenkrat samo en standardizirani popravek. Kot stopnjo značilnosti testa običajno izberemo vrednost  $\alpha_0 = 0,001$ , ki ji pripada mejna vrednost testne statistike  $w_i = 3,29$ .  $i$ -ti popravek označimo kot popravek verjetno grobo pogrešenega opazovanja, če velja  $|w_i| > 3,29$  oziroma  $|v_i| > 3,29\sigma_{v_i}$ . Vrednost testne statistike  $w_i$  je izračunana na osnovi znane standardne deviacije opazovanja  $\sigma_{v_i}$ , kar pomeni, da je omenjeni postopek zanesljiv samo v primeru zanesljivo znanih statističnih lastnosti opazovanj.

### 5.2.4 TAU-TEST

Globalni test modela in pregled opazovanj zahtevata, da sta natančnost opazovanj in referenčna varianca a-priori znana. Če referenčne variance a-priori ne poznamo ali se na natančnost opazovanj a-priori ne moramo zanesti, uporabimo referenčno varianco a-posteriori. V tem primeru globalnega testa modela ne izvajamo in tehniko pregleda opazovanj modificiramo z uporabo nove testne statistike  $\tau_i$ :

$$\tau_i = \frac{V_i}{\hat{\sigma}_{v_i}} = \frac{V_i}{\hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{v_i, v_i}}}$$

Test uporabimo zaporedoma za vse standardizirane popravke. Težava pri uporabi tau-testa je v tem, da je referenčna varianca a-posteriori obremenjena s prisotnostjo grobih pogreškov v opazovanjih. Večji kot so grobi pogreški, večja bo vrednost za, in bolj bo zmanjševala vrednost testne statistike  $\tau_i$ . To pa poveča možnost, da ostanejo ob uporabi tau-testa grobi pogreški neodkriti, še posebej, če so majhni po svoji velikosti.

## 5.3. Merila kakovosti geodetske mreže

Poleg ugotavljanja prisotnosti grobih in/ali sistematičnih pogreškov v opazovanjih, ki jih moramo odstraniti iz podatkov opazovanj, je potrebno ovrednotiti tudi kakovost opravljene izmere. Merila kakovosti so sicer odvisna od naloge, ki jo opravljamo. Za osnovno državno geodetsko mrežo je kriterij kakovosti enakomerna natančnost mreže na celotnem področju mreže, pri geodetskih mrežah za posebne namene mora biti kakovost mreže prilagojena zahtevam, ki jih mora mreža izpolniti. V splošnem so kriteriji za presojo kakovosti razvrščeni v tri kategorije: natančnost mreže, zanesljivost mreže ter cena vzpostavitve mreže.

Natančnost ocenjenih količin je odvisna od natančnosti opazovanih količin in od geometrije geodetske mreže. Natančnost geodetske mreže je mera za s slučajnimi vplivi na opazovanja obremenjene spremenljivke v mreži v odsotnosti grobih pogreškov in sistematičnih vplivov na opazovanja.

Pri vrednotenju kakovosti geodetske mreže vrednotimo tudi zanesljivost le-te. V splošnem je pojem zanesljivosti geodetske mreže sestavljen iz zanesljivosti opravljenih operacij, ki jih moramo opraviti na poti do zanesljivih koordinat točk v mreži. Zato lahko pojem zanesljivost geodetske mreže pripišemo: usposobljenim, odgovornim in pazljivim, to je zanesljivim strokovnjakom; natančni in zanesljivi merski opremi; zanesljivim merskim postopkom in obliki geodetske mreže, ki je sposobna t.i. »samokontrole«. Nekateri od omenjenih pojmov lahko matematično opišemo, nekaterih ne moremo. Matematično lahko zanesljivost geodetske mreže opišemo kot odziv rezultatov izmere na majhne vplive na opazovanja. Zanesljivost geodetske se tako nanaša na sposobnost odkrivanja in lociranja grobih in sistematičnih pogreškov v matematičnem modelu, brez uvajanja dodatnih informacij v model.

Cena vzpostavitve mreže je pomembna pri vsaki mreži. Glede na naloge, ki jih mora geodetska mreža opravljati, je potrebno definirati tudi postopke vzpostavitve in vzdrževanja mreže. Ti postopki se med seboj lahko znatno razlikujejo, kar vodi v zelo različno ceno vzpostavitve posamezne mreže.

## 5.4 Merila natančnosti geodetske mreže

Celotno informacijo o natančnosti ocenjenih položajev točk vsebuje kovariančna matrika  $\Sigma_{\Delta\Delta}$  vektorja ocenjenih neznank (koordinat)  $\Delta$ . V splošnem ločimo merila globalne in lokalne natančnosti geodetske mreže. Globalna merila se nanašajo na celotno mrežo, lokalna merila pa na posamezne točke ali skupine točk v mreži.

### 5.4.1 GLOBALNA MERILA NATANČNOSTI GEODETSKE MREŽE

Koordinate točk mreže  $\Delta$  in kovariančna matrika neznank  $\Sigma_{\Delta\Delta}$  sta datumsko odvisni količini, kar povzroča težave v ocenjevanju natančnosti. Kovariančna matrika  $\Sigma_{\Delta\Delta}$  ima ob  $d$  datumskih parametroh, ki smo jih uporabili za zagotovitev datuma mreže, v kateri je  $u$  koordinat točk, rang  $r(\Sigma_{\Delta\Delta}) = r = u - d$ . Obstajajo tudi merila natančnosti, ki so neodvisna od datuma mreže.

Ko imamo opravka z velikimi matematičnimi modeli, je ocenjevanje natančnosti z ocenjevanjem posameznih elementov kovariančne matrike  $\Sigma_{\Delta\Delta}$  ocenjenih neznank, nepraktično. V tem primeru je smiselno povzeti natančnost v nekaj reprezentančnih merilih, ki so namenjena enostavnejši predstavitvi celotne natančnosti matematičnega modela. Ta merila so običajno podana v obliki skalarnih funkcij elementov kovariančne matrike. Tipična skalarna merila so: norma:  $f = \|\Sigma_{\Delta\Delta}\|$ , sled:  $f = \text{sled}(\Sigma_{\Delta\Delta})$ , determinanta:  $f = \det(\Sigma_{\Delta\Delta})$ , največja lastna vrednost:  $f = \lambda_{\max}$  kovariančne matrike  $\Sigma_{\Delta\Delta}$ . Med globalna merila natančnosti spada tudi poprečje vseh varianc v mreži ocenjenih koordinatnih neznank, ki ga predstavljata srednja varianca  $\bar{s}_{\Delta\Delta}^2 = \frac{1}{u} \text{sled}(\Sigma_{\Delta\Delta})$  in generalizirana varianca  $\bar{s}_{\Delta\Delta}^2 = \sqrt{\det(\Sigma_{\Delta\Delta})}$ . Če namen mreže zahteva homogeno natančnost, to zahtevo lahko zapišemo tudi v obliki  $\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \rightarrow 1$ . Vsa omenjena merila natančnosti so odvisna od geodetskega datuma mreže.

5.4.2 LOKALNA MERILA NATANČNOSTI GEODETSKE MREŽE

Vsa merila natančnosti, ki se ne nanašajo na celotno mrežo, so t.i. lokalna merila natančnosti. Taka merila so npr.: natančnost posamezne koordinate, položaja točke ali skupine točk. Tudi lokalna merila natančnosti so pridobljena iz kovariančne matrike  $\Sigma_{\Delta\Delta}$ , oziroma iz matrike kofaktorjev  $Q_{\Delta\Delta}$ . V mreži z  $m$  točkami in vektorjem koordinat  $\Delta = [\hat{x}_1 \ \hat{x}_2 \ \dots \ \hat{x}_j \ \dots \ \hat{x}_m]^T$ , kjer  $\hat{x}_j$  ( $j=1, \dots, m$ ) predstavlja podvektor koordinat točke  $i$ , ki je v dvorazsežnem prostoru dan z  $\mathbf{x}_j = \begin{bmatrix} y_j \\ x_j \end{bmatrix}$ , ( $j=1, \dots, m$ ). Matriko

kofaktorjev  $Q_{\Delta\Delta}$  točk zapišemo kot:

$$Q_{\Delta\Delta} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1i} & \dots & Q_{1m} \\ Q_{21} & Q_{22} & \dots & Q_{2i} & \dots & Q_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Q_{i1} & Q_{i2} & \dots & Q_{ii} & \dots & Q_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Q_{m1} & Q_{m2} & \dots & Q_{mi} & \dots & Q_{mm} \end{bmatrix}, \quad (41)$$

kjer je  $Q_{ii}$  ( $i=1, \dots, m$ ) matrika kofaktorjev ocenjenih koordinat točke  $i$  in  $Q_{ij}$  ( $i, j=1, \dots, m, i \neq j$ ) matrika kofaktorjev točk  $i$  in  $j$ :

$$Q_{ii} = \begin{bmatrix} q_{y_i y_i} & q_{y_i x_i} \\ q_{x_i y_i} & q_{x_i x_i} \end{bmatrix} \quad (i=1, \dots, m) \quad \text{in} \quad Q_{ij} = \begin{bmatrix} q_{y_i y_j} & q_{y_i x_j} \\ q_{x_i y_j} & q_{x_i x_j} \end{bmatrix} \quad (i, j=1, \dots, m, i \neq j) \quad . \quad (42)$$

Standardne deviacije koordinat točke so definirane kot pozitivni kvadratni koreni odgovarjajočih varianc:

$$\sigma_{y_i} = \sigma_0 \sqrt{q_{y_i y_i}} \quad \text{ali} \quad \hat{\sigma}_{y_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{y_i y_i}} \quad \text{in} \quad \sigma_{x_i} = \sigma_0 \sqrt{q_{x_i x_i}} \quad \text{ali} \quad \hat{\sigma}_{x_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{x_i x_i}} \quad . \quad (43)$$

V dvorazsežnem prostoru predstavljata standardni deviaciji  $\sigma_y$  in  $\sigma_x$  samo natančnost točk mreže v smeri koordinatnih osi  $y$  in  $x$ . Kot taki torej ne podajata celotne informacije o natančnosti položaja. Natančnost položaja v dvodimenzionalnem prostoru je dana z  $\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ , kjer je  $\sigma_p$  največja pričakovana standardna deviacija položaja točke.

Standardna absolutna elipsa pogreškov predstavlja območje zaupanja, v katerem se nahaja pravi položaj točke z verjetnostjo 39,4%. Relativne elipse pogreškov so območja zaupanja, vzpostavljena za koordinatne razlike dveh točk, z izjemo točk, ki definirajo datum mreže. Elemente relativnih elips pogreškov računamo z uporabo izrazov za izračun absolutnih elips pogreškov tako, da uporabimo za izračun elementov matrike kofaktorjev  $Q_{\Delta ij}$ , ki se nanaša na razlike koordinat točk  $i$  in  $j$ . Z relativnimi elipsami pogreškov enostavneje izvajamo analize natančnosti relativnih položajev (parov) točk v mreži.

Za geodetske mreže, vzpostavljene za posebne namene, morajo funkcije  $\mathbf{c}^T \mathbf{x}$  koordinat ene točke ali skupine točk pogosto izpolniti določene zahteve glede vnaprej

postavljenih zahtev o natančnosti. Naj bo linearna funkcija koordinat dana s

$$f = \mathbf{c}^T \mathbf{x} = \sum_{i=1}^u c_i x_i, \text{ kjer je } \mathbf{c} = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_u]^T \text{ vektor konstant. Varianco gornje funkcije}$$

izračunamo z uporabo zakona o prenosu varianc in kovarianc  $\sigma_f^2 = \sigma_0^2 \mathbf{c}^T \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{c}$ .

V primeru nelinearne funkcije uporabimo zakon o prenosu varianc in kovarianc za nelinearne funkcije. Praktičen primer za tovrstne mere natančnosti so geodetske mreže, vzpostavljene kot osnova za geodetska dela npr. pri izgradnji predorov, kjer mora biti natančnost položajev točk v prečni smeri glede na os tunela višja od vnaprej postavljenih zahtev o natančnosti preboja. Jasno je, da lahko definiramo tudi številna druga skalarna merila natančnosti.

Vsa našeta merila natančnosti so datumsko odvisna. To pomeni, da je natančnost ocenjenega položaja, standardne deviacije, elipse pogreškov,... smiselno podajati samo ob podajanju datuma mreže. Ob običajnem definiranju datuma mreže z izbiro določenega števila točk kot danih, dane količine pridobijo varianco enako nič, merila natančnosti vseh drugih točk v mreži pa naraščajo z oddaljevanjem od težišča datumskih točk. Ta vpliv je še najmanj očiten pri relativnih elipsah pogreškov. V celoti datumsko odvisnost meril natančnosti odstranimo z uporabo invariantnih funkcij položaja.

## 5.5. Zanesljivost geodetske mreže

Zanesljivost geodetske mreže se nanaša na sposobnost mreže, da se upre grobim pogreškom v opazovanjih. Običajno razlikujemo notranjo zanesljivost in zunanjo zanesljivost. Notranja zanesljivost se nanaša na sposobnost mreže, da ob testiranju statističnih hipotez odkrije grobe pogreške. Zunanja zanesljivost se nanaša na vpliv neodkritih grobih pogreškov na ocenjene vrednosti neznank in/ali funkcij le-teh. Visoka zanesljivost v splošnem pomeni, da je odziv mreže na neodkrite grobe pogreške v mreži zanemarljiv.

## 6. TRANSFORMACIJE KOORDINATNIH SISTEMOV

V geodeziji praviloma izvajamo transformacije med pravokotnimi koordinatnimi sistemi. Transformacije trirazsežnih koordinatnih sistemov v praksi najpogosteje izvajamo med terestričnimi in klasičnimi geodetskimi koordinatnimi sistemi. S temi nalogami se srečamo pri transformaciji rezultatov GPS izmere v državni koordinatni sistem. GPS izmera se nanaša na terestrične koordinatne sisteme, državni koordinatni sistem pa temelji na astrogeodetskem datumu. Koordinate točk, ki jih uporabljamo v transformacijah dvorazsežnih koordinatnih sistemov, so običajno ravninske pravokotne koordinate (y,x) Gauss-Krügerjeve projekcije ali horizontalne koordinate točk v lokalnih geodetskih koordinatnih sistemih. V primeru transformacij trirazsežnih koordinatnih sistemov pa potrebujemo pravokotne trirazsežne koordinate (X,Y,Z), ki jih pridobimo na osnovi elipsoidnih koordinat ( $\varphi, \lambda, h$ ) točk. Trojico elipsoidnih koordinat pridobimo lahko neposredno z obdelavo ustreznih (GPS) opazovanj ali pa z združitvijo horizontalnih koordinat ( $\varphi, \lambda$ ) in elipsoidne višine (h). Horizontalni koordinati točk v

državnem koordinatnem sistemu pridobimo s preračunom danih pravokotnih ravninskih koordinat  $(y,x)$  v Gauss-Krügerjevi projekcijski ravnini. Za izračun trirazsežnih pravokotnih koordinat  $(X,Y,Z)$  naj bi torej uporabljali elipsoidne koordinate točk  $(\varphi,\lambda,h)$ . V nekaterih primerih pa se izkaže, da lahko elipsoidno višino  $(h)$  točke nadomestimo tudi z ortometrično  $(H)$  ali višino točke, dano v kateremkoli tipu višin. Ker postaja transformacija koordinatnih sistemov ena od najpogostejših nalog geodeta v okviru nalog geodetske izmere, kakor tudi nalog kombiniranja podatkov o položaju, pridobljenih na različne načine, obravnavamo transformacijo koordinatnih sistemov nekoliko podrobneje.

## 6.1 Metode transformacij koordinatnih sistemov

Transformacija koordinatnih sistemov predstavlja nalogo vzpostavitve matematične povezave dveh koordinatnih sistemov. Praktično pa to pomeni vzpostavitev matematičnih izrazov preslikave položaja, danega v enem koordinatnem sistemu, v drugi koordinatni sistem. Obstaja veliko modelov transformacij trirazsežnih koordinatnih sistemov. Izbiro modela transformacije narekujejo želene lastnosti transformacijskih modelov in želene lastnosti transformiranih položajev točk. Lastnosti modela transformacije podajajo transformacijski parametri. Transformacijski parametri so lahko vnaprej znani ali pa jih ocenimo na osnovi koordinat točk, danih v obeh koordinatnih sistemih. Za določitev  $k$  transformacijskih parametrov je najmanjše število koordinat točk, danih v obeh sistemih, enako  $k$ .

V geodeziji uporabljamo naslednje transformacije koordinatnih sistemov:

- **afina transformacija** transformira preme linije v preme linije in ohranja vzporednost. V splošnem pa se spremeni velikost, oblika, položaj in orientacija linij v koordinatnem sistemu. Merilo je odvisno od smeri linije v koordinatnem sistemu.
- **podobnostna transformacija** prav tako transformira preme linije v preme linije in ohranja kote. Merilo je neodvisno od smeri linije, dolžine linij in položaji točk v mreži pa se lahko spremenijo.
- **ortogonalna transformacija** je podobnostna transformacija, pri kateri je merilo enako enoti. Koti in razdalje med točkami se ne spremenijo, spremenijo se položaji točk v koordinatnem sistemu.

Kriteriji za odločitev, katero od omenjenih transformacij uporabimo v posameznem primeru, so številni in temeljijo na predpostavkah. Pogost kriterij pri izbiri modela transformacije je razmerje med številom transformacijskih parametrov in številom koordinat skupnih točk. V primeru transformacije rezultatov GPS izmere v državni koordinatni sistem najpogosteje uporabljamo podobnostno transformacijo trirazsežnih koordinatnih sistemov.

V primeru te transformacije je zveza med koordinatnima sistemoma dana s 7 transformacijskimi parametri:

- s tremi premiki med koordinatnima sistemoma,
- s tremi zasuki med koordinatnima sistemoma in
- z enim razmerjem enote dolžin med koordinatnima sistemoma.

Razlogi za izbiro podobnostne transformacije pri nalogah transformacij med terestričnimi koordinatnimi sistemi in koordinatnimi sistemi klasične geodezije so v tem, da imata koordinatna sistema različni izhodišči, različno orientacijo koordinatnih osi ter, zaradi uporabe različnih merskih tehnik za njuno praktično realizacijo, različno merilo. To transformacijo uporabljamo pod predpostavko, da v koordinatnih sistemih ni sistematičnih deformacij, saj odstranjuje lokalne deformacije merila in orientacije, kar

pa ni vedno možno predpostaviti. Kljub temu je ta transformacija najpogosteje uporabljena transformacija v geodeziji tudi zato, ker imajo transformacijski parametri jasen geometrijski pomen.

## 6.2 Matematični model podobnostne transformacije

Funkcionalni model podobnostne transformacije med npr.  $G$ -astrogeodetskim in terestričnim  $CT$  koordinatnim sistemom, oziroma vektorjema koordinat  $\mathbf{X}_G$  in  $\mathbf{X}_{CT}$ , je dan z izrazom:

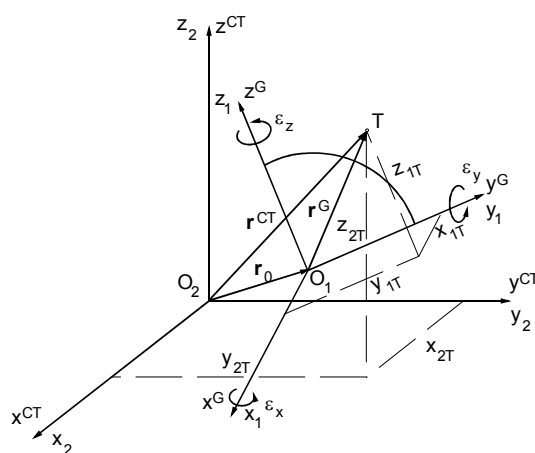
$$\mathbf{X}_{CT} = m\mathbf{R}\mathbf{X}_G + \mathbf{T} \quad ,$$

kjer je  $\mathbf{R}$  ortogonalna rotacijska matrika,  $m$  kvocient enote merila sistema  $G$  glede na sistem  $CT$ ,  $\mathbf{T}$  vektor premika izhodišča  $G$  koordinatnega sistema glede na  $CT$  koordinatni sistem. Rotacijska matrika  $\mathbf{R}$  je sestavljena iz produkta rotacijskih matrik, ki predstavljajo zasuke okrog posameznih koordinatnih osi  $G$  koordinatnega sistema do lege, ko so vzporedne s koordinatnimi osmi  $CT$  sistema. Ker sta oba koordinatna sistema desnosučna, je kot zasuka pozitiven v protiurni smeri. Rotacijsko matriko lahko pridobimo na več načinov. V praksi je najpogosteje v uporabi t.i. kardanska rotacijska matrika, ki jo dobimo z množenjem rotacijskih matrik v naslednjem vrstnem redu:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\omega)\mathbf{R}_y(\psi)\mathbf{R}_x(\varepsilon) \quad .$$

Rotacijske matrike za kote rotacij  $\varepsilon_x, \psi, \omega_z$  okrog osi  $x_G, y_G, z_G$  so:

$$\mathbf{R}_z(\omega) = \begin{bmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{R}_y(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix}; \mathbf{R}_x(\varepsilon) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon & \sin \varepsilon \\ 0 & -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{bmatrix}$$



Slika 2:  $G$  in  $CT$  koordinatni sistem

Vrstni red rotacij je pomemben, razen v primeru, ko so koti rotacij majhni. Za majhne vrednosti kotov rotacij lahko uporabimo približno kardansko rotacijsko matriko, ki jo lahko uporabimo za vrednosti kotov zasukov do velikosti  $10''$ :

$$\mathbf{R} \approx \begin{bmatrix} 1 & \omega & -\psi \\ -\omega & 1 & \varepsilon \\ \psi & -\varepsilon & 1 \end{bmatrix} \quad .$$

Na vrednost faktorja merila  $m$  vplivajo spremembe položajev med točkami po transformaciji in oddaljenost točke od koordinatnega izhodišča.

### 6.3 Izravnava transformacije

Za izravnavo transformacije je primeren splošni model izravnave, ki omogoča skupno obravnavo opazovanj in neznank. V primeru transformacije obravnavamo koordinate točk, dane v obeh koordinatnih sistemih kot opazovanja s pripadajočo informacijo o natančnosti, neznanke so transformacijski parametri.

Rezultat izravnave transformacije sta dva niza koordinat, ki ju povezujejo ocenjene vrednosti transformacijskih parametrov. Merilo, orientacija in položaj posameznega koordinatnega sistema v prostoru ostanejo po transformaciji nespremenjeni. Spremenijo pa se koordinate, dolžine in koti med točkami v posameznem koordinatnem sistemu. Premiki točk v mreži so običajno majhni in ne spreminjajo narave transformiranega lika (geodetske mreže).

Matematično predstavlja podobnostno transformacijo zvezna funkcija,; zamenjava zvezne funkcije s končnim številom diskretnih točk lahko vodi do napak. Natančnost v postopku izravnave transformacije ocenjenih transformacijskih parametrov je odvisna tudi od prostorske razporeditve točk. Za zanesljivo rešitev je pomembno, da so točke prostorsko enakomerno razporejene, sicer bomo dobili rešitev, ki bo značilna za področje z večjo gostoto točk.

V praksi imamo pogosto opravka s primeri, ko so deli obravnavanega območja neenakomerno deformirani. V takem primeru je primerno določiti več nizov lokalnih transformacijskih parametrov, ki veljajo za posamezna lokalna področja, vendar z upoštevanjem pogoja o potrebnem številu nadštevilnih opazovanj. Transformacijski parametri, določeni za večja področja, predstavljajo namreč srednje vrednosti transformacijskih parametrov med obema koordinatnima sistemoma. Tako določene vrednosti pa poskušajo odstraniti lokalne deformacije obravnavanega območja. Celotno območje naj bi torej razdelili na dele, za katere bi določali transformacijske parametre.

Pri ugotavljanju vrednosti transformacijskih parametrov je potrebno transformacijskim parametrom posameznega dela območja nameniti ustrezno pozornost, s katero naj bi ugotovili ali so vrednosti transformacijskih parametrov sploh značilno različne od 0. Če ugotovimo, da so vrednosti transformacijskih parametrov značilno enake 0, privzamemo za vrednosti transformacijskih parametrov kar vrednosti, enake 0. Med transformacijskimi parametri pa je za geodezijo najpomembnejše ocenjeno merilo med sistemoma, zato jo je potrebno izvesti dovolj obširno.

#### **Pri ocenjevanju faktorja merila je tako potrebno ugotoviti:**

- ali je merilo, določeno iz posamezne dolžine med parom točk, skladno s skupnim merilom na obravnavanem območju; pri tem lahko uporabimo običajne teste za ugotavljanje prisotnosti grobih pogreškov,
- ali so dolžine enega dela območja skladne z drugim delom,
- ali so stranice v določeni smeri skladne z ostalimi stranicami,
- če imamo dovolj podatkov, območje razdelimo na posamezna območja in ugotavljamo skladnost lokalnega merila območja s skupnim merilom celotnega območja.

Naslednje, kar nas zanima, je obravnava popravkov koordinat, izračunanih kot razlika koordinat pred transformacijo in, na osnovi ocenjenih transformacijskih parametrov,



preračunanih koordinat. Če popravki niso normalno porazdeljeni, lahko sklepamo na prisotnost sistematičnih in/ali grobih pogreškov koordinat. Zato naj bi po opravljeni izravnavi s postopkom pregleda opazovanj ugotovili prisotnost teh pogreškov v vsaki koordinati. Natančnost transformiranih koordinat je odvisna od natančnosti koordinat, ki smo jih uporabili za oceno transformacijskih parametrov ter od natančnosti ocene transformacijskih parametrov.

## 7. DETAJLNA GEODETSKA IZMERA

### 7.1 Splošno o izmeri detajla

Detajl sestavljajo objekti, komunikacije, vodotoki, meje kultur itd., ki se nahajajo na terenu, snemajo pa se z namenom, da jih prikažemo v načrtu. Za detajlno izmero (snemanje detajla) pa predstavlja osnovo niz detajlnih točk, ki jih bomo na terenu posneli in nato na načrtu povezali in dobili željeni objekt, komunikacijo itd. Skupina detajlnih točk na idealizirani način definira objekt oz. obliko zemeljskega površja. To npr. pomeni, da predstavljajo vogali nekega objekta detajlne točke, ki jih moramo na terenu posneti za prikaz tega objekta na načrtu. Vse krive linije detajla ( obale vodotokov, meje kultur, ... ) se snemajo v točkah, ker se le-te lomijo. Razdalja med temi točkami mora biti najmanj tolikšna, da daljica dveh sosednjih točk ne odstopa od krive linije, ki jo daljica aproksimira, več kot 0,2 mm pomnoženo z merilom načrta.

Prometne objekte ( ceste, železnice ) snemamo običajno po prečnih profilih tako na gosto, da lahko na načrtu pravilno pokažemo potek objekta. Za konstrukcijo krivine so potrebni vsaj trije profili in sicer na začetku, sredini in na koncu krivine. Za načrte v merilih 1 : 500 razdalje med profili ne smejo presegati 50 metrov. Profil je potrebno posneti tudi na vseh vertikalnih lomih trase ceste oz. železnice.

Pri snemanju železniških prog v omenjenem merilu moramo posneti rob nasipa, vrh nasipa, oba robova vozišča, odtočne jarke, dno in vrh useka. Na železnicah posnamemo poleg usekov in nasipov tudi osi tirov in vse železniške objekte: kretnice, signale, semaforje, železniške kamne, table, telefonske oz. električne stebre, itd. Vse navedene objekte snemamo z eno točko in jih označimo na skici z ustreznim topografskim simbolom. Ceste snemamo podobno kot železnice. Gozdne ali poljske poti snemamo po robu, izmerimo širino, pri pomembnejših poteh pa snemamo oba robova. Tudi manjše odvodne jarke in manjše nasipe snemamo z eno točko, ki je bodisi na robu ali v sredini, v skico pa vpišemo širino in globino jarka oz. širino in višino nasipa.

Snemamo tudi meje med naravnim terenom in zgrajenimi objekti ( useki, vkopi, jamami, deponijami itd. ). Naravne terase na terenu se snemajo z eno linijo ( če je podporni zid bolj ali manj vertikalen ) po zgornjem ali spodnjem robu podpornega zida, v skici pa moramo označiti globino oz. višino terase. Če imamo raven drevored, posnamemo prvo in zadnje drevo, vmesna odmerimo s trakom in jih označimo z ustreznim topografskim znakom. Mostove snemamo tako, da posnamemo vse karakteristične točke obalnih stebrov, stebre v vodi pa odmerimo po osi mosta. V skico vpišemo tudi širino mosta. Manjše mostove je možno posneti samo z dvema točkama na začetku in koncu mosta.

Kopenske vode snemamo po možnosti ob nizkem vodostaju, ker lahko tako posnamemo več rečnega ali jezerskega korita. Posneti moramo točke na robovih korita in točke ob vodni gladini v času merjenja. Kraška polja se snemajo v sušnem obdobju.

Ob morski obali snemamo poleg obale še črto gladine morja ob plimi in črto, do katere sežejo največji valovi. Poleg tega posnamemo še vse stalne objekte, kot so pomoli, marine, zaščitni zidovi itd. Hudourniške grape snemamo z vsemi karakterističnimi točkami, pri reguliranih hudournikih pa snemamo vse kaskade in eventualne jezove. Na terenu posnamemo tudi vse izvire in vodnjake.

Pri stavbah snemamo vogale stavb, t.j. lomne točke tlorisa, in sicer tam, kjer se stavba stika s terenom. V skici moramo označiti namen stavbe (stanovanjska, gospodarska, garaža, itd.) in vpisati kontrolne mere (fronte) objekta, ki jih izmerimo s trakom. Vsako stavbo merimo posebej, tudi če se stavbe med seboj stikajo. Isto stavbo tudi ločimo na dva dela, če vsak del služi drugemu namenu (stanovanjski ali gospodarski del). Pri stavbah na stebrih posnamemo stebre in projekcijo tlorisa stavbe na teren. To projekcijo označimo črtkano. Analogno posnamemo in narišemo razne okrase in balkone na objektu. Pri snemanju v merilu 1 : 500 posnamemo tudi zunanja stopnišča, svetlobne jaške, terase in druge zidane detajle. Stavb iz slabega materiala, ki nimajo temeljev, ne snemamo. Na posnete stanovanjske in druge stavbe s hišno številko vpišemo na skici hišno številko na tisto mesto, kjer se nahaja številka na stavbi. Stavbe v gradnji snemamo, če so že pozidani temelji stavbe, ruševine pa le, če so zidovi še ohranjeni in trdni. Na dvoriščih posnamemo dvoriščne stavbe iz trdnega materiala, silose, greznice, cisterne in drugo. Na splošno velja pravilo, da moramo na terenu posneti vse tiste objekte, ki jih bomo pri izdelavi geodetskega načrta lahko kartirali. Topografski načrt, ki je končni izdelek izmere, mora biti prava slika terena in objektov.

Izbira točk za **višinsko predstavo** je prav tako pomembna kot pri horizontalni izmeri. Najprej posnamemo značilne točke na grebenu (razvodnica) in v dolini (odvodnica). Med njimi pa posnamemo značilne točke prelomov na padnicah in prevojnica. Razdalja med detajlnimi točkami je odvisna od merila predvidenega načrta:

<i>Merilo</i>	<i>Maksimalna razdalja</i>
1 : 1000	30 m
1 : 2000, 1 : 2500	50 m
1 : 5000	100 m

**Tabela 2:** Največja dopustna oddaljenost med detajlnimi točkami

V naravi so vse linije praktično krive linije. Za snemanje krivih linij velja podobno pravilo kot za snemanje tlorisa objektov matematičnih oblik. Velja pravilo: če je razdalja med tetivo in linijo terena manjša od 0,2-kratnika ekvidistance plastnic, vmesne točke ni potrebno posneti. Kadar ima teren majhen naklon, je težko določiti karakteristične linije. V takem primeru posnamemo detajlne točke za vertikalno predstavo po profilih. Profile izbiramo vzporedno ali pravokotno na naravne linije ali linije geodetske mreže (npr. oligonsko stranico, pot ali potok).

**Katastrska izmera** ima s tehničnega vidika posebne dodatne zahteve.

**Pri snemanju detajla ločimo točke glede na pomembnost na:**

- mejne točke posesti in
- mejne točke kultur in ostalega detajla.

Točke posestnih mej so najpomembnejše, saj razmejujejo lastništvo in so osnova za zemljiško knjigo in ta posredno za obdavčitev. Zato morajo biti posestne meje določene z najvišjo predpisano natančnostjo. Meje kultur in ostale detajlne točke pa so v notranjosti posestnih meja in zato jih določamo z manjšo natančnostjo. Posebej se pri katastrski izmeri snemajo posebni objekti v večjem merilu (npr. objekti, katerih lastništvo je zaradi njihovega položaja sporno). Poleg detajla, ki bo posnet, se zberejo še osebni podatki za identifikacijo lastnikov in drugi pomembni podatki, kot so katastrske kulture, hišne številke, imena ulic, imena voda, vrste prometnic (kategorija in katera naselja povezuje) in osebni podatki o lastniku (osebe ali družbe). Vsi ti podatki se vpišejo na parcelo, na katero se nanašajo. Če lastnik poseduje več parcel v isti katastrski občini, se ti podatki vpišejo le enkrat na najprimernejšem mestu. Če pa je parcela premajhna, da bi se lahko vpisali vsi podatki o lastniku, se to lahko izpiše na hrbtni strani skice.

## 7.2 Metode klasične terestrične detajlne izmere

Najstarejši način detajlne izmere je grafična izmera z mersko mizo, med **grafične metode** pa prištevamo tudi analogno fotogrametrijo. Klasične grafične metode so danes že zastarele, vendar jih omenjamo predvsem zato, ker je še vedno večina Slovenije pokrita s katastrskimi načrti v merilu 1 : 2880, ki so bili izdelani grafično. Ta metoda ima nekaj prednosti. Načrt izdelamo sproti s snemanjem na terenu (podobno kot danes z uporabo peresnega računalnika ob podpori ustrezne programske opreme). To nam omogoča takoj na terenu kontrolirati pravilnost oblike in velikosti ter višinske predstave snemanega terena. Pri uporabi grafično izdelanih načrtov razpolagamo le z grafično natančnostjo, ki je bistveno manjša od numerične, načrt je izdelan le v enem primeru(izvodu??); povečava nam sicer daje večjo sliko, ne pa tudi večje natančnosti.

**Numerične metode** so novejšje od grafičnih in imajo številne prednosti, npr. na terenu zajemamo numerične podatke izmere, s katerimi lahko kartiramo v poljubnem merilu in lahko vodimo numerični kataster, ki je bistveno točnejši od grafičnega. Ob klasičnem načinu vodenja skice izmere nastaja načrt v pisarni in ni direktne kontrole. Glede na način zajemanja in vrsto numeričnih vrednosti ločimo ortogonalno metodo in polarno metodo. Do uveljavitve elektrooptičnih razdaljemerov je bila **ortogonalna metoda** mnogo natančnejša od polarne metode. Zlasti v naseljih je zagotavljala zahtevano natančnost. Metoda sloni na izmeri pravokotnih koordinat v lokalnem koordinatnem sistemu. Merski pribor je enostaven in poceni. Za vzpostavitev pravokotnic uporabljamo peterorobe prizme. Z dvema merskima trakoma merimo abscise in ordinate detajlnih točk. Izhodišče predstavlja poligonska ali linijska mreža. Rezultat je situacijski načrt. Za zajem merskih podatkov za višinsko predstavo se je uporabljal detajlni nivelman.

**Polarno metodo** izmere imenujemo tudi *tahimetrija*, kar pomeni hitro snemanje. Metoda je v primerjavi z ortogonalno metodo bistveno hitrejša. Na terenu zajemamo lokalne polarne prostorske koordinate detajlnih točk. Geometrična osnova izmere je navezovalna ali poligonska mreža. Horizontalne kote in zenitne razdalje merimo s teodolitom, dolžine pa z optičnim razdaljemerom - trinitnim ali avtoredukcijskim, predvsem pa z elektronskim razdaljemerom. Optični razdaljemerji - tahimetri so izredno hitri, žal pa imajo manjšo natančnost. Elektronski razdaljemerji pa združujejo dobre lastnosti obeh predhodnih metod, so natančni in izredno hitri. Elektronski tahimeter je danes nepogrešljiv instrument za polarno izmero.

Kratko opišimo **postopek polarne izmere**. Klasično ekipo sestavljata dva strokovnjaka in eden ali dva figuranta. Z uporabo sodobne tehnologije je mogoče število članov ekipe zmanjšati. Peresni računalnik ob podpori ustrezne programske opreme (*Liscad*, *Topocad*, ...) omogoča, da ista oseba upravlja z instrumentom in vodi skico. To

največkrat ni dobro, saj je nemogoče s stojišča instrumenta kvalitetno izbirati mesta detajlnih točk. Z dodatno uporabo motoriziranih elektronskih tahimetrov s sistemom za razpoznavanje reflektorja (*ATR*) in možnostjo krmiljenja instrumenta preko radijske zveze (povezava instrument-reflektor) teoretično lahko polarno detajlni izmero izvaja en sam človek.

Pri klasičnem načinu oseba, ki vodi skico izmere, najprej v približnem merilu s svinčnikom skicira detajl. Pri tem postopa po znanem principu "iz večjega v manjše". Najprej nariše velike parcele in objekte, ki jih kasneje dopolni z manjšimi elementi in detajlom. Instrument je centriran na izbrani točki mreže in orientiran proti drugi dani točki. Sodobni tahimetri omogočajo tudi tako imenovano *prosto stacioniranje* (postavitev instrumenta na poljubno mesto z navezavo na dve dani točki – posebni primer notranjega ureza). Vodja skice določi detajlno točko, na katero figurant postavi lato ali reflektor. Operater opravi meritve potrebnih količin. Pri avtoreduktorjih in elektronskih tahimetrih registriramo: horizontalno razdaljo, višinsko razliko in horizontalni kot. Posnete točke se na skici oštevilčijo od 1 - 999. Po končanem snemanju na eni točki operater ponovno kontrolira orientacijsko smer. Posneti detajl moramo kontrolirati z odmerjanjem na terenu. Tu uporabljamo fronte in križne mere. Če za izmero uporabljamo optični razdaljemer, zaradi manjše natančnosti merjenih dolžin zaokrožimo vse kontrolne meritve na 0,1 m.

Pri snemanju razgibanega t

Natančnost polarne izmere je podana z natančnostjo smernega kota in dolžine. Obe natančnosti morata biti usklajeni. Natančnost dolžine nam definira pogrešek v smeri proti detajlni točki, natančnost horizontalne smeri pa pogrešek pravokotno na smer proti točki. Če poznamo natančnost merjenja dolžin in kotov, lahko računamo, do katere razdalje lahko snemamo točke, da pogrešek, ki ga povzroči nenatančnost kota, ne presega pogreška nenatančnosti merjenja dolžin. Običajno so maksimalne dolžine, do katerih lahko snemamo posamezne vrste detajlnih točk, predpisane.

### 7.3 Uporaba GPS tehnologije v detajlni geodetski izmeri

Enostavna uporaba in hitro pridobivanje rezultatov izmere z GPS tehnologijo narekuje postopno uveljavljanje le-te na praktično vseh področjih geodetske izmere. Primer je uporaba GPS metod izmere v topografski in zemljiško katastrski izmeri, kjer je poleg zelo pomembnih upravnih postopkov določanje položaja točk in s tem velikosti zemljišč pomembna in občutljiva tema. V postopkih, ki se nanašajo na zemljiški kataster in agrarne operacije, je prisotnost geodetske stroke neizogibna. Ker pa so to dolgotrajni postopki, ki zahtevajo usklajevanje med geodetsko stroko in prizadeto stranko, imajo metode pridobivanja koordinat točk že med samo izmero pomembno mesto. Osnovno določilo zemljiškega katastra je povezovanje stanja v naravi z zemljiško-katastrskimi načrti. Hitro pridobivanje koordinat točk ter enostavno ažuriranje drugih atributov so prednosti, ki drugod in tudi pri nas pomenijo prednost uporabe GPS metod izmere v zemljiškem katastru.

Za detajlno izmero je pomembna GPS-RTK metoda izmere. Kot smo omenili, pri tej metodi izmere pridobimo rezultate opazovanj, to je položaj in natančnost položaja, že v času izmere. Ta metoda ima v katastrski izmeri, kot tudi v nalogah inženirske geodezije, posebno mesto, saj omogoča hitro zakoličevanje oziroma ponovno vzpostavitev uničenih geodetskih točk. Prednost metode je v hitrejši izvedbi izmere (tudi 5-6 krat), če jo primerjamo s tradicionalnimi geodetskimi metodami.

**GPS izmera za potrebe detajlne geodetske izmere in zemljiškega katastra temelji na nekaterih zakonitostih, ki slonijo na naslednjih izhodiščih:**

- najprej je potrebno vzpostaviti mrežo referenčnih točk v koordinatnem sistemu, na katerega se nanašajo GPS opazovanja. Te točke bodo služile kot referenčne točke pri izvedbi detaljne izmere. Delovišče naj se nahaja znotraj območja, ki ga določajo referenčne točke. S tem bo kakovost novo določenih točk odvisna od kakovosti mreže referenčnih točk. Z obsežnimi testiranjmi v tujini je bilo dokazano, da je pri enakomerni razporeditvi kontrolnih točk gostota 1 kontrolne točke / 45 km<sup>2</sup> dovolj za izvedbo RTK metode izmere za potrebe zemljiškega katastra;
- natančnost položaja referenčnih točk je, tako kot pri drugih metodah izmere, zelo pomembna, saj je položaj novih točk (znotraj delovišča) določen glede na te točke. To pomeni, da moramo določiti položaje referenčnih točk z natančnejšimi metodami GPS izmere;
- za detaljno izmero je na voljo več metod GPS izmere. Da bi se izognili problemom RTK metode izmere, predvsem problemom v radijski komunikaciji, je metoda uporabna le na razdaljah do 5 km od referenčne točke. V primeru gostote točk (1/45km<sup>2</sup>) je pogoju zadoščeno, saj je razdalja med sosednjima referenčnima točkama približno 10 km. Konfiguracija terena je odločilni faktor, ki omogoča ustrezno komunikacijo med referenčnim in mobilnim sprejemnikom;
- v primeru velike oddaljenosti delovišča od referenčne točke (nekaj kilometrov) bi bilo smiselno v bližini referenčne točke (približno 100m) vzpostaviti kontrolno točko, katere funkcija bi bila naslednja: preden bi operater zapustil območje referenčne točke, bi na tej točki preveril natančnost meritev in pravilno delovanje sistema za izvedbo RTK-GPS metode izmere. Pred končano izmero bi operater zopet preveril pravilnost meritev na tej točki in šele nato končal izmero na referenčni točki;
- lokacija geodetskih točk, kjer se bodo izvajala GPS opazovanja, naj bi omogočala neoviran sprejem satelitskih signalov in, v primeru RTK-GPS metode izmere, nemoteno radijsko komunikacijo med referenčnim sprejemnikom in mobilnim sprejemnikom;
- referenčne točke naj bi imele določen položaj v terestričnem koordinatnem sistemu, v državnem koordinatnem sistemu ali v lokalnem koordinatnem sistemu. V obeh primerih bi bili transformacijski parametri izračunani na osnovi koordinat vsaj treh točk v dveh koordinatnih sistemih. Točke, na katerih bi slonela transformacija v državni koordinatni sistem, naj bi bile izbrane v okolici ali znotraj delovišča.

Uporaba različnih postopkov v okviru detaljne izmere za potrebe zemljiškega katastra, inženirske geodezije,... in možnost izrabe prednosti RTK-GPS metode izmere so opisane spodaj.

**Geodetska dela, kjer bi bila smiselna uporaba GPS tehnologije za namen pridobivanja rezultatov v času izmere, so naslednja:**

- mejni ugotovitveni postopek in prenos meje,
- istočasna izvedba parcelacije, izračun površine parcel in vzpostavitev meje,
- določanje površin parcel,
- agrarne operacije: arondacije, komasacije, melioracije,
- komasacije - določitev površine parcel in istočasna vzpostavitev mej,
- arondacije - izmera površine parcel,
- obnova v naravi uničenih točk, ki v katastrskih načrtih obstajajo,
- vzpostavitev nove točke; koordinate, pridobljene med izvedbo izmere, shranimo, prenesemo v zemljiško-katastrski načrt,
- vključitev točk, določenih z GPS izmero, v lokalni ali državni koordinatni sistem,
- iskanje na terenu uničenih mejnih znamenj; te iščemo v skladu s stanjem, v okviru sistema grafične izmere, v državnem ali lokalnem koordinatnem sistemu,
- zakoličba koordinat točk v nalogah inženirske geodezije,
- izmera profilov,
- izmera za izračun volumnov,
- spremljanje položaja premičnega objekta s centimetrsko natančnostjo,...

### 7.3.2 NATANČNOST GPS METOD IZMERE

V primeru uporabe GPS metod izmere za namene detajlne izmere, zemljiškega katastra in inženirske geodezije kombiniramo v posameznih fazah različne metode izmere. Za določitev položajev točk v okolici delovišča uporabljamo statično metodo izmere, za izmero detajla pa manj natančno kinematično RTK-GPS metodo izmere. Proizvajalci GPS opreme zagotavljajo centimetrsko natančnost RTK-GPS metode izmere, vendar je slednjo z danim instrumentarijem na testnem delovišču smiselno preizkusiti. V izmerah za potrebe zemljiškega katastra ima horizontalna natančnost položaja večji pomen kot višinska natančnost. Situacija v višinskem smislu je predstavljena le s plastnicami. Nasprotno pa je nekaterih nalogah topografske izmere in inženirske geodezije višinska natančnost točke zelo pomembna. V teh primerih je potrebno jasno opredeliti, v katerem tipu višin so podane višine točk.

Obsežna raziskovanja v tujini in pri nas so pokazala, da se na razdalji od 0-3 km od referenčnega sprejemnika standardna deviacija horizontalnega položaja giblje med  $\sigma_T = 1-2$  cm, 3-6 km od referenčnega sprejemnika pa med  $\sigma_T = 2-3$  cm. Ta natančnost vključuje tudi pogrešek centriranja antene. RTK-RTK metoda izmere omogoča doseganje visoke absolutne natančnosti položajev točk, vendar so zahteve zemljiškega katastra predvsem v visoki relativni natančnosti položajev točk. Gre za primerjavo in hkrati upoštevanje položajev sosednjih točk ter tudi točk sosednjih zemljišč.

**Za zagotovitev primerne relativne natančnosti izvedemo izmero ob upoštevanju naslednjega:**

- Položaj pomembnih detajlnih točk je potrebno določiti dvakrat. Priporočljivo je, da je določitev položajev točk opravljena popolnoma neodvisno. Ker nam RTK-GPS metoda nudi možnost pridobivanja položajnih podatkov že ob izvedbi izmere, lahko med izmero odkrivamo grobe pogreške, ki se ob izmeri lahko pojavijo. Če je pogrešek odkrit, izvedemo opazovanje in določitev položaja točke še v tretje.
- Velika razdalja med referenčnim stojiščem in premikajočo enoto lahko povzroči, da bodo odstopanja novo določenega položaja večja od pričakovanega. Zato je potrebno določiti zgornjo mejo, do katere lahko obravnavamo rezultate opazovanj kot "dobre".
- Če je pri zakoličevanju mej parcel potrebna natančnosti položaja, pridobljenega z RTK metodo izmere, izpolnjena, je vseeno smiselno poleg danih točk preveriti tudi točke sosednjih parcel in jih ponovno določiti. Podatke sosednjih točk je potrebno primerno označiti in jih v elaboratu shraniti. Če so obstoječe točke dane v državnem ali lokalnem koordinatnem sistemu, je potrebno izvesti transformacijo med državnim ali lokalnim in terestričnim koordinatnim sistemom.
- Vsaka parcela ima, geometrično vzeto, obliko zaključenega lika. Iz praktičnih razlogov in za namen odkrivanja grobih pogreškov se je smiselno vrniti na točko, kjer smo opazovanja začeli, in preveriti položaj s tistim, ki smo ga pridobili na začetku opazovanj.
- 

### 7.3.2 DETAJLNA GPS IZMERA

Programska oprema merskega instrumentarija nam običajno omogoča vnos atributov detajlnih točk, kar je praktično in uporabno pri naknadni obdelavi terenske izmere. Pri detajlu je pomembno razlikovati objekte detajla, kjer je praktično nemogoče izvajati GPS opazovanja (vogali hiše), in detajl, kjer je položaj hitro in nemoteno določen. V prvem primeru detajl določimo s pomočjo klasičnih metod izmere in ga kasneje vključimo v načrt izmerjenega območja.

Programska oprema merskega instrumentarija nam omogoča tudi izračun razdalje, naklona, višinske razlike, itd. med točkama. V primeru izmere detajla lahko z merskim trakom preverjamo natančnosti na osnovi koordinat točk, pridobljenih z GPS metodo izmere izvedenih količin, kot so razdalje (npr.: stranice objekta,...). Nekatere izračunane razdalje je smiselno dopolnjevati z dolžinami, pridobljenimi z merskim trakom.

**Detajl lahko snemamo na dva načina:**

- točkovno: kjer operater določi, kaj naj bo točka detajla (tu gre za točkovne, linijske in arealne objekte);
- linijsko: kjer lahko uporabimo možnost kontinuiranega shranjevanja točk detajla glede na dva kriterija. Prvi je dolžinski, kjer vnaprej postavimo dano vrednost dolžinskega odstopanja od predhodne točke, da se položaj točke detajla avtomatsko shrani. Drugi kriterij je časovni, kjer določimo časovni interval shranjevanja točk detajla.

Točke detajla lahko shranjujemo torej avtomatsko (glede kriterij) ali pa ročno. Pomemben podatek poleg položaja in natančnosti položaja so tudi atributi detajlne točke. Izmera detajla zahteva sprotno dopolnjevanje terenske skice. Nekatere izvedbe merskega instrumentarija imajo vključen tudi terenski računalnik z možnostjo dopolnjevanja skice in vnosa drugih atributov že ob snemanju detajla. Gre za to, da je po končani izmeri na terenu celotno delo zaključeno, rezultat tega pa je lahko že načrt območja. Pri izmeri detajla je dobro poznati možnosti programske opreme merskega instrumentarija. Kot zelo primerne in uporabne se izkažejo rutine za izračun razdalj, linij, pravokotnic, krožnih lokov,... ki jih velja s pridom uporabljati.

### 7.3.3 PROSTO DOLOČANJE POLOŽAJA

V okviru prostega določanja položaja obravnavamo situacijo, ko na delovišču (območju izmere, parceli,...) nimamo točk s položaji, danimi v državnem koordinatnem sistemu. Na osnovi GPS opazovanj lahko pridobimo položaj v enem od globalnih koordinatnih sistemov, če je le območje primerno za izvedbo GPS izmere. V takem primeru je problem v tem, da imamo koordinate dane le v terestričnem koordinatnem sistemu in je vključitev teh opazovanj v lokalni ali državni koordinatni sistem problematičen.

Problem lahko poskušamo rešiti na naslednji način:

- v bližini delovišča poiščemo geodetske točke z danimi koordinatami v državnem koordinatnem sistemu in na osnovi GPS izmere teh točk pridobimo položaje v terestričnem koordinatnem sistemu ter nato izračunamo transformacijske parametre za transformacijo nove točke v obstoječi topografski ali zemljiško-katastrski načrt,
- če v bližini ni geodetskih točk, uporabimo transformacijske parametre širšega območja.

Če tudi uničenih točk ni mogoče odkriti, nam preostane le še možnost vključitve točke na osnovi transformacijskih parametrov širšega območja.

### 7.3.4 PRIHODNOST GPS IZMERE V ZEMLJIŠKEM KATASTRU

Z GPS metodami izmere so določeni položaji točk dani v globalnem koordinatnem sistemu, s pomočjo transformacijskih parametrov pa so lahko preračunani tudi v lokalni in državni koordinatni sistem. Univerzalnost in prednost uporabe GPS metod izmere je v

tem, da so položaji točk določeni v enotnem koordinatnem sistemu. Uporaba GPS-a v katastrski izmeri bo omogočila poenotenje koordinatnega sistema zemljiškega katastra na celotnem državnem ozemlju.

Znano je, da so bili položaji točk zemljiškega katastra v različnih obdobjih določeni v različnih koordinatnih sistemih (Krimski, Schöckelski,...), in da je transformacija koordinat točk iz enega v drugi koordinatni sistem občutljiva naloga, predvsem v smislu zmanjševanja natančnosti položajev točk. Če bi želeli izvajati transformacijo v lokalni ali državni koordinatni sistem, bi bilo v elaboratu izmere smiselno shranjevati tudi položaje točk, pridobljene v globalnih koordinatnih sistemih, ter obdobje izvedbe opazovanj. S postopnim pridobivanjem koordinat zemljiškokatastrskih točk v terestričnem sistemu bi v prihodnosti z visoko natančnostjo poenotili numerični del zemljiškega katastra.

Trenutno je določanje položajev točk zemljiškega katastra v terestričnem koordinatnem sistemu neopredeljeno. Kljub vsemu pa izmero lahko izvedemo v terestričnem sistemu, vendar moramo koordinate točk transformirati v državni koordinatni sistem. Položaj točke transformiramo v državni koordinatni sistem na osnovi transformacijskih parametrov, izračunanih na osnovi koordinat točk na samem delovišču. Druga možnost je, da privzamemo transformacijske parametre, veljavne za širše območje. Pomembno je razlikovati pomen ožjega in širšega območja. Ožje območje bi določale že obstoječe točke zemljiškega katastra neke parcele in točke sosednjih parcel. Širše območje pa bi bilo vezano na večje območje, mogoče območje, ki ga določa mreža referenčnih točk.

GPS zagotavlja določitev trirazsežnega položaja. V primeru zemljiškega katastra pa je vedno dan le horizontalni položaj točke (v lokalnem ali državnem koordinatnem sistemu ali v sistemu grafične izmere), medtem ko višina točke ni vedno na razpolago. V takih primerih moramo izvedbo transformacije iz terestričnega sistema v obstoječ koordinatni sistem, ali obratno, izvesti ob opustitvi višine točke, pridobljene na osnovi GPS opazovanj.

#### 7.4 Kombiniranje GPS in terestričnih metod izmere

Tako kot terestrična opazovanja imajo tudi GPS opazovanja pomanjkljivosti, zato je v veliko primerih smiselno uporabiti kombinacijo terestričnih metod in metod GPS izmere. Odločitev za izbiro metode temelji predvsem na primernosti območja za izvedbo posameznega tipa izmere.

Pri obravnavanju kombinacij klasičnih in GPS metod izmere je potrebno posvetiti pozornost dejstvu, da so opazovanja v terestrični geodeziji vedno vezana na težnostno polje Zemlje. Zvezo z le-tem vzpostavimo s horizontiranjem instrumenta. GPS tehnologija temelji na določanju položaja v terestričnem sistemu ter glede na geocentrični referenčni elipsoid. Poleg tega je pri skupni obravnavi obeh tipov opazovanj potrebno vedeti, da se obravnava terestričnih opazovanj v okviru državnega koordinatnega sistema nanaša na astrogeodetski datum, t.j. na astrogeodetsko orientiran Besselov elipsoid. Ker lokalni rotacijski elipsoid ni geocentričen, moramo biti posebej previdni pri skupni obravnavi obeh tipov opazovanj.

**V osnovi imamo tako na razpolago dve možnosti za skupno obravnavo terestričnih in GPS opazovanj:**

- skupno izravnavo obeh tipov opazovanj v terestričnem koordinatnem sistemu,
- transformacijo koordinat v izbrani koordinatni sistem.



Med obema omenjenima možnostima lahko v tem trenutku obravnavamo prvo možnost kot težje izvedljivo. Tako bo največkrat skupna obravnava GPS opazovanj s terestričnimi opazovanji temeljila na transformacijah med koordinatnimi sistemi, v katerih imamo na razpolago koordinate točk, pridobljene z obema tipoma izmere. V prihodnosti bo težave pri enotni obravnavi položajev točk, pridobljenih z različnimi merskih tehnikami, odpravila uvedba enotnega terestričnega koordinatnega sistema.

## 8. LITERATURA

- BAUMANN, E., 1985: Vermessungskunde, Dümmler Verlag, Bonn.*  
*HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER, H., COLLINS, J., 1996: GPS, Theory and Practice, Springer-Verlag, Wien, New York.*  
*KAHMEN, H., 1993: Vermessungskunde, Walter de Gruyter, 18. dopolnjena in predelana izdaja, Berlin.*  
*KOGOJ, D., 2000: Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljmeri, FGG-Oddelek za geodezijo, Ljubljana.*  
*LEICK, A., 1995: GPS Satellite Surveying, Second Edition, John Willey & Sons, Inc., New York.*  
*MIKHAIL, E.M., ANDERSON, J.M., 1998: Surveying Theory and Practice, WCB McGraw-Hill, 7. dopolnjena izdaja.*  
*STOPAR, B., PAVLOVČIČ, P., 2001: GPS v geodetski praksi, FGG-Oddelek za geodezijo, Ljubljana.*  
*WITTE, B., SCHMIDT, H., 1991: Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen, Verlag Konrad Wittwer GmbH, 2. dopolnjena izdaja, Stuttgart.*  
*Deutsche Norm: DIN 18723 (Teil 2,3,6), Beuth Verlag, Berlin 1990.*  
*International Standard 1998: ISO 8322-1, ISO 8322-8, ISO 8322-9.*

## 9. VPRAŠANJA

1. Opišite projektiranje geodetskih mrež - namen projektiranja, pravila in vsebino projekta!
2. Opišite merjenje horizontalnih kotov in dolžin pri geodetski izmeri!
3. Opišite trigonometrično višinerstvo in geometrični nivelman kot geodetski metodi višinerstva v višinskih mrežah in pri detajlni izmeri!
4. Opišite metode GPS izmere!
5. Opišite postopke analize opazovanj v geodetski izmeri!
6. Opišite merila kakovosti geodetske izmere!
7. Opišite metode in izravnavo transformacij koordinatnih sistemov!
8. Opišite pravila in postopke detajlne izmere!
9. Opišite klasične metode detajlne izmere!
10. Opišite postopke pri detajlni GPS izmeri!