



Lantmäteriet

Lantmäteriverket - National Land Survey

S - 801 12 GÄVLE · SWEDEN

Tekniska skrifter - Professional Papers

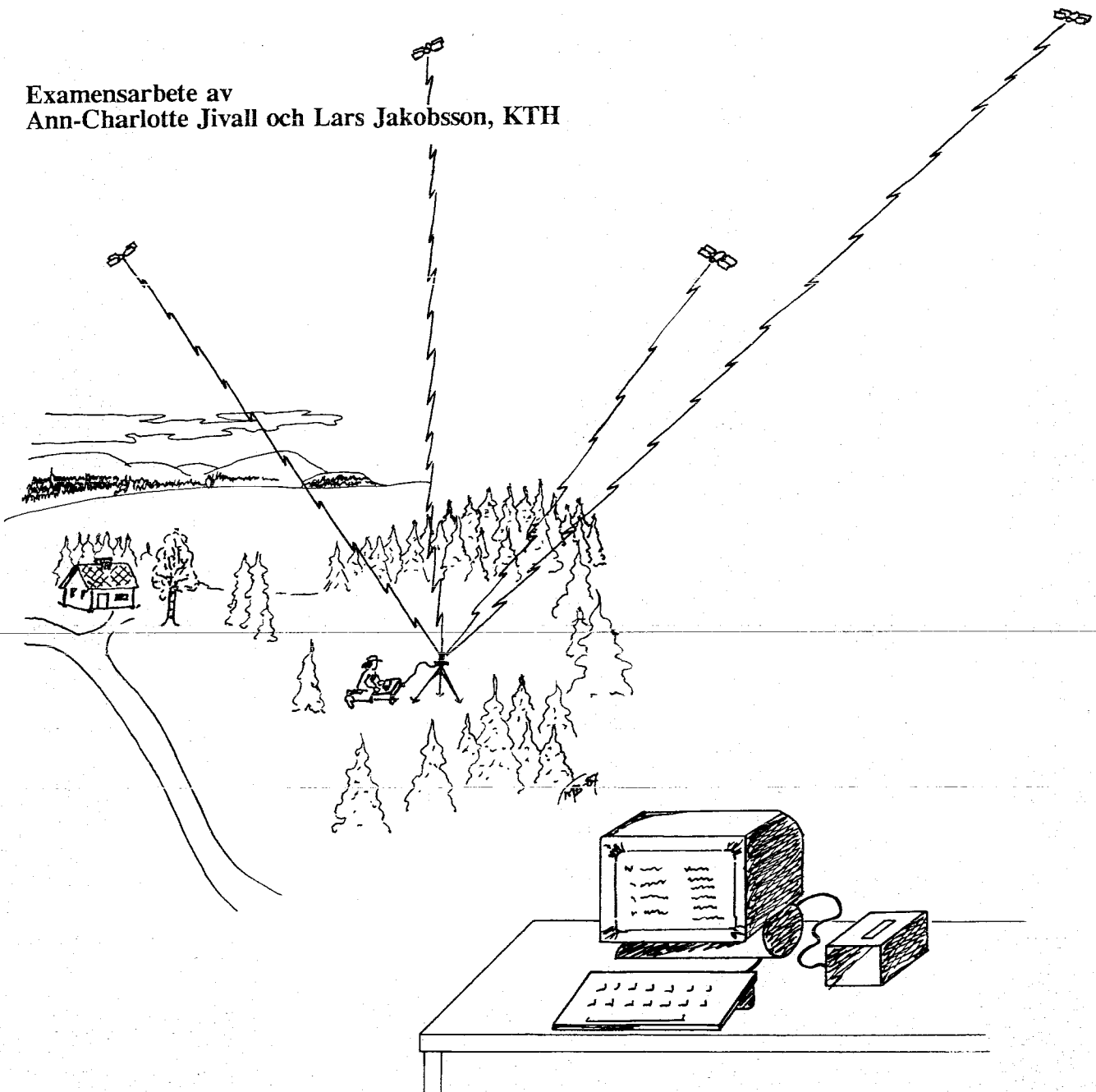
LMV-RAPPORT 1987:18

ISSN 0280-5731

Mäta med GPS

- beräkningsprogram samt detaljstudie
och beräkningsexempel med PoPS

Examensarbete av
Ann-Charlotte Jivall och Lars Jakobsson, KTH



Gävle 1987



Förteckning över utgivna LMV-rapporter 1987

Rapport	Titel	Upphovsman
1987:1	Utvärdering av regional produktion av ekonomisk karta	Ulf Andersson
1987:2	Intrång i fyndigheter och täkter	Leif Norell
1987:3	Översyn av LMVs lokaler	Bertil Ragne Lennart Karlström
1987:4	Kartproduktion i Karlskrona	Gunnar Sundstrand
1987:5	Geografiska Sverigedata	H-F Wennström
1987:6	Längdmätning mot plastreflektorer, tillämpad vid upprättande och utnyttjande av mindre primärnät	Anders Nordquist Anders Olsson
1987:7	Kartplan 1987	H-F Wennström
1987:8	A Programme for National Geographic Data Bases in Sweden	Lars Ottoson
1987:9	Precision och tillförlitlighet vid fri uppställning - en simuleringsstudie	Runar Svensson
1987:10	UTGÅR	
1987:11	En studie av viktsfunktionen vid trigonometrisk höjdmätning i samband med fri uppställning	Martin Lidberg Runar Svensson
1987:12	Koordinatsystemsbyte i kommunala nät	Bengt Karlsson Rolf Löfqvist
1987:13	Värdering av ädellövskog	Göran Bergqvist
1987:14	Compact Discs for Distribution of Maps and Other Geographic Information	Bengt Rystedt
1987:15	Skogsinventering vid likvidvärdering. LMV-metoden i tillämpning	Leif Norell m fl
1987:16	Fastighetsmarknaden idag. Pristrender och orsakssamband på marknaden för småhus och lantbruk under hösten 1987	Thomas Lindeborg Knut Mattson Per-Johan Åge
1987:17	The new National Atlas of Sweden	Bengt Rystedt

Titel

MÄTA MED GPS

- Beräkningsprogram samt detaljstudie och beräknings-
exempel med PoPS

av Ann-Charlotte Jivall och Lars Jakobsson

Huvudinnehåll

I detta examensarbete ges en kortfattad översikt av beräkningsprogram för GPS-observationsdata. Vidare redovisas erfarenheter och resultat från en studie av observationsdata från 1986 års mätningar med Wild-Magnavox WM101 GPS-mottagare i det svenska GPS-test-nätet utanför Gävle. Studien har utförts med programmet PoPS version 1.04 ("Post Processing Software") från Wild-Magnavox, installerat på en IBM PC-AT.

Undertecknade har fungerat som handledare för arbetet.

Lars Sjöberg
Geodetiska Institutionen
KTH, Stockholm

Bo Jonsson
Kartavdelningen
Geodetiska utveck-
lingsenheten
LMV, Gävle

LDOK

Kg Satellitgeodesi

INLEDNING

NAVSTAR-GPS (The Navigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System) är ett satellitsystem för positionsbestämning och tidsöverföring med mycket hög precision, som är under uppbyggnad. Redan har mycket goda resultat erhållits vid geodetiska tillämpningar. Observationstiden, som förskjuts 4 minuter varje dygn, är (okt 87) begränsad till 3-4 timmar per dygn. Tekniken är än så länge dyr, men kostnaderna förväntas minska. Systemet kan användas till en mängd tillämpningar. I kombination med annan teknik kan endast fantasin sätta gränser.

Den här rapporten utgör resultatet av ett examensarbete utfört på KG, Lantmäteriverket 1987. Syftet med examensarbetet är bla att studera vilka förkunskaper som är nödvändiga för att utföra GPS positionsbestämning med hög noggrannhet. Vi har dels tittat på hur bra man klarar av att använda ett beräknings-program för GPS-observationer (PoPS från Wild-Magnavox) utan tidigare erfarenheter av liknande beräkningar eller genomgång av leverantörens operatörskurs och dels genomfört fältmätningar med WM 101. Vi kom fram till att vissa baskunskaper om GPS var nödvändiga, vilket ledde oss till att skriva en relativt ingående introduktion till GPS med tyngdpunkt på beräkningar. Ett annat syfte är att med hjälp av PoPS och GPS-observationer från nov 1986 studera hur långa observationstider som är nödvändiga för att erhålla acceptabla resultat, om uppvärmning av mottagarna behövs samt repeterbarheten hos baslinje-mätningar/beräkningar. Ytterligare ett syfte är att ge en översikt över några av de GPS-beräkningsprogram för geodetiskt bruk, som finns på marknaden 1987 samt att ge en detaljstudie av beräkningsprogrammet PoPS.

En informell arbetsgrupp (GPS-gruppen) har bildats. Den består av deltagare från högskolor, universitet, kommuner, statliga verk och övriga intressenter. Denna grupp bevakar och rapporterar om vad som kontinuerligt händer på GPS-området. Några av medlemmarna - Lantmäteriverket, Kungliga Tekniska Högskolan, Uppsala Universitet samt Chalmers Tekniska Högskola - har införskaffat tre mottagare, beräkningsprogram samt kringutrustning. Utrustningen är i första hand till för forskning och utveckling inom området - kanske kommer en del även i fortsättningen att ske inom ramen för examensarbeten.

Vi riktar ett tack till Wild-Leitz, som låtit Lantmäteriverket disponera beräkningsprogrammet PoPS under tiden som examensarbetet pågått. Vi tackar också våra handledare Observator Bo Jonsson LMV och Professor Lars Sjöberg KTH, samt övriga som gett råd och hjälpt till med granskningen av rapporten. Tack Vera Fa, Aina Björsell och Muriel Bjureberg som hjälpt oss med skisser och tabeller. Vi tackar även LMV som stått för nödvändig utrustning och utfört tryckningen av examensarbetet.

Ann-Charlotte Jivall

Lars Jakobsson

SAMMANFATTNING

Vi har under några månader studerat positionering med satellitsystemet GPS (Global Positioning System). Det är under uppbyggnad och beräknas vara fullt utbyggt 1991. För närvarande (okt 87) är observationstiden begränsad till 3-4 timmar per dygn.

För att nå goda resultat krävs förutom mottagare och beräkningsprogram även baskunskaper om GPS, kännedom om mottagarens funktion samt vana och kunskap om planering av mätningar. Mycket viktigt är även rutin från bearbetning och beräkning av GPS-observationer. Detta moment får ej underskattas. Då nya punkter mäts in måste man ju använda den information som programmet redovisar, för att göra en bedömning av rimligheten och noggrannheten i resultaten. Att själv utan kursverksamhet eller handledning skaffa sig den erfarenheten har visat sig relativt tidskrävande. Om mätdata är av sämre kvalite blir kraven på erfarenhet och arbetsinsatsen snart större.

Vi har utfört beräkningar på observationer från Wild-Magnavox WM 101-mottagare med beräkningsprogrammet PoPS. Observationerna var utförda november 1986 i trakten kring Gävle. I våra beräkningar har vi genom att använda 45-60 minuter av de bättre delarna av observationsmaterialet, nått den av leverantören specificerade noggrannheten 10mm+2ppm i jämförelse med geodimetermätta längder med fel i samma storleksordning. Vi gjorde även en Helmert-transformation till det terrestra nätet. Beroende på utnyttjad observationstid varierade punktmedelfelet mellan 14 och 45 mm. Vi studerade också hur lång uppvärmningstid som krävs för att få stabila värden. Då 15-20 minuter togs bort i början av mätningarna (mottagarna startades kalla), erhöles påtagligt stabilare resultat. Vid jämförelse mellan längder på samma baslinje beräknad ur olika data erhöles vi differenser upp till några cm, i de fall mätningar och beräkningar var normala.

Utvecklingen av beräkningsprogram är för närvarande forcerad. Redan innan detta examensarbete ligger klart kommer nya versioner av program att lanseras. Vår redovisning av beräkningsprogram blir på så sett en uppfattning av läget 1987. De nya versionerna går mot färre interaktiva ingrepp samt möjlighet att lösa större nät. Även försök att använda "rå-observationer" istället för differensbildning sker på flera håll. Andra försök att förbättra resultaten är att använda bättre modeller som tar hänsyn till flera felkällor. En del program anpassas till flera olika mottagares observationer, vilket är bra då maskinparken hos användaren kan vara blandad. Vi tittar även närmare på PoPS, ett beräkningsprogram från Wild-Magnavox, med möjlighet att samtidigt beräkna upp till 10 stations-punkter.

Vid genomförande av fältmätningar bör man i planeringen bestämma sig för en strategi för byte av punkter. Då det gäller punkternas placering är det en fördel om de är placerade i närheten av bilväg, eftersom utrustningen än så länge är ganska tung. Punkterna skall naturligtvis även vara lämpliga ur observationssynpunkt, dvs ha fri horisont från c:a 15°. I övrigt återstår mycket att utforska: nätens utformning, observationsstrategi, punktavstånd, störningskällor mm.

Även då GPS är tekniken krävs alltså erfarenhet och planering, liksom vid all annan geodetisk mätning.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid
Ordlista	1
Kapitel 1: Satellitsystem	3
1.1: Navstar-GPS	3
1.2: Övriga satellitbaserade positionerings-system	4
2: Signalstruktur för GPS	6
3: Teoretiska mät- och beräkningsrutiner	9
3.1: Pseudoavståndsmätning	9
3.2: Fasmätning	11
3.3: Dopplermätning	11
4: Beräkningsmetoder	13
4.1: Fasobservationer	13
4.2: Differensbildning	15
4.3: Alternativ till differensbildning	17
4.4: Differensbildning kontra "rå-observationer"	18
4.5: Bestämning av antal hela våglängder	18
4.6: Avbrott i signalsekvensen	18
4.7: "Jonosfärsfri" linjärkombination av L1 och L2	20
5: Mottagare	21
5.1: Kodkorrelerade mottagare	21
5.2: Kodlösa mottagare	22
5.3: En eller två frekvenser?	22
5.4: Antal kanaler	23
5.5: Sammanställning av mottagare	23
6: Kort om beräkningsprogram	24
6.1: Bernprogrammet	24
6.2: PoPS	24
6.3: Magnet 4100	25
6.4: Trimvec	27
6.5: Geonap	28
6.6: Dipop	30
6.7: Phaser	31
7: Våra erfarenheter av PoPS	33
7.1: Beskrivning av PoPS	33
7.2: Hårdvaran	34
7.3: Manualen	34
7.4: Detaljstudie av PoPS	35
7.5: Tips	40
7.6: Tidsangivelser	41
7.7: Övriga kommentarer	41

8: Planering och erfarenheter av beräkning	42
8.1: Beskrivning av mätkampanjen	42
8.2: Mål för beräkningsarbetet	44
8.3: Att lära sig PoPS	45
8.4: Allmän beskrivning av beräkningsversioner	45
9: Beräkningsresultat	50
9.1: Beräkningsmaterialets inre noggrannhet	50
9.2: Jämförelse GPS - Geodimeter	58
9.3: Statistisk analys av jämförelsen GPS-Geodimeter -teori	61
9.4: Test av variant 3:D	63
9.5: Helmerttransformation	64
9.6: Slutsatser	66
10: Fältförsök	67
Slutord	69
A: Bilagor till kapitel 7	
B: Referenser	

ORDLISTA

Ambiguity	Okänt antal hela våglängder (när fasmätningen börjar).
Bandbredd	Ett frekvensområdes bredd.
Bias	Avvikelser från en förenklad modell.
Broadcast ephemeris	Utsända predikterade banddata.
Cycle-slip	Avbrott i signalsekvensen som orsakats av ett avbrott i den annars kontinuerliga fasmätningen. Se kapitel 4.6.
Doppler-counts	Antalet perioder av skillnadsfrekvensen mellan en referenssignal i mottagaren och mottagen satelltsignal under en viss tidsperiod. Se kap. 3.3.
Dubbeldifferens	Differensen mellan två samtidigt "mellanstations-differenser" för olika satelliter eller mellan två samtidigt "mellansatellit-differenser" för två stationer. Se kap 4.2.
Epok	Referenstidpunkt.
GDOP	GDOP (Geometric Dilution of Precision) är ett mått på osäkerheten vid positionsbestämning med tre koordinater och klockfel som obekanta. GDOP beror endast av satellit/mottagaregeometrin.
Jonosfär	Den del av atmosfären som finns över 30 km höjd. Pga den energirika strålningen från solen sker här jonisering av atmosfären.
Mellansatellit-differens	Differensen mellan fasmätningar till två satelliter från en station. Se kap 4.2.
Mellanstations-differenser	Differensen mellan fasmätningar mot en satellit från två stationer. Se kap 4.2

PDOP	PDOP (Position Dilution of Precision) är ett mått på osäkerheten i positionsbestämning med tre koordinater som obekanta. PDOP beror endast av satellit/mottagare-geometrin.
Precise Ephemeris	Noggranna banddata beräknade i efterhand.
RMS	Root Mean Square = Roten ur medelvärdet av förbättringarnas kvadrater. $\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum(v_i^2)}{n}} \quad v_i = \text{förbättring, } n = \text{antal}$
Troposfär	Den del av atmosfären som sträcker sig från jordytan upp till 30 km höjd. Jämför jonosfär.

1 SATELLITSYSTEM

1.1 NAVSTAR-GPS

NAVSTAR-GPS (The NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System) är ett navigations och positioneringssystem som är under uppbyggnad av USA:s försvar. För närvarande (September 1987) finns 7 prototypsatelliter. Det beräknas vara fullt utbyggt 1991 och skall då bestå av 21 satelliter fördelade på 6 banplan. Satelliterna rör sig i banor på en höjd av 20200 km ovanför jordytan med en omloppstid om c:a 12 timmar.

Till systemet hör 5 spårstationer. Deras positioner betraktas som felfria. Från dessa stationer mäts avståndet till satelliterna. Satellitklockfel och satellitbanor beräknas. Korrektioner och information om predikterade satellitbanor sänds upp till satelliterna från någon av de spårstationer som kan kommunicera med dessa.

För närvarande (1987) kan man i Sverige observera minst 4 satelliter, under en tidsperiod av 3-4 timmar per dygn. Detta gör det möjligt att i varje tidsögonblick under perioden beräkna en absolutposition. När systemet är fullt utbyggt skall man kunna observera minst 4 satelliter dygnet runt överallt på jorden.

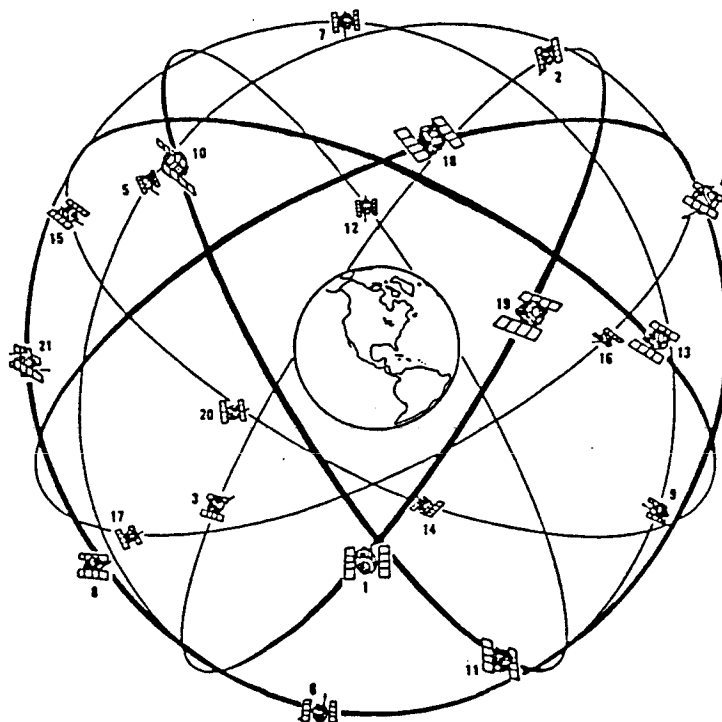


Fig 1 Navstar-GPS
(Ur Ørpen: Orientering om Navstar GPS)

NAVSTAR-GPS ANVÄNDNINGSSOMRÅDEN:

Några exempel:

- Navigation (sjöfart, flyg).
- Relativ navigation ("offshore", inflygning hamninlopp).
- Geodetiska tillämpningar (stommätning, utsättning).
- Hastighetsmätning (mha dopplerförskjutning av signaler).
- Tidsmätning eller överföring av tid (synkronisering av datanät, synkronisering av klockor vid VLBI-mätningar (VLBI=Very Long Baseline Interferometry)).
- Riktningmätning för fartyg genom att fler antenner monteras på fartyget och positioner för dessa bestäms.
- Navigation av rymdfarkoster (fjärranalyssatelliter).

1.2 ÖVRIGA SATELLITBASERADE POSITIONERINGSSYSTEM

MILITÄRA SYSTEM:

Förutom GPS finns det i dag tre ursprungligen militära system; det amerikanska Transit och de sovjetiska GLONASS och Tsidada.

Transit utvecklades på 60-talet och amerikanska försvaret ansvarar för driften fram till 1994. Mätningarna bygger på dopplerprincipen och endast en satellit observeras åt gången. Det finns för närvarande 6 aktiva satelliter som rör sig i banor på 1100 km höjd och har omloppstiden 107 minuter.

Tsidada motsvarar Transitsystemet.

GLONASS (Global Navigation Satellite System) motsvarar GPS och hade 1982-84, 12 prototypsatelliter uppe. Dessa var fördelade på tre banplan med inklinationen 63°. Signalfrekvensen är ungefär 25 MHz högre än för GPS.

Utmärkande för de militära systemen är att de endast sänder signaler i en riktning - från satelliten till mottagaren, för att inte röja mottagarens position.

CIVILA SYSTEM:

För civila ändamål är det dock möjligt att sända signaler i båda riktningarna. Tvåvägssystem öppnar möjligheter att utföra en del av beräkningarna i centrala beräknings- och kontrollstationer, vilket innebär att lägre krav kan ställas på satelliterna och mottagarna. Geostar, NAVSAT och POPSAT är tvåvägssystem som planeras.

Geostars nuvarande utformning innefattar två geostationära satelliter (över USA) med tvåvägskommunikation till en central kontroll- och beräkningsstation och till mottagarna. För att kunna beräkna positioner måste höjdinformation tas från annat håll tex höjdmätning i flygplan (mha lufttrycksmätning), då flygplanets position skall bestämmas eller från topografisk karta vid positionsbestämning på marken.

NAVSAT utvecklas av European Space Agency (ESA) och är tänkt att ha ungefär samma möjligheter som GPS bortsett från vissa militära krav. Systemet är tänkt att bestå av 6 geostationära och 6 (ev 12) satelliter i starkt elliptiska banor, med inklinationen 63° . Konfigurationen med totalt 12 satelliter skulle ge en täckning av norra halvklotet och den med 18 skulle ge världsomspännande täckning. Satelliterna har inga egna frekvensnormaler (oscillatorer), utan återsänder signaler och meddelande från upp till 6 spårstationer.

POPSAT är ett projekt planerat av ESA (European Space Agency), tänkt att kunna användas för en mängd tillämpningar, tex navigation, geodesi, geodynamik och tidsöverföring. Vid spårstationer sker mätningar i båda riktningarna, medan man vid nybestämning endast mäter från satelliten mot reflektorer på marken. Satelliterna skall ha cirkulära banor med inklinationen 98.6° .

2 SIGNALSTRUKTUR FÖR GPS

SIGNALEN:

Varje satellit sänder ut unika signaler på två L-bands-frekvenser. Den består dels av bärvågen som för L1 har frekvensen 1575.42 MHz (våglängd c:a 19 cm) och för L2 1227.60 MHz (våglängd c:a 24 cm). L1 moduleras med P-kod (Precise) och C/A-kod (Coarse/Acquisition) samt navigationsmeddelande. L2 saknar C/A-kod. Den primära funktionen för P- och C/A-koden är att tillåta beräkning av gångtiden för signalen mellan satellit och mottagare.

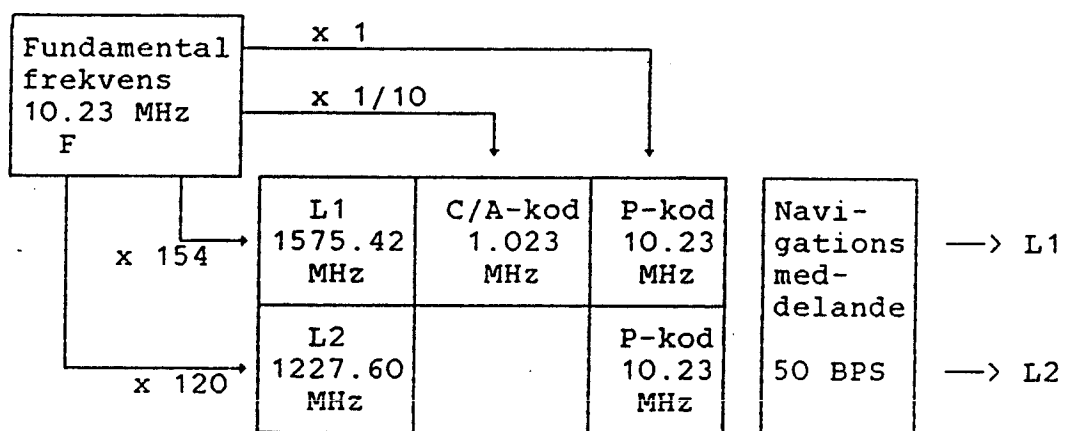


Fig 2 GPS Satellitsignaler

Moduleringen innebär att bärvågen multipliceras med +1 eller -1. Med andra ord; varje ändring leder till en fasändring med 180°.

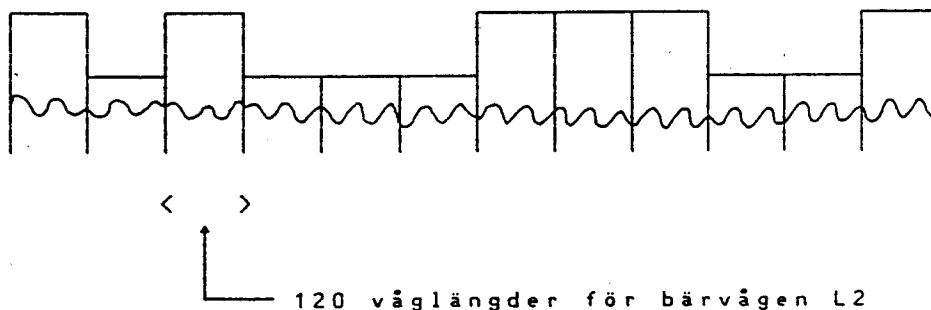


Fig 3 Bärvågen L2 modulerad med P-kod.

C/A-koden repeteras från början varje millisekund, vilket motsvarar 300 km. Frekvensen är 1.023 MHz, vilket motsvarar våglängden 300 m (eller en mikrosekund). P-koden är så pass lång att den skulle räcka 267 dagar. Alla satelliter får dock veckoavsnitt av denna, som repeteras varje vecka (byte mellan lördag och söndag). Frekvensen är 10.23 MHz, vilket motsvarar en våglängd om 30 m (eller 100 nsek.).

För att erhålla en säkrare signal moduleras signalen så att den får en bredare bandbredd innan den sänds ut från satelliterna. Motsvarande komprimering sker sedan i mottagaren.

NAVIGATIONSMEDELANDENDE:

Navigationssmeddelandet, vilket består av en datasträng om 1500 bits som tar 30 sekunder att sända, är indelat i fem olika avsnitt. Varje avsnitt börjar med ett "handoverword" (HOW), vilka återkommer var 6:e sekund och innehåller information om var i den veckolånga P-koden man befinner sig (tidsangivelse).

De fem avsnitten innehåller:

1: Klockparametrar för att ge mottagaren information om skillnaden mellan satellit- och GPS-tid, samt koefficienter för jonosfärmodell för användare med endast en frekvens.

2 o.3: "Broadcast ephemeris" predikterade av spårstationerna. Ur dessa parametrar kan användaren beräkna jordcentrerade jordfixa kartesiska koordinater (WGS 84).

4: Detta avsnitt är reserverat för alfanumeriska meddelanden för framtida behov.

5: Almanack-data (medelbanparametrar), klockkorrektioner samt hälsostatus för en satellit i taget. Efter varje 30-sekunders meddelande byts satellit. På 12.5 minuter tar man alltså ner en komplett almanacka för de från början 25 planerade satelliterna.

"Broadcast ephemeris" uppdateras varje timme, men är tillgängliga för ytterligare minst en halvtimme. De anges i Keplers banparametrar samt korrektioner till dessa. (se "GPS - En marknadsöversikt med introduktion" av Staffan Pehrsson 1986.) Noggrannheten i dessa banor ligger på 20-100 m, vilket motsvarar 1-5 ppm av avståndet mellan en satellit och en punkt på jordytan. Avvikelserna ger upphov till fel i baslängder i samma storleksordning räknat i ppm. Man kan även beställa banddata i efterhand som är beräknade ur data från den tid mätningarna varade, sk "precise ephemeris", t ex från Naval Surface Weapons Center (NSWC) Virginia (noggrannhet 10-20 m, 0.5-1 ppm). Även Europa planerar att beräkna banddata från egna spårstationer (Bo Jonsson, LMV Gävle).

OSCILLATORER:

Frekvensnormaler kallas de precisions-oscillatorer som genererar bärfrekvensen och koden.

I satelliterna sitter atom-oscillatorer med god frekvensstabilitet (relativt fel: $2 \cdot 10^{-15}$, vilket motsvarar 1 sek på 150 000 år). "Rubidium vapour cell" är relativt billig och "Cesium beam tube" har den mest "exakta" frekvensen. "Hydrogen maser" är mest "stabil", men den används ej i satelliter.

Mottagarna har kvarts-oscillatorer. De är billiga, väger lite, kräver lite energi och är små. Stabiliteten är tillräcklig och driften kan kontrolleras av GPS-signalen.

Ett undantag är mottagaren ISTAC 2002, som har en intern rubidium oscillator. God oscillatorstabilitet är speciellt viktigt för kodlösa mottagare, vilka ej kan uppdatera sin klocka med GPS-signalen. Det är även viktigt för kinematiska tillämpningar om mottagarklockan inte uppdateras för varje epok. En precisions-oscillator kan tillåta navigation med god precision på endast två eller tre satelliter.

3 TEORETISKA MÄT- OCH BERÄKNINGSRUTINER

Mätningar kan ske kinematiskt eller statistiskt. Kinematisk mätning innebär att antennen är i rörelse. Då söks oftast en realtidsposition med ett bestämt tidsintervall. Ett exempel är positionering via radiolänk, där korrektioner sänds ut från en känd punkt (moderstation) ut till övriga mottagare. I det statistiska fallet står antennen still på samma punkt under en längre tid. Man får då överbestämningar i positionsberäkningen vilket leder till betydligt högre noggrannhet.

Absolut positionering innebär att en punkts absoluta koordinater bestäms. Med relativ positionering menas att man bestämmer en punkts koordinater i förhållande till en annan. Den relativa metoden ger noggrannare bestämning än den absoluta, eftersom felet i stort sett är lika på de båda punkterna.

Positionerna kan bestämmas antingen i realtid eller vid senare bearbetning av observationsmaterialet. Realtidspositioneringen ger små eller inga möjligheter till manuella ingrepp i beräkningen, vilket medför större krav på programvaran. Efterbearbetningen ger möjlighet till visuell kontroll av observationsmaterialets kondition. (Hur mycket störningar som förekommer osv.) Man får även möjlighet att använda kraftfullare felsökningsrutiner.

Följande typer av GPS-observationer kan göras: Pseudoavståndsmätning, fasmätning på bärvåg eller kod samt dopplermätning.

3.1 PSEUDOAVSTÅNDSMÄTNING

Det observerade avståndet kallas för pseudoavstånd av den anledningen att man inte korrigerar för alla förekommande felkällor. Observation görs antingen på P- eller C/A-koden. Koden kan beskrivas som en diskret puls som lämnar satelliten vid en viss tidpunkt och når mottagaren vid en annan. Tidpunkten då "koden" lämnade satelliten är känd. Då "koden" når mottagaren erhålls en tidsdifferens för signalens gångtid. Man kan även beskriva observationen så att tidsskillnaden mellan den mottagna satellitsignalen och den i mottagaren genererade koden (genereras samtidigt om satellit- och mottagarklocka är utan fel) mäts upp. Avståndet fås genom att multiplicera tidsdifferensen med utbredningshastigheten.

K1 12.15 30. 999999

K1 12.15. 31.000000

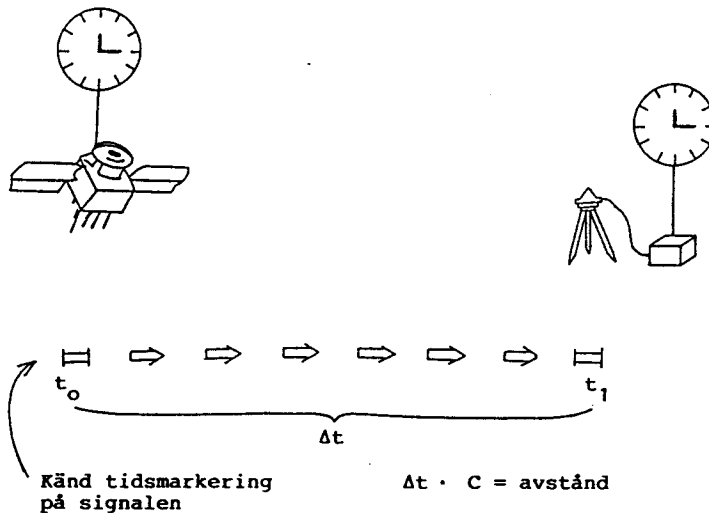


Fig 4 Pseudoavståndsmätning

Detta avstånd innehåller fel pga att satellitens och mottagarens klocka ej är perfekt synkroniserade. Fel orsakas även av brus samt i mindre omfattning av "avläsningsfel" (koden består ju av diskreta pulser med 300 m (C/A-koden) resp 30 m (P-koden) avstånd) och banfel. Jonosfärens och troposfärens påverkan orsakar också fel i avståndsberäkningen. Beroende på vilken noggrannhet man behöver, bortser man från en del av felkällorna när man utför positionsberäkningen.

För att på enklast möjliga sätt bestämma positionen med en mottagare utan precisionsoscillator, krävs observationer mot fyra satelliter med god spridning (De får ej vara för lågt ner mot horisonten.). Då kan (X, Y, Z) för den okända punkten samt mottagarens konstanta klockfel bestämmas.

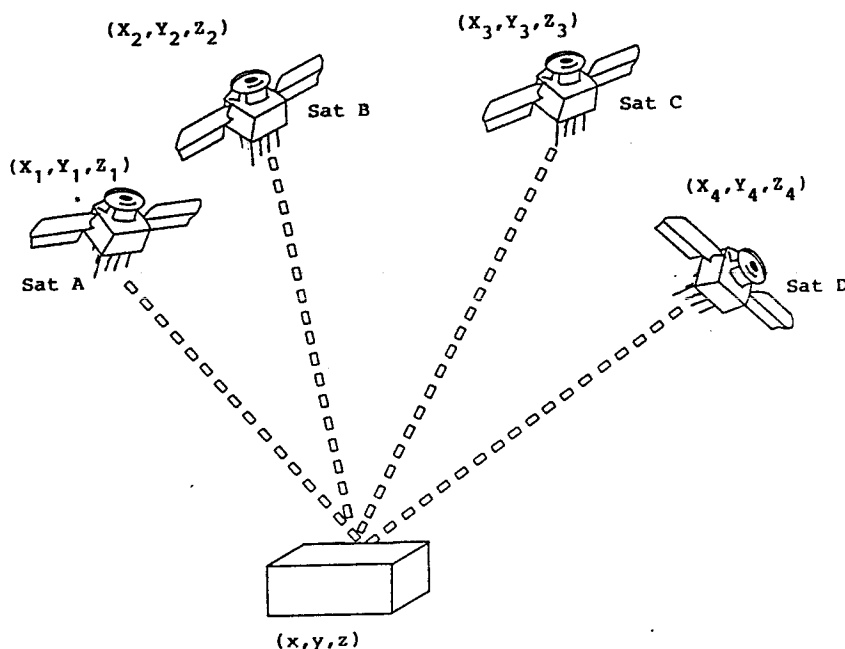


Fig 5 Positionsbestämning

Följande ekvation kan ställas upp:

$$(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2 = c^2(\Delta t-b)^2$$

$$\left. \begin{array}{l} c = \text{ljushastigheten} \\ \Delta t = \text{observerad tidsdifferens} \\ b = \text{mottagarens klockfel} \end{array} \right\} c(\Delta t-b) = \text{pseudoavstånd}$$

$(X,Y,Z) = \text{satellitens koordinater}$
 $(x,y,z) = \text{mottagarens koordinater}$

Fyra observationer ger möjlighet att lösa ut de obekanta.

För att även kunna bestämma satellitklockfel, drift hos mottagarklockan, jonosfären och troposfärens påverkan samt banfel hos satelliten, krävs fler observationer från varje satellit, dvs längre observationstid. Vid geodetiska tillämpningar får denna positionsbestämning utgöra närmevärden för vidare beräkningar.

3.2 FASMÄTNING

Vid fasmätning observeras fasskillnaden mellan den dopplerskiftade frekvensen från satelliten och den konstanta frekvensen som genereras i mottagaren samt antalet våglängder mellan observationerna. Antalet hela våglängder mellan satellit och mottagare sk "ambiguities" är okänt och måste bestämmas med andra metoder. Fasmätningen kan utföras på bärvågen eller koden (koden behöver ej vara känd). Fasmätning på bärvågen med våglängden 19 cm (L1) och "avläsningsnoggrannheten" 1/40 av en våglängd ger en precision av 5 mm. På motsvarande sätt blir precisionen för fasmätning på P-koden (våglängd 30 m) 0.75 m.

För geodetiskt bruk används fasmätning på bärvågen och relativ positionering. I kapitel 4 beskrivs hur fasmätningen utnyttjas i olika beräkningsmetoder.

3.3 DOPPLERMÄTNING

Den från satelliten mottagna signalens frekvens förändras kontinuerligt pga att satelliten rör sig (den sk dopplereffekten). Integrerade "doppler-counts" är antalet perioder av skillnadsfrekvensen mellan mottagarens referenssignal och mottagen satellitsignal under en viss tidsperiod.

$$N = \int_{t_1}^{t_2} (F_m - F_s) dt$$

$$\begin{array}{l} N = \text{integrerade doppler-counts} \\ t_1 - t_2 = \text{tidsintervall} \\ F_m = \text{Mottagarens referensfrekvens} \\ F_s = \text{Den mottagna satellitsignalens frekvens} \end{array}$$

N kan omformas till en avståndsdifferens mellan satellit och mottagare i början och slutet av integrationsintervallet. Man erhåller en hyperbolisk lösning (mätningarna motsvarar hyperboliska ytor i rymden).

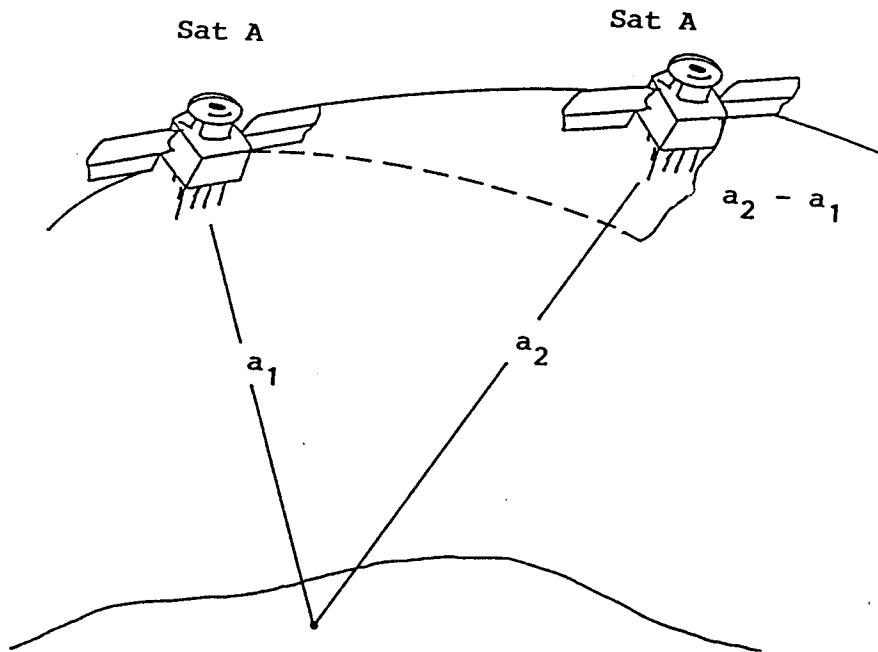


Fig 6 Dopplermätning

Genom att kombinera mätningar från flera satelliter kan en punktbestämning göras med noggrannheten 10 cm, vilket är tillräckligt för att kunna lösa ut antalet obekanta våglängder ("ambiguities") vid fasmätning.

4 BERÄKNINGSMETODER

I det här kapitlet tittar vi närmare på hur fasobservationerna används i olika beräkningsmetoder. Först ges en beskrivning av själva fasobservationen. Därpå följer olika metoder - både med och utan differensbildning. Metoder redovisas för att bestämma antalet hela våglängder mellan satellit och mottagare, sk "ambiguities", sökning och lagning av avbrott i signalsekvensen, sk "cycle slip", samt hur fasmätning på två frekvenser (L1 och L2) kan utnyttjas för att eliminera effekten av jonosfären.

4.1 FASOBSERVATIONER

OBSERVATIONEN:

I mottagaren registreras vid observationstillfället, differensen mellan fasan på den mottagna satellitsignalen och den i mottagaren genererade referenssignalen.

$$(1) \quad \Delta\phi(t_m) = \phi_m^s(t_m) - \phi_m^r(t_m)$$

Övre index anger varifrån signalen kommer och undre index var fasan observeras, m=mottagare, s=satellit.

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \text{fasobservationen:} \\ t_m &= \text{observerad tid för mottagen signal} \\ \phi_m^s(t_m) &= \text{satellitsignalens fas i mottagaren vid tiden } t_m \\ \phi_m^r(t_m) &= \text{referenssignalens fas i mottagaren vid tiden } t_m \end{aligned}$$

Om klockan i satelliten skulle vara synkroniserad med klockan i mottagaren och avståndet =0, så skulle $\Delta\phi = 0$.

AVSTÅNDET:

För att kunna utnyttja fasobservationen vid beräkning av stationskoordinater, måste observationen kunna relateras till koordinaterna, eller i ett första steg till avståndet mellan satellit och mottagare.

Om man förenklat tänker sig att satelliten stannar vid den tid, då signalen som mottas vid tiden t_m sänds ut, kan avståndet mellan satellit och mottagare vid denna tidpunkt skrivas som ett helt antal våglängder plus en överskjutande del av våglängd. Se figur 7 på nästa sida. Fasobservationen vid tiden t_m skall alltså relateras till satellitens position vid tiden t_m minus signalens gångtid.

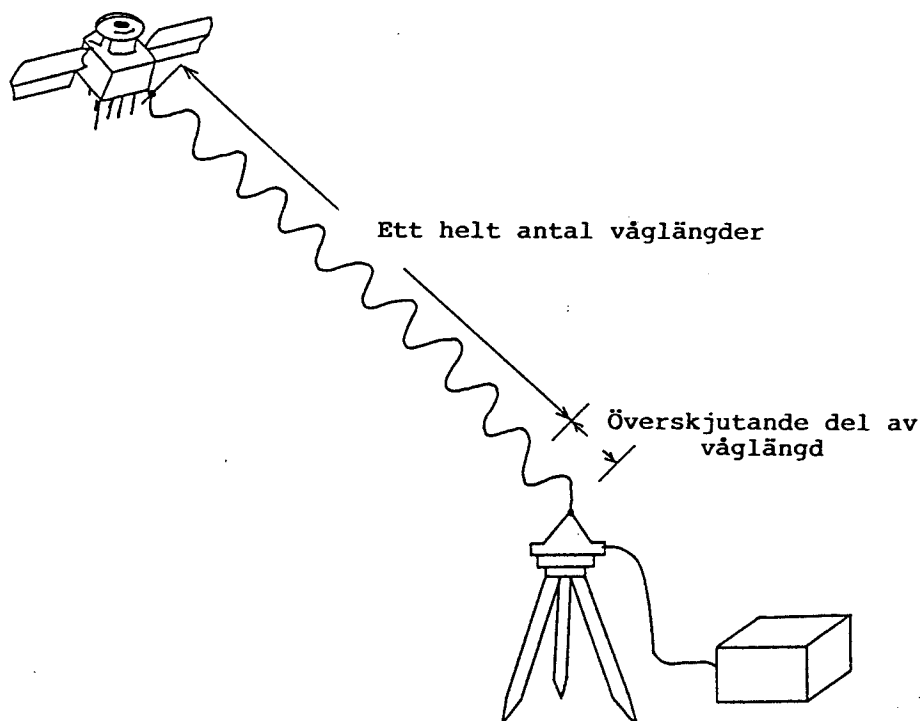


Fig 7 Tänktt satellitsignal vid tiden t_m

$$(2) \quad \rho = N \cdot \lambda + \lambda \cdot (\Phi_m^s(t_m) - \Phi_s^s(t_m))$$

där ρ = avståndet

N = antalet hela våglängder, sk "ambiguity"

λ = c/f = våglängd

c = signalens utbredningshastighet, approximativt ljushastigheten

f = signalens frekvens

t_m = observerad tid för mottagen signal

$\Phi_m^s(t_m)$ = satellitsignalens fas i mottagaren vid tiden t_m

$\Phi_s^s(t_m)$ = satellitsignalens fas i satelliten vid tiden t_m

$\Phi_s^s(t_m)$ är ej känd men om klockan hos mottagaren var synkroniserad med satelliten skulle $\Phi_s^s(t_m) = \Phi_m^m(t_m)$. Med det klockfel som finns mellan satellit och mottagare, blir relationen mellan $\Phi_s^s(t_m)$ och $\Phi_m^m(t_m)$:

$$(3) \quad \Phi_s^s(t_m) = \Phi_m^m(t_m) + \Delta\Phi_m - \Delta\Phi_s$$

där $\Delta\Phi_m = f \cdot \Delta t_m$

$\Delta\Phi_s = f \cdot \Delta t_s$

Δt_m = mottagarklockans korrektion till referenstid

Δt_s = satellitklockans " " "

(3) insatt i (2) ger:

$$(4) \quad \rho = N \cdot \lambda + \lambda \cdot \underbrace{(\Phi_m^s(t_m) - \Phi_m^m(t_m))}_{\Delta\Phi} - \Delta\Phi_m + \Delta\Phi_s$$

Slutligen kombineras ekvation (1) och (4) för att få observationen som en funktion av avståndet:

$$(5) \quad \Delta\Phi = \rho/\lambda - N - \Delta\Phi_s + \Delta\Phi_m$$

För att man skall kunna beräkna stationskoordinater krävs att satellitkoordinaterna är kända. Till denna observation läggs dessutom korrektioner för oscillatorns drift, fel i banparametrar (påverkar ρ) och för atmosfärens påverkan av c .

Fel i satellit och mottagarklocka samt satellitens banfel är epokberoende, dvs felen är olika vid olika tidpunkter. Korrelationen mellan intilliggande epoker är dock stor. Ofta modelleras dessa fel som polynom. Det obekanta antal hela våglängder mellan satellit och mottagare som föreligger vid fasmätningens början, sk "ambiguities", är gemensamt för alla epoker som observeras utan avbrott.

4.2 DIFFERENSBILDNING

Delar av de epokberoende felen kan elimineras (tex klockfel) eller reduceras (tex atmosfärskorrektion), genom att bilda differenser mellan fasmätningarna.

MELLANSTATIONSDIFFERENS:

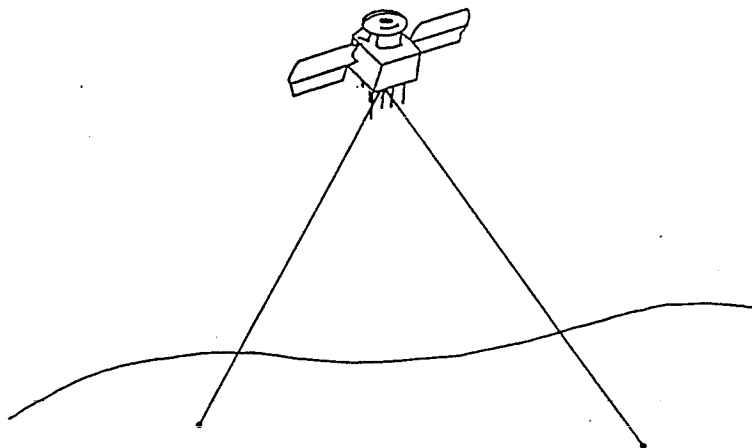


Fig 8 Mellanstationsdifferens

Mellanstationsdifferens (Δ), är skillnaden mellan fasobservationerna på två stationer, som observerat samma satellit. Med denna differensbildning elimineras satellitens klockfel. Banfelen och atmosfärens påverkan reduceras, framför allt på korta avstånd mellan mottagarna. Metoden kan användas vid banbestämningen där mottagarna är anslutna till frekvensnormaler och avståndet mellan stationerna är stort.

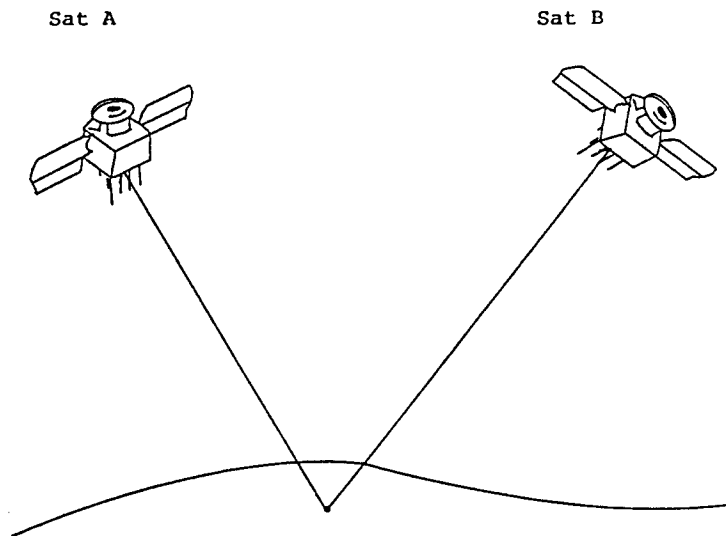
MELLANSATELLITDIFFERENS:

Fig 9 Mellansatellitdifferens

Mellansatellitdifferens (∇), är skillnaden mellan fasobservationer från två olika satelliter på en station. Mottagarklockans fel elimineras.

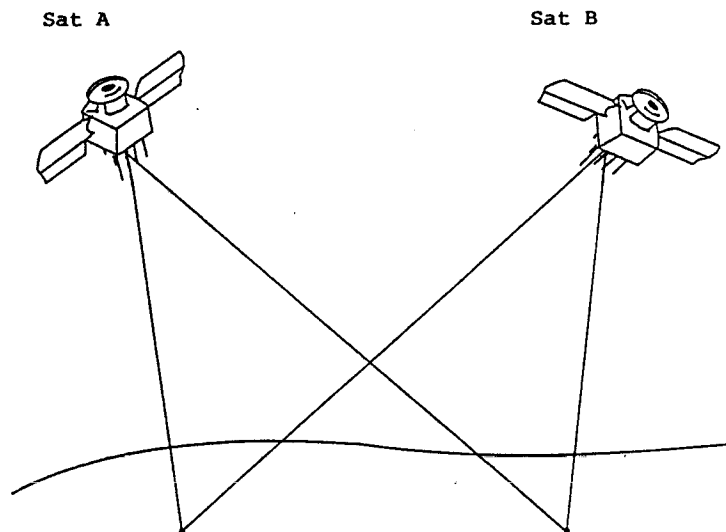
DUBBELDIFFERENS:

Fig 10 Dubbeldifferens

Dubbeldifferensen ($\nabla\Delta$), är skillnaden som uppstår mellan två Δ , som innehåller samma stationer men beräknade utifrån två olika satelliter. Resultatet blir det samma om man använder sig av två ∇ , som innehåller samma satelliter men som är beräknade utifrån två olika stationer.

I $\nabla\Delta$, elimineras eller reduceras till stora delar både satellit och mottagarklockornas fel. Av de obekanta parametrarna kvarstår då endast det obekanta heltal våglängder mellan satellit och mottagare, sk "ambiguity", som uppstår i början av observationsperioden. Dessa kan då i beräkningen tvingas till lämpligt heltal enligt något optimeringsförfarande. Se vidare kapitel 4.5. $\nabla\Delta$ används ofta i själva slutberäkningen.

MELLAN-EPOKDIFFERENS:

Mellan-epokdifferenser (δ), är differenser mellan två, vid olika tidpunkt, på varandra följande Δ , ∇ eller $\nabla\Delta$.

δ mellan $\nabla\Delta$, kallas ofta trippeldifferenser. δ eliminerar det obekanta heltalet våglängder och kan därför användas för sökning av avbrott i signalsekvensen, sk "cycle slips".

Vid beräkning av stationskoordinater mha δ , blir noggrannheten lägre än med $\nabla\Delta$, eftersom en del av informationen avlägsnats.

Differensbildning reducerar antalet observationsekvationer och antalet obekanta, men inför korrelationer mellan observationerna. Dessa kan vara svåra och tidsödande att ta hänsyn till.

4.3 ALTERNATIV TILL DIFFERENSBILDNING

Det går även att använda den "råa" fasobservationen direkt som observationsekvation. Den stora fördelen är att man då slipper de korrelationer som annars uppstår mellan de differentierade observationerna. Metoden föreslås bla av P. Vanicek i "On the Elimination of Biases in Processing Differential GPS Observations" och av C.C. Goad i "Precise Relative Position Determination.....".

Korrelationerna modelleras vanligen ej i polynom, utan genom en term för varje epok. De epokberoende parametrarna kan antingen lösas ut eller elimineras genom partitionering eller ortogonalisering. Partitionering innebär att ekvationssystemet delas upp i delar som kan lösas ut var och en för sig, med samma resultat som om hela utjämnningen sker på en gång. Vid ortogonalisering multipliceras designmatrisen med en matris, som är ortogonal till delmatrisen som innehåller epokparametrarna, så att dessa elimineras.

Ett problem när man räknar på "råobservationer", är att det obekanta antalet hela våglängder, ej kan skiljas från de övriga obekanta parametrarna och då ej heltalsbestämmas. C.C. Goad löser detta problem i "The Base Station - Base Satellite Concept", där han på två satelliter och två mottagare, (vilket ger upphov till 4 "råobservationer"), har tre grupper av obekanta parametrar och en linjärkombination av dessa tre som obekant. Linjärkombinationen är identisk med den obekant, som

uppstår vid dubbeldifferensbildning och skall alltså vara det obekanta heltalet våglängder, ("ambiguity").

4.4 DIFFERENSBILDNING KONTRA "RÅOBSERVATIONER"

Fördelen med differensbildning är att den är enkel att implementera på en dator och att den ger upphov till färre parametrar. Av gruppen obekanta parametrar återstår endast ett heltal våglängder, "ambiguity", som skall bestämmas så att residualerna minimeras. Nackdelen är att observations-ekvationerna ej är oberoende av varandra och det blir framförallt tidsödande att ta hänsyn till dessa korrelationer. Det finns även möjligheter att bilda okorrelerade linjär-kombinationer av dubbeldifferenserna. Detta försvårar dock felsökningen.

"Råobservationerna" är okorrelerade, men ger upphov till fler observationsekvationer och fler parametrar, (antalet överbestämningar blir detsamma). Om alla epokparametrar skall lösas ut krävs mycket minnesutrymme. En fördel är att man kan ta hänsyn till olika mottagares kvalitet. Metoden med ortogonalisering försvårar upptäckten av avbrott i signalsekvensen, vilket gör att dessa bör sökas och lagas med en annan metod innan ortogonalisering sker. Alla metoderna (partitionering, ortogonalisering och differensbildning), ger upphov till samma resultat, förutsatt att rätt kovariansmatrix används.

4.5 BESTÄMNING AV ANTAL HELA VÅGLÄNGDER - "AMBIGUITY"

Antalet hela våglängder mellan satellit och mottagare i början av observationsperioden är obekant. När mottagaren i fortsättningen observerar en satellit, registreras både fas och ändring av antalet hela våglängder. Därför blir det en "ambiguity", för varje kombination av satellit och mottagare under en mätperiod.

För "råobservationer" måste vissa knep tillgripas, se vidare kapitel 4.3.

Vid dubbel-differenslösning, bestäms "ambiguities" samtidigt med de geodetiska parametrarna. För korta baslinjer (<30 km), där precisionen är bättre än en våglängd, kan "ambiguities" rundas av till närmaste heltal som sedan hålls fast där under en ny beräkning. Om precisionen är lägre får de antingen vara obestämda eller så måste någon optimeringsmetod användas.

4.6 AVBROTT I SIGNALSEKVENSEN - "CYCLE-SLIP"

"Cycle-slip" uppkommer då mottagaren tappar låsningen av satellitsignalen ett kort ögonblick. När den återupptas är decimaldelen korrekt, dvs densamma som om det inte hade varit något avbrott. Heltalsdelen är däremot felaktig. Orsaken till avbrottet kan vara att riktningen mot satelliten från mottagaren är skymd, eller något elektroniskt fel i satellit eller mottagare.

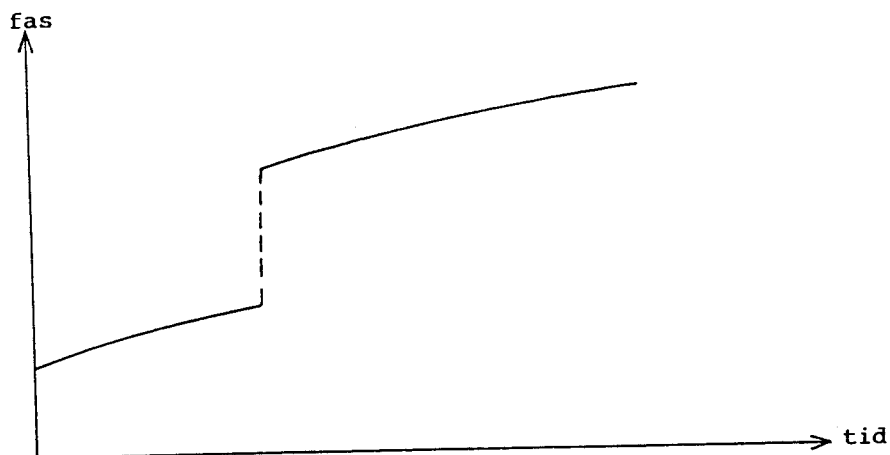


Fig 11 Avbrott i signalsekvensen

Det finns många metoder att upptäcka och laga "cycle slip". De flesta bygger på dubbeldifferenser, då dessa är relativt fria från oscillatorfel. Här tar vi upp några metoder som används.

En lösning går ut på att anpassa polynom till mellan-epokdifferenser av dubbel- eller mellanstations-differenser. I mellan-epokdifferenserna visar sig "cycle-slips", som avvikande värden, vilka lätt kan upptäckas. Närmaste heltal av differensen registreras och efterföljande värden korrigeras.

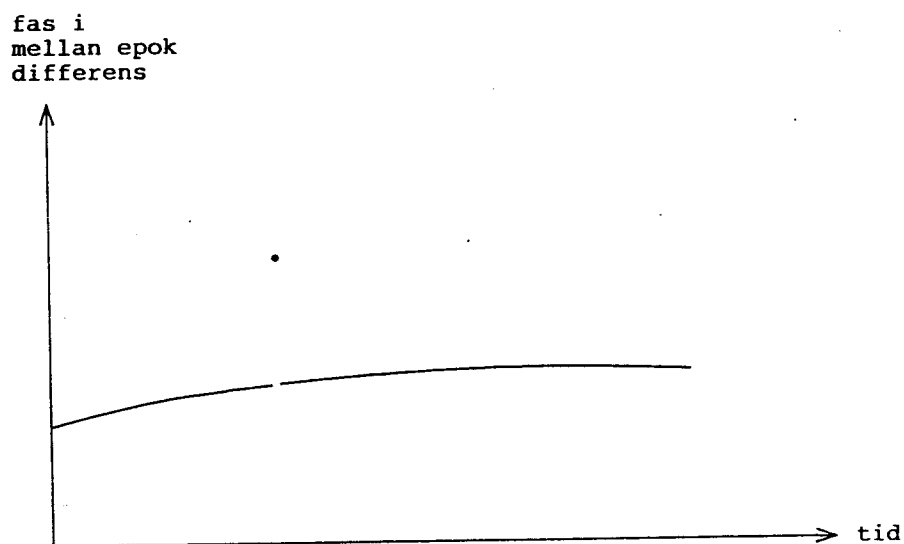


Fig 12 Mellanepokdifferens med "cycle-slip"

I en annan metod tas de avvikande värdena av mellan-epokdifferenserna bort och preliminära koordinater beräknas av de återstående observationsekvationerna. Ur dessa koordinater och bandata, beräknas dubbeldifferenser, vilka jämförs med dubbeldifferenser, beräknade ur fasobservationerna. "Cycle-slips" visar sig som diskontinuiteter i residualerna. Ofta används interaktiva grafer där residualerna plottas upp, vilket är en ganska tidsödande metod. Alternativt kan diskontinuiteter sökas genom att bilda mellanepokdifferenser av residualerna. Residualerna delas upp i block fria från "hopp" och till dessa anpassas sedan olika polynom som endast skiljer sig i den konstanta termen. Polynomkoefficienterna till alla polynom löses ut samtidigt. Skillnader i den konstanta termen mellan på varandra följande block motsvarar storleken på "cycle-slip".

4.7 "JONOSFÄRSFRI" LINJÄRKOMBINATION AV L1 OCH L2

Jonosfären påverkar hastigheten på radiovågor med en fördröjning omvänt proportionell mot frekvensen i kvadrat. Motsvarande korrektion för fassen blir omvänt proportionell mot frekvensen. Fasobservationen (ekvation (5) i kapitel 4.1), kan då skrivas:

$$(6) \quad \Delta \Phi = \rho \cdot f / c - N + f (\Delta t_m - \Delta t_s) + A/f$$

där A/f = atmosfärskorrektionen.

Fasobservationerna för L1 och L2 skrivs:

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_1 &= \rho \cdot f_1 / c - N_1 + f_1 (\Delta t_m - \Delta t_s) + A/f_1 \\ \Delta \Phi_2 &= \rho \cdot f_2 / c - N_2 + f_2 (\Delta t_m - \Delta t_s) + A/f_2 \end{aligned}$$

där index ₁ respektive ₂ står för L1 respektive L2.

Genom att kombinera dessa båda fasmätningar kan termen som innehåller A, dvs påverkan av atmosfären, elimineras. Om man i linjärkombinationen:

$$\Delta \Phi_{korr} = \alpha \cdot \Delta \Phi_1 + \beta \cdot \Delta \Phi_2$$

$$\begin{aligned} \text{väljer: } \alpha &= f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2) \\ \beta &= -f_1 f_2 / (f_1^2 - f_2^2) \end{aligned}$$

får man den korrigerade observationsekvationen:

$$(7) \quad \Delta \Phi_{korr} = \rho \cdot f / c + f_1 (\Delta t_m - \Delta t_s) + \alpha \cdot N_1 + \beta \cdot N_2$$

Denna fasobservationsekvation är alltså fri från jonosfärstermen. Den skiljer sig från den ursprungliga fasobservationen på en frekvens, endast genom att det obekanta antalet hela våglängder är utbytt mot en linjärkombination av densamma för L1 och L2. Detta är inte längre något heltal, vilket gör att "cycle-slips" måste lagas innan den jonosfärsfria kombinationen bildas.

5 MOTTAGARE

En mottagare består vanligen av följande enheter:

- antenn med förförstärkare
- oscillator och klocka
- microprocessor inkl programvara
- display och tangentbord
- datainsamlingsenhet
- strömförsörjare

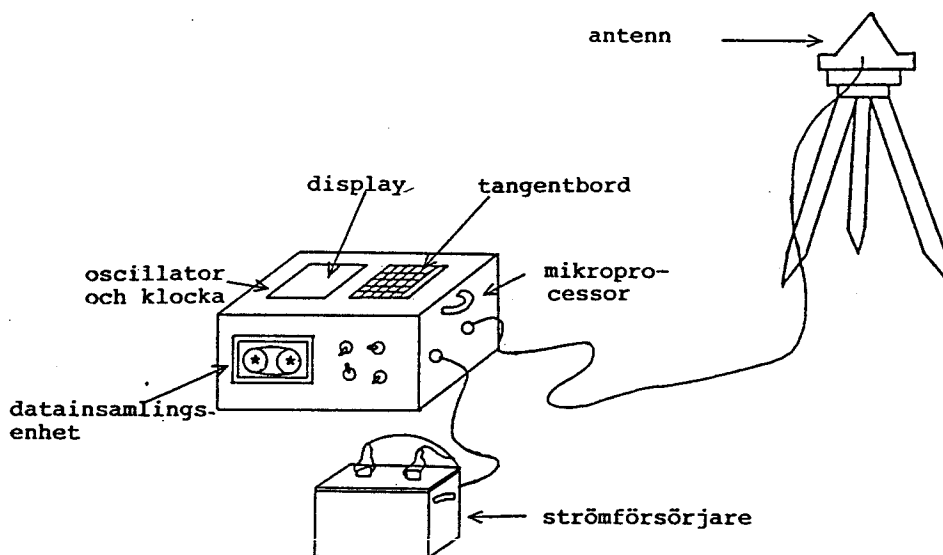


Fig 13 Principskiss på mottagare

5.1 KODKORRELERADE MOTTAGARE

De flesta mottagare är kodkorrelerade. Dessa kan genom att utnyttja koden bestämma sk pseudoavstånd. I mottagaren skapas en referenssignal med samma frekvens och kodmodulering som satellitsignalen. Referenssignalen fördröjs tills den överensstämmer med den mottagna signalen, (dvs då dessa signaler är korrelerade med varandra) och låses fast där. Tidsskillnaden mellan den fördröjda signalens klocka och GPS-tid motsvarar signalens gångtid, ur vilken pseudoavståndet kan bestämmas.

En motsvarande korrelation sker även vid fasmätning (kan göras på bärvågen eller koden). Vid fasmätning på bärvågen avlägsnas satellitmeddelande och kod från signalen. Sedan observeras antalet perioder (mellan observations-tillfällena) samt differensen mellan fasan på mottagen satellitsignal och referenssignalen, vilken ofta kallas "carrier-beat phase". Alla fasmätningar lider av ett okänt antal hela våglängder, sk "ambiguities" då fasmätningen påbörjas.

Exempel på kodkorrelerade mottagare: Wild Magnavox WM 101, Texas instruments TI 4100, Trimble 4000 SX.

5.2 KODLÖSA MOTTAGARE

Det finns även mottagare som inte kräver kännedom om koden, sk kodlösa mottagare. Dessa kan inte utföra pseudoavståndsmätning och satellitmeddelandet måste tillföras utifrån. Mottagarklockan måste kontrolleras och justeras då den ej kan uppdateras med satellitsignalen. Två olika metoder används för att utnyttja satellitsignalerna utan kännedom om koden: kvadrerings- och kodfasmetoden.

KVADRERINGSMETODEN:

I kvadreringsmetoden används skillnadsfrekvensen mellan den mottagna och den i mottagaren genererade signalen, den sk "beat-frequency", vilken kvadreras. Detta för att rensa bort kod- och meddelande-modulationen. Man erhåller en signal med samma amplitud som innan kvadreringen men med dubbel frekvens. Man kvadrerar även bruset vilket kan vara en nackdel om brus/signal-förhållandet för signalstyrkan är stort. Metoden kan även användas i kodkorrelerade mottagare i samband med fasmätningen. Exempel på mottagare: Macrometer V-1000.

KODFASMETODEN:

Vid kodfasmetoden mäter man fasen på antingen P- eller C/A-koden. Metoden kräver att man känner till kodens utsändningsfrekvens, (ej själva koden). Exempel på mottagare: Series (JPL), GPS Landsurveyor model 1991 respektive 2002 (ISTAC).

5.3 EN ELLER TVÅ FREKVENSER ?

Det finns mottagare som kan mäta på både L1 och L2 och andra som bara kan mäta på L1-frekvensen.

De flesta militära mottagare kan mäta på båda frekvenserna och de flesta civila endast på L1. Två civila undantag är TI 4100 (kodkorrelerad) och Macrometer II (kodlös). Kodkorrelerade mottagare med mätning på båda frekvenserna kommer förmodligen i framtiden att starkt begränsas för användare utanför USA:s militära intressen.

Fördelen med enfrekvensmottagare är att de blir billigare än tvåfrekvensmottagare. Nackdelen är att jonosfärskorrekturen ej går att lösa lika lätt. Relativ positionering på korta avstånd påverkas ej. Däremot tappar långa baslinjer i noggrannhet. En annan nackdel med mottagare som endast mäter på L1 är att pseudoavstånd bara kan mätas på C/A-koden, dvs den mindre noggranna koden.

5.4 ANTAL KANALER

Hårdvaran är uppdelad på olika kanaler. En del mottagare följer kontinuerligt alla satelliter och har då en kanal för varje satellit. Fördelen med denna lösning är att data är kontinuerligt tillgängliga och man får täta observationer. En nackdel är att signalfördröjningen är olika i olika kanaler, pga variationer i hårdvaran. Exempel på mottagare: Trimble, Macrometer V-1000.

Andra mottagare har färre kanaler än antalet satelliter som kan tas emot, vilket innebär att varje kanal tar emot mer än en satellit. Kod- och/eller bärvågsmätning för de individuella signalerna (satelliterna) sker i mjukvaran (pseudokanaler). Större krav ställs alltså på micro-processorn och programvaran. Nackdelar med metoden är att risken för avbrott i signalsekvensen sk "cycle slip" ökar samt att signal/brus-förhållandet kan försämrats jämfört med kontinuerliga mottagare, eftersom man oftast får färre observationer från varje satellit.

Beroende på hur ofta kanalen växlar mellan olika signaler kan man skilja på multiplexande och sekvensiella kanaler. Multiplexande kanaler samlar data från alla satelliter på 20 msek, (lika lång tid som en "bit" motsvarar i satellitmeddelandet). En del mottagare av denna typ kan använda både L1 och L2 genom att alternera mellan dessa. Exempel på mottagare: Texas Instrument TI 4100.

Om kanalväxlingen ej är synkron med en "meddelandebit" kallas det sekvensiell kanalväxling. En sådan behöver en speciell kanal för att ta emot meddelandet. Alternativt kan satellitmeddelandet samlas in "i förväg". Om L1 och L2 mäts var för sig kan jonosfärkorrektions ej utföras genom att kombinera signalerna. Exempel på mottagare: Wild-Magnavox WM 101.

5.5 SAMMANSTÄLLNING AV MOTTAGARE

Se Staffan Pehrssons examensarbete: GPS - en marknadsöversikt med introduktion, 1986.

6.KORT OM BERÄKNINGSPROGRAM

Nedan följer korta beskrivningar av ett antal GPS-beräkningsprogram som nu förekommer. Vi tar upp både kommersiella och universitetsprogram, men vi gör inga anspråk på fullständighet. Underlaget består av artiklar respektive manualer för de olika programmen.

6.1 BERNPROGRAMMET

Programmet är utvecklat av Astronomiska institutionen vid universitetet i Bern, Schweiz och kan bearbeta data från flera olika mottagare, Texas Instrument TI 4100, Macrometer V1000 och Series-X.

Bernprogrammet är skrivet i FORTRAN 77 och är anpassat för körning på IBM 3037 med operativsystemet OS/VS2 MVS. Programpaketet kan delas upp i tre delar; en mottagarberoende förbearbetning av observationsdata, banbestämning och slutligen uppskattning av parametrar.

Både fasmätning på L1 och L2 samt en "jonosfärsfri" kombination av dessa kan behandlas. För data från kodkorrelerade mottagare kan absoluta positioner och klockparametrar beräknas.

Felsökning görs med hjälp av dubbeldifferenser. Grova fel upptäcks och "cycle-slips" repareras. Den slutliga utjämnningen bygger på dubbeldifferenser. I denna finns möjligheter att beräkna följande parametrar: stationskoordinater, "ambiguities", klockparametrar, jonosfärsparametrar samt upp till sex banparametrar. Vid beräkningen finns möjlighet att ge en kovariansmatris för de approximativa koordinaterna. Beräkning av "ambiguities" kan ske på flera olika sätt. Antingen heltalsbildning genom avrundning, minimering av residualernas kvadratsumma, eller att man tar det flyttal man erhåller vid utjämnningen.

Som resultat från beräkningen ges värden på alla lösta parametrar och deras standardavvikelse både före och efter utlösning av "ambiguities". Om datumparametrar för ett lokalt datum definierats kan man få ut koordinaterna i detta system. Det finns även möjlighet att utföra Helmert-transformation till terrestert koordinatsystem.

6.2 PoPS

PoPS (Post Processing Software) är ett moduluppbyggt program för prediktion av lämpliga observationstider och bearbetning av data från WM 101. Programmet är menystyrt och all datahantering sker av PoPS. Det är möjligt att samtidigt utjämna 10 punkter med upp till 78 obekanta.

PoPS är producerat av WM Satellite Survey Company - ett samarbete mellan Wild Heerbrugg Survey Corporation och Magnavox Survey System Incorporation. PoPS bygger på samma algoritmer som Bernprogrammet.

Programmet är anpassat att användas på en IBM PC-AT eller -XT. Dessutom behövs en Memtec kassettläsare och en skrivare.

Pseudoavstånd beräknas ur C/A-koden och fasberäkningen sker på L1-frekvensen. WM utlovar en relativ noggrannhet av 10 mm + 2 ppm för baslinjer.

I programmets början finns möjlighet att dela in observationsintervallet i kortare perioder, ändra väderobservationer samt rätta till felaktiga indata från fält. Däremot finns ingen möjlighet att redigera satellitdata.

Satellitbanorna bestäms ur Keplers banlagar och "precise-" eller "broadcast ephemeris". Klockkorrektioner och närmekoordinater beräknas ur pseudoavstånd.

Felsökning sker genom polynomanpassning av differenser av på varandra följande mellanstations-differenser, respektive motsvarande för dubbeldifferenser. Lagning av "cycle-slips" sker automatiskt och eliminering av dåliga observationer görs manuellt.

Slutberäkning kan utformas i flera olika varianter, där man kan välja de sessioner och de baslinjer som man vill ha med.

Utanför själva programmet finns en modul som ger möjlighet att ändra satellit-datum.

Se vidare kapitel 7: "Våra erfarenheter av PoPS".

6.3 MAGNET 4100

Programmet är producerat av Magnavox för Geophysical Service Incorporated (GSI) och är avsett att beräkna data från mottagaren Texas Instrument TI-4100. Det är utvecklat för att köras på Texas Instruments PC (Professional Computer), vilken i transportabel version kan användas i fält.

Magnet 4100 genererar inga differenser. Istället bestäms felen i fasmätningarna för varje satellit och mottagare direkt som en del i beräkningen. Detta beräkningssätt spar utrymme.

Första steget i beräkningen är en absolutpositionering, vilken dels görs för att beräkna mottagarklockfel och dels för att beräkna närmekoordinater som en kontroll. Både mätningar av pseudoavstånd och bärvågsfas används. Bärvågsfasen används för att jämma till kodmätningarna.

Felen i den här lösningen domineras av satellitklockfel och banfel.

Relativpositioneringen börjar med en "hyperbolisk lösning", vilken beräknas ur integrerade "dopplercounts". Dessa är ej kontinuerligt integrerade utan där ett slutar börjar nästa på noll. Dopplerobservationerna ger observationsekvationer i form av hyperboliska ytor i rymden. Klockfel för både mottagare och satelliter löses ut. Lösningen är okänslig för "cycle-slips" och används därför i senare steg för att laga sådana. Även klockkorrektioner underlättar sökning av "cycle-slips".

Nästa del av relativpositioneringen är "Doppler Pseudorange", som räknar på kontinuerliga "dopplercounts". Satellit- och mottagarklockfel löses direkt ut. Den hyperboliska lösningen används för att laga "cycle-slips". Vid beräkningen kan användaren välja om atmosfärs-korrektion skall vara med och om beräkningen skall ske på medelvärde av L1 och L2, endast L1, L2 eller på differensen $L1 - L2$. För korta baslinjer ger denna beräkningsmetod och en halvtimmes data från fyra satelliter avståndet mellan de punkter som observerats inom 10 cm och för baslinjer uppåt 100 km inom 20-30 cm.

I slutberäkningen används, förutom det som användes i "Doppler Pseudorange" även initialfasmätningen av "dopplercount". För att enklare kunna bestämma fasfraktionen förstöras man upp denna genom att bilda differensen $L1-L2$ med våglängden 86 cm. Detta går bra att göra för korta baslinjer där jonosfärspåverkan är ungefär lika i båda ändpunkterna. Hur användbar denna extrainformation är beror på hur noga man känner till antalet hela våglängder mellan satellit och mottagare. Positionen från tidigare beräkningar bör vara känd inom en halv våglängd.

Beräkningsmetoden ger relativa positioner med en noggrannhet av ungefär 1 cm på 5 minuters data för korta baslinjer. Längre baslinjer tar betydligt längre tid då jonosfärspåverkan ställer till problem, (50 km tar ungefär 1 timme).

Geophysical Service Incorporated, Dallas, Texas har utfört några försök med data från TI 4100-mottagare och beräknat med programvaran Magnet 4100. I ett av försöken var två mottagare kopplade till samma antenn. Vid 11 minuters observation erhöles följande radiella fel: 73 mm för den hyperboliska metoden, 35 mm för dopplermetoden, samt 3 mm för den slutliga beräkningen.

6.4 TRIMVEC

Trimvec beräknar relativa positioner för baslinjer och är producerat av Trimble Navigation Limited, California.

Programpaketet består av tre delar; datainsamling, baslinjeberäkning och datumtransformation. Datainsamlingen utförs på Trimble Model 4000SX GPS-Surveyor samt en transportabel dator. Med denna utrustning kan data samlas in och satellitkonfigurationen studeras (satellit-översikt och diagram över azimuth, elevation och PDOP kan erhållas.)

Baslinjeberäkning och datumtransformation görs på en IBM PC-kompatibel dator med matematikprocessor 8087 och 640 KByte RAM. En printer och en hårddisk underlättar beräkningarna.

Tillverkarna specificerar följande noggrannheter för Trimble 4000SX och Trimvec:

Baslinjer: 10mm + 5 ppm
Azimut: 1" + 10"/(längd i km)

Beräkningarna tar 10-30 minuter beroende på antal cycle-slips, datorns beräknings-hastighet och observationstid.

Efter det att data samlats in överförs data till PC'n. En session kan bestå av upp till 666 epoker och en epok av en multipel av 15-sekunders intervall. Sessionsindelning och epokintervall väljer man. När filen lästs in finns möjlighet att ändra antennhöjd och initialposition. Då två samtidiga observationsfiler lästs in görs en preliminär baslinjeberäkning, som lagras för senare användning.

Därefter dyker en huvudmeny upp. Denna innehåller 16 alternativ, varav ett leder till en meny med redigeringsmöjligheter av data och parametrar.

Före bearbetning har man möjlighet att titta på i fält erhållna data; epoknummer, GPS-tid, elevation, stationsnummer, satellit, pseudoavstånd och residualer för pseudoavståndet. Om residualerna är höga (> 200 m), kan pseudoavståndet och klockkorrektionerna för varje epok beräknas om för att få ner residualerna.

För vidare beräkningar kan man välja mellan automatisk och manuell bearbetning. Om residualerna för pseudoavståndet är mindre än 100 m, baslinjen kortare än 30 km samt att 4-5 satelliter är observerade under minst en timme, kan den automatiska bearbetningen användas. I denna har man möjlighet att använda förutbestämda värden på beräknings-parametrarna eller själv välja dessa.

Den automatiska bearbetningen omfattar följande moment: trippeldifferens-lösning med var 5:e epok, lagning av "cycle-slips" samt dubbeldifferens-lösning före och efter "ambiguities" är satt till heltal. Ingen jonosfärmodell används för att korrigera jonosfärens påverkan, men för troposfärskorrekationer används Marini's modell.

Resultatet innehåller koordinater, baslinjekomponenter, kovariansmatris samt uppgifter om kvaliteten. Mha kvalitetsuppgifterna kan man bedöma om man skall utföra beräkningarna manuellt. I den manuella beräkningen ingår samma moment som i den automatiska, men här sker beräkningarna stegvis och det finns möjlighet att eliminera satellitobservationer.

Datumtransformation mellan NAD27, WGS 72 och WGS 84 är möjlig. Dessutom kan transformation till kartprojektions-system ske från NAD27.

6.5 GEONAP

GEONAP (GEODETIC NAVSAT POSITIONING) är ett beräkningsprogram för data från TI 4100 utvecklat vid universitetet i Hannover. Både fasmätningar på koden och på bärvågen utnyttjas. Programpaketet är uppbyggt i moduler.

Den första modulen strukturerar upp och dekodar rådata filer från mottagaren. Nästföljande modul redigerar automatiskt rådata, söker "cycle-slips" och beräknar "ambiguities" för bärvågsmätningarna. Dessa kan beräknas ur följande formel, om man har tillgång till kodmätningar:

$$N/f_c = \Phi_p/f_p - \Phi_c/f_c + \Delta T_p - \Delta T_c$$

där:

- N = "ambiguity", dvs antal hela våglängder vid fasmätningens början
- f_c = frekvens för bärvågen
- f_p = frekvens för koden
- Φ_c = bärvågens fas
- Φ_p = kodens fas
- ΔT_p = tidsfördröjning pga atmosfären för kodmätningen.
- ΔT_c = tidsfördröjning pga atmosfären för bärvågsmätningen.

Med hjälp av de beräknade "ambiguities", kan satellit-signalens transmissionstid bestämmas med bärvågsmätningens noggrannhet, vilken är ca 0.01 nsek. Det motsvarar c:a 3 mm jämfört med kodmätningens noggrannhet som är 2 nsek (0.60 m). Till detta tillkommer för långa baslinjer med olika atmosfär i ändpunkterna, en "bias" på några våglängder. Tiderna används för att beräkna pseudoavstånd på vanligt sätt.

"Cycle-slips" söks och lagas genom att bärvågsfasen predikteras för nästa epok och jämförs med den mätta fasen. Prediktionen består av ett polynom, beräknat ur tidigare mätningar. Metoden fungerar bra genom att TI 4100 ger täta observationer.

Nästa modul adderar de utlösta "ambiguities" till fasmätningarna samt utför jonosfärskorrektion. Möjlighet finns att välja mellan L1, L2 eller båda fasmätningarna. Programmet är förberett för att kunna använda en jonosfärmodell, vilken behövs när man endast har fasmätningar på en frekvens och har långa baslinjer.

Därpå följer en modul, som kontrollerar och dekodar navigationsmeddelandet. Överflödigt information rensas bort. Data används för att beräkna utjämnade satellitbanor med hjälp av polynom-modeller.

Därefter utförs korrektioner på mätningarna respektive satellitkoordinaterna för "klockoffset", relativistiska tidseffekter, jordrotation och troposfär. En absolutposition beräknas ur "pseudoavstånd" för varje observations tidpunkt samt en utjämning för hela tidsintervallet. Stationskoordinater, en polynommodell för mottagarklockan och partiella derivator för banparametrarna med avseende på avståndet beräknas.

Slutligen utförs en samtidig utjämning av hela nätet. Man kan välja vilka parametrar som skall ingå i utjämnningen. Följande är möjliga:

- stationskoordinater
- klockkorrektioner för mottagare och satellit på polynomform
- troposfäriska parametrar
- upp till sex av Keplers banparametrar
- "ambiguities"

Programmet är även förberett för additiva parametrar. Kovariansmatris för satellit- och mottagarklockfel används. Apriori kovariansmatris för övriga parametrar kan också ges.

6.6 DIPOP

Dipop (Differential Positioning Program), är utvecklat av universitet i New Brunswick, Canada, och kan beräkna data från Macrometer V-1000 och TI 4100. Programmet körs på en HP 1000 minidator från en kommandofil som skapats i interaktion med användaren.

Det finns möjlighet att kombinera L1- och L2-mätningar till en jonosfärsfri modell. Även atmosfärsmodeller kan användas, tex Hopfield.

Programpaketet kan delas upp i tre delar:

- mottagarberoende förbearbetning
- beräkning
- resultat

I förbearbetningen skapas dubbeldifferens-filer på bärvågs-fas data och "cycle-slips" spåras och elimineras. Sökning sker efter de "broadcast ephemeris" som bäst motsvarar tiderna för observationerna. Koordinater och hastigheter för satelliterna beräknas i WGS 72 eller WGS 84.

I beräkningen utjämnas dubbeldifferenser från förbearbetningen sekvensiellt i en MK-utjämning.

I ett försök våren 1985 ("High Precision Baseline Test") med baslinjer mellan 245 och 3742 km, som utfördes med "broad-cast ephemeris", erhöll man en avvikelse från VLBI (Very Long Baseline Interferometry) på 0.5 till 1.8 ppm.

Utveckling:

Programmet är under vidare utveckling och det är tänkt att det skall kunna hantera data från alla mottagare. En annan filosofi är att alla obekanta parametrar ("ambiguities", klockfel, troposfärens och jonosfärens påverkan och banfel) skall kunna lösas ut och inte bara elimineras. Man använder rå-observationer och slipper därigenom att bilda enkel- och dubbeldifferenser samt de korrelationer som dessa medför. I stället inför man extraparametrar för varje satellit och mottagarklocka. Vikter och korrelationer mellan parametrarna kan varieras.

En ny version av programmet, DIPOP 2.0, presenterades på IAG's konferens 1987, i Vancouver, Canada. Programmet är implementerat på IBM PC och VAX. Versionen finns beskriven i "Precise Relative GPS Positioning with DIPOP 2.0" av R. Santerre mfl, se referenser.

6.7 PHASER

Phaser (NGS GPS processing system), är producerat av National Geodetic Survey (NGS), Rockville, Maryland, 20852 USA. Programmet bearbetar fasmätningar från flera olika mottagare, (än så länge: TI 4100 och Macrometer V1000). Beräkning av baslinjer sker på "råa" observationer - dvs utan att bilda differenser. Programmen är skrivna i Fortran 77. Själva beräkningsprogrammet körs på HP-9000 och HP-A9000 minidator. I framtiden kommer förbearbetande steg att kunna genomföras på en PC i fält.

Programmet består av tre delar: - Förbearbetning
- Beräkning
- Efterbearbetning

I förbearbetningen läses data in på en IBM PC mha en Memtec kassetläsare och överförs till flexskivor. Exakta tider för observationernas start och stopp, och andra uppgifter anges. Observationsmaterialets fullständighet, och i viss mån kvaliteten, kontrolleras. Slutligen skapas filer för initialpositioner och en "logfil" för hela projektet, som innehåller data om projektet och stationerna.

Beräkningssteget består av fyra moduler, varav Phaser är en. Alla modulerna är interaktiva men det finns hjälpprogram som skapar filer för "batchkörning". Antal epoker är begränsat till 121. Om det är fler inspekterade epoker läggs de samman så att antalet ej överstiger 121. Maximalt antal epoker, mottagare och satelliter är specificerat i början av Phaser och kan där ändras av användaren.

Nästa modul beräknar absolutposition med hjälp av pseudoavstånd, (med en noggrannhet av c:a 10 m), samt korrigerar tidsmarkeringarna. Om "precise ephemeris" är tillgängliga kan stora "cycle-slip" lagas redan för en enskild punkt. Denna modul används bara på data från kodkorrelerade mottagare.

Därpå följer en modul som förbereder fasobservationer till Phaser. Phaser kan bearbeta fasmätningar på L1 och L2 samt tre linjära kombinationer av dessa. L3 är en jonosfärsfri linjär kombination. L4 är differensen, med en våglängd på 83 cm som förenklar bestämningen av "ambiguities". L5 är medelvärdet av L1 och L2, vilket får ett lägre brus. Vilka kombinationer som skall användas beror på baslinjelängder, signal-brusförhållande och om jonosfärskorrektions skall utföras.

I Phaser beräknas först en preliminär trippeldifferenslösning på L3, eller L1 om endast en frekvens är tillgänglig. Beräkning sker av punktkoordinater och klockkorrektioner. Denna metod används, då den är fri från avbrott i signalsekvensen.

Trippeldifferenslösningen används sedan i en automatisk rutin som lagar avbrott i signalsekvensen hos fasmätningarna på L1 och L2. Rutinen räknar ut residualer för dubbeldifferenser och där residualerna är högre än 0.5 perioder, läggs ett lämpligt heltal till. Residualer mellan 0.3 och 0.5 perioder, markeras som en hjälp vid manuell sökning av halva "cycle-slip" och andra dåliga observationer.

En slutlig utjämning kan sedan ske på de redigerade "rå-observationerna". För "multistationslösningar väljes en basstation och en satellit. Om två frekvenser finns tillgängliga, används L4, då det är enklast att med denna bestämma "ambiguities". Olika heltal provas tills man hittar den kombination som ger minst kvadratsumma av residualerna. De parametrar som verkar riktiga, låses fast vid en nästa utjämning. För långa avstånd (> 100 km), får de obekanta parametrarna vara lösa och istället används L3. Noggrannheten i baslinjerna blir på detta sätt , c:a 1-3 ppm.

I efterbearbetningen sker en felsökning i hela nätet.

7 VÅRA ERFARENHETER AV POPS

I det här kapitlet redogör vi för och diskuterar beräkningsprogrammet PoPS (version 1.04), som är producerat av WM Satellite Survey Company (Magnavox Survey Company Inc och Wild Heerbrugg Survey Corporation). Kapitlet börjar med en kort beskrivning av programmet, hårdvaran och manualen. Därpå följer en detaljstudie av programmet, i vilken vi först tar upp gemensamma delar som t ex menyer och logfiler, och därefter behandlas varje programmodul för sig.

7.1 BESKRIVNING AV POPS

PoPS är ett program för att beräkna data från WM101, dels prediktion av lämpliga observationstider och dels bearbetning av insamlade data. Det är möjligt att samtidigt utjämna upp till 10 punkter, med totalt 78 obekanta (koordinater, "ambiguities" och klockparametrar). Dock maximalt 60 "ambiguities. Pseudoavstånd beräknas ur C/A-koden på L1-frekvensen och fasberäkningen sker på L1-frekvensen.

Programmet består av moduler som var och en kan användas var för sig. Dock kräver de viss turordning. Menyer visar vilka alternativ som finns och vad som sker. Programmet är välstrukturerat och goda försök har gjorts för att göra det användarvänligt. Det känns dock trög-arbetat i modulen för dataöverföring och det förekommer väl många manuell interaktiva ingrepp. Det kan troligen rättas till i kommande versioner.

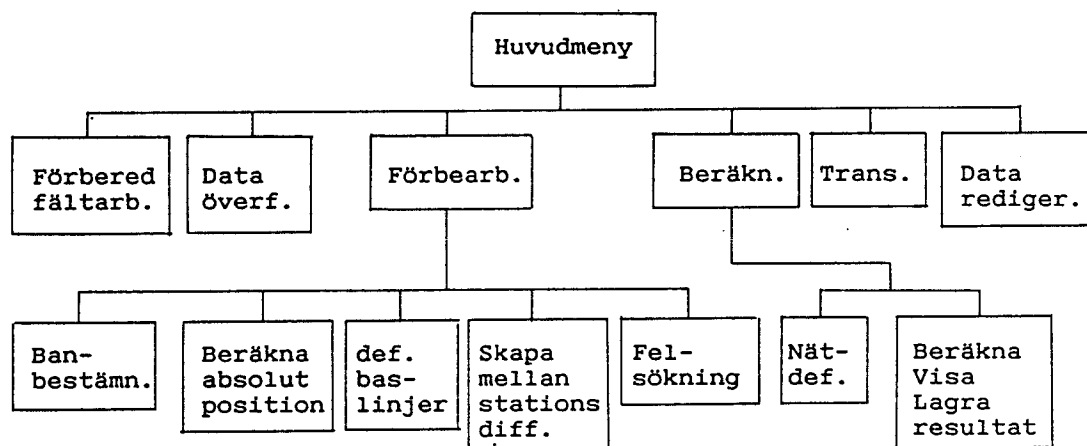


Fig 14 PoPS modulstruktur

Förberedelse för fältarbete: Programmets första modul används i samband med att kampanjen planeras. Man får möjlighet att studera lämpliga observationstider och vilka satelliter som finns tillgängliga.

Dataöverföring: När data samlats in på kassett gäller det att överföra data till PoPS-programmets databas. Eventuellt indelas även observationsintervallet i kortare perioder sk sessioner. Man får även möjlighet att komplettera med väderobservationer, rätta till felaktiga signalhöjder mm.

Förbearbetning: Innan slututjämnningen måste satelliternas banor, närmevärden för koordinater och klockkorrektioner bestämmas. Baslinjer definieras och mellanstations-differensfiler skapas. Felsökning mha dessa filer gör att man kan hitta avbrott i signalsekvensen, sk "cycle slips".

Beräkning: Slutberäkningen är möjlig att göra i flera olika versioner. Man kan välja vilka sessioner och baslinjer som skall vara med i utjämnningen, samt variera ett antal parametrar och välja om manuella väderobservationer skall användas.

Transformation och resultat: Någon transformation kan inte utföras, men WM har tänkt att komplettera med det. Dock kan man erhålla vissa uppgifter om beräkningens omfattning samt en varians/kovarians-matris för de beräknade koordinaterna.

Redigering: Används då man ej blivit nöjd med beräkningsresultatet och behöver ändra på sessionsindelningen. Modulen kommer i framtiden att kompletteras med fler komponenter.

7.2 HÅRDVARA

Programmet är anpassat att användas på en IBM PC-XT eller -AT. Primärminnet är på 640 KByte och hårddisk på 10 resp 20 MByte. Diskdrive för 360 KByte resp 1,2 MByte. För IBM-kompatibla maskiner är det ej säkert att programmet fungerar utan problem.

Även en Memtec kassettläsare samt en skrivare behövs.

7.3 MANUALEN

Till PoPS-programmet hör en manual, som beskriver installation, program samt ett övningsexempel. De första kapitlen behandlar introduktion, installation och programöversikt. Därefter kommer övningsexemplet. De följande kapitlen beskriver i detalj de olika modulerna.

Varje kapitel som beskriver en programmodul är uppdelat i en teoribeskrivning och en användarbeskrivning. Varje moment i programmet beskrivs i ett delkapitel. Till varje

delkapitel finns ett flödesschema som i stora drag beskriver programstrukturen.

Någon användbar programöversikt finns inte. Det krävs i stället att man läser stora delar av manualen för att erhålla den nödvändiga grovstrukturen av programmet. Inte heller någon förkortad manual tillhandahålls av WM.

Manualen beskriver de möjligheter som finns i detalj, men konkreta råd och anvisningar förekommer mycket sparsamt. Konsekvenser av beslut utelämnas oftast helt. En bilaga som utlovas i innehållsförteckningen och som skall innehålla algoritmer är ännu ej tillgänglig. Det begränsar användarens möjlighet att förstå hur programmet utför de olika beräkningarna och försvårar därmed besluten som operatören måste ta.

Det finns inget register, vilket gör det svårt att hitta i manualen.

7.4 DETALJSTUDIE AV PoPS (Version 1.04)

INNAN START AV PoPS:

Innan man startar är det vissa saker man måste förvissa sig om. För det första gäller det att använda rätt satellitdatum (WGS72 eller WGS84). Man kontrollerar och ändrar detta med programmet POPSCDP. En mindre bug i programmet gör att det alltid står WGS 72 i utskrifterna, oavsett vilket datum som definierats. Tag därför ut en utskrift på datumparametrarna (från skärmen) för att veta vilket datum som används. Alla kampanjer som bildas (se nedan) efter datumbyte erhåller det nya datumet. Då det ej går att använda annat än nyformaterade disketter till "back-up", bör sådana finnas eller produceras.

DÅ MAN STARTAR PoPS:

I MS Dos (operativsystemet) kan datorns minnesutrymme fördelas enligt en trädstruktur. PoPS använder denna för att lagra de kampanjer som bearbetas. Innan bearbetning av en kampanj börjar måste man skapa ett sk "campaigndirectory". Då man sedan startar PoPS får man möjlighet att lägga in ett databashanteringssystem i detta "directory". Här lagras alla data som bildas i kampanjen.

MENYER:

Man kommer nu att lotsas fram i programmet mha menyer och funktionstangenter. Funktionstangenternas funktion finns beskrivna på varje meny. Till varje meny finns en hjälpmeny, som skall beskriva de val man kan göra. Dessvärre fattas ofta informationen eller är bristfällig. Menyerna ger trots sitt stora antal ej en komplett bild av programmet, och det kan vara svårt att urskilja informationen bland alla linjer och tecken.

LOGFILER:

I vissa av programmodulerna ("Dataöverföring", "Absolutpositionsbestämning" och "Felsökning") skapas det logfiler som lagrar en stor del av den information som erhålls på skärmen. Logfilerna i "Dataöverföring" och "Absolutpositionsbestämning" ackumuleras så länge man är inne i programmodulen. Logfilen i "Felsökningsmodulen" ackumuleras endast för varje baslinje. Dessa filer är vidlyftiga till sitt omfång och innehåller mycket information, men saknar samtidigt en del av det som visas på skärmen (ex: Logfilen för "Dataöverföring" innehåller ingen information om data inmatade i fält.) Logfilen för "Felsökning" tappar här och var rader (tex vilket polynom som använts och RMS i polynom Anpassningen vid felsökning mha mellanstationsdifferansfiler). Det vore bättre om man kunde få välja vilken information, som skulle erhållas på skrivaren. Även en sammanställning av delresultat för hela kampanjen vore mycket användbar.

FÖRBEREDELSE FÖR FÄLTARBETE:

I samband med att kampanjen planeras har man möjlighet att för en viss tidsperiod och plats erhålla information om satellitpassagera. Informationen omfattar vilka satelliter som är tillgängliga samt elevation, azimut, "GDOP" och "PDOP" för dessa. Med hjälp av denna information kan man i detalj planera sina mätningar. Informationen erhålls grafiskt eller numeriskt. Den numeriska informationen av azimut och elevation är bra. Även de grafiska "GDOP" och "PDOP" är bra. Däremot är den grafiska azimuten svårtolkad. Det på andra håll kombinerade elevation- och azimutdiagram (cirkeldiagram) är att föredra, då det räcker med ett lättläst diagram för alla satelliternas elevation och azimut. I den här modulen kan man välja vilken information som skall skrivas ut på skrivare. Bra.

DATAÖVERFÖRING:

De i fält insamlade data skall överföras till rätt kampanj i POPS. Dessa filer läses in med kassettläsare eller då det finns kopia på diskett kan denna användas.

I samband med inläsningen får man möjlighet att redigera de i fält registrerade uppgifterna om stationen, som antennhöjder osv. Denna redigering är endast möjlig i detta steg. Även väderobservationer kan kompletteras. Någon möjlighet att redigera satellitdata finns dock ej.

Innan mätdata tilldelats en kampanjpunkt, kommer det upp en meny med tre alternativ, varav "Match cassette and campaign sites" är ett. De andra två är den ovan nämnda redigeringen, vilken måste utföras innan "Match ..." - sen är det för sent. Om det visar sig att t ex en antennexcentricitet är fel efter det att man passerat

detta steg, måste man dessvärre läsa in och starta upp hela kampanjen från början eller läsa in en säkerhetskopia som innehåller de tidigare utförda beräkningarna.

Vid "Match..."definierar man de punkter som skall vara med i kampanjen samt tilldelar mätdata till dessa. Max tio punkter kan definieras. Då ett kampanjpunktnamn blivit definierat, går det ej att ändra. Detta innebär att då man läst in data som senare visar sig vara oanvändbara kan kampanjpunktnamnet ej bytas ut mot ett nytt.

Efter "Match.."(se ovan) erhålles sessionsgränser i början och slutet av den sammanhängande observationsperioden. Om denna är längre än tre timmmar påtvingas man den goda möjligheten att själv välja sessionsgränser. I annat fall mister man denna möjlighet. Vill man ändå ändra sessionsindelningen, måste man utnyttja "Redefine all sessions", vilket förstör alla eventuella beräkningar som gjorts på det tidigare inlästa materialet i kampanjen. Detta är en betydande brist i programmet och begränsar handlingsfriheten starkt.

Logfilen ackumuleras så länge man befinner sig i modulen, och kan endast skrivas ut i sin helhet då sista filen överförs och man har återvänt till dataöverföringens huvudmeny. Som tidigare nämnts saknas intressant information samtidigt som vidlyftig information av mindre intresse erhålls.

FÖRBÄRBETNING - BANBESTÄMNING:

Modulen är helt automatisk. Satellitbanorna beräknas mha Keplers banlagar och "precise" eller "broadcast ephemeris".

FÖRBÄRBETNING - ABSOLUT POSITIONSBESTÄMNING:

Här beräknas positioner och klockkorrektioner ur pseudoavstånd. Senare i programmet används positionerna som närmevärden och klockkorrektionerna som kända. Beräkningarna sker punktvis för varje session. Vilka sessioner man har behandlat anges ej i programmet. Det måste man därför själv hålla reda på.

Vid själva beräkningen "flimrar" RMS för polynom-anpassningen av pseudoavstånden för varje satellit förbi. Detta värde måste observeras av operatören. Det vore bättre om dessa värden redovisas i en sammanställning.

När beräkningen är klar har man möjlighet att titta på koordinater, klockkorrektioner, residualer och elevationer samt skriva ut en logfil. I logfilen finns allt ackumulerat som man tittat på. Det vore bättre om man kunde välja ut vad man vill ha med i logfilen samt få en sammanställning av vissa utvalda delresultat från beräkningarna i kampanjen. Logfilen ligger dessutom ologiskt placerad och måste skrivas ut då sista punkten är beräknad men inte lagrad. Programmet ger inte information

om vad som skall noteras och hur operatören skall agera. Manualen ger inte heller en komplett beskrivning av hur man skall agera.

FÖRBEARBETNING - BASLINJEDEFINITION:

Kampanjpunkterna kopplas mha baslinjer samman till ett nät. Definition av baslinjer kan göras automatiskt eller manuellt. Två olika typer av nät används; stjärnnät (med en knutpunkt) eller öppet nät.

FÖRBEARBETNING - SKAPA MELLANSTATIONS-DIFFERENSFILER:

Filer med mellanstations-differenser bildas för baslinjerna. Modulen är i stort sett automatisk.

FÖRBEARBETNING - FELSÖKNING:

Felsökning sker genom polynomanpassning av differenser mellan på varandra följande mellanstations-differenser respektive dubbeldifferenser. Man kan då hitta avbrott i signalsekvensen, sk "cycle-slips" och även laga dessa. Man behandlar först mellanstations-differenserna och sedan när man är nöjd med dessa, efter eventuell iteration, går man vidare till dubbeldifferenserna.

Under beräkningens gång erhåller man RMS för polynomanpassningen. Det är samma sak här som vid "Absolut positionsbestämning", att operatören måste notera detta värde. Den detaljbeskrivning som finns i manualen om hur operatören skall agera, verkar ej helt utprovad och kan skapa stora problem, då den ibland leder till felaktiga lagningar av "cycle-slips" och därmed konstiga resultat.

Vid felsökning mha mellanstations-differens har det visat sig bättre att endast ta bort dåliga satelliter och därmed ge ett långt högre toleransvärde för lagning av "cycle-slips" än manualen rekommenderar.

Därefter följer direkt felsökning mha dubbeldifferenser, vilken utförs för hela och halva "cycle slips". Även här finns ett RMS för polynomanpassningen som flimrar förbi och som operatören får titta efter.

Då baslinjen är behandlad, men innan nästa är påbörjad finns en logfil ackumulerad, dock endast för den aktuella baslinjen. En sammanställning vore bättre. Logfilen är dessutom svårtolkad. Den anger t ex ej om det gäller hela eller halva "cycle-slips".

BERÄKNING:

Modulen kan beräkna nät med upp till tio kampanjpunkter och 78 obekanta. (I praktiken har det dock visat sig att programmet inte alltid klarar av 78 obekanta, då det även finns en begränsning om 60 "ambiguities" - se "GPS på Bjäre" av A.Håkansson.) Man väljer vilka sessioner och vilka baslinjer som skall vara med i beräkningen. Man kan därför antingen beräkna endast en baslinje eller en session i taget eller göra en utjämnning av hela nätet. Det kunde få finnas med betydligt fler punkter än de 10 kampanjpunkterna i kampanjen, även om man i själva utjämnningen hade en begränsning enligt ovan.

Noggrannheten i baslinjeberäkningarna specificeras av Wild-Magnavox till 10mm+2ppm.

I manualen finns en detaljerad beskrivning av hur operatören skall agera. Man rekommenderas att beräkna om klockkorrektionen om RMS för koordinaterna är dåliga. Det borde istället bytas ut mot RMS för klockoffset. Beskrivningen är utspridd i manualen och kunde hellre sammanställas.

Någon logfil finns ej till modulen utan man kan välja vilka utskrifter man vill ha. Man kan erhålla kartesiska koordinater, geodetiska koordinater, antal hela våglängder sk "ambiguities", lutande längder, nätdefinition samt residualer för dubbeldifferenserna. Den senare går dock endast att få ut på skärmen.

Efter att man erhållit de resultat man vill ha, kan resultatet lagras. Observera att om någon beräkning gått snett och man erhållit dåliga data, bör dessa ej lagras, då de lagrade värdena används som startvärden i fortsättningen.

Det kapitel i manualen som behandlar beräkningsmodulen beskriver vissa delar ingående, medan andra delar borde beskrivas mer detaljerat. Även de delar som beskrivs ingående lämnar många frågetecken. Här saknas även appendix B, (skall innehålla algoritmer) som det stundtals hänvisas till.

TRANSFORMATION OCH RESULTAT:

Programmodulen är ej klar och saknar än så länge den del som skall utföra transformationer. Uppgifter om utjämnningen och varians/kovariansmatris för beräknade koordinater kan erhållas. Beräkningsmodulen hade varit en mer logisk placering för dessa uppgifter.

REDIGERING:

För närvarande finns det endast möjlighet att redigera sessionsindelningen. Det är planerat att nya redigeringsmöjligheter skall tillkomma. Då sessionsindelningen görs om raderas nära allt som beräknats. Det vore bättre om man kunde välja vilka observationsintervall som man vill dela in i nya sessioner. Som det nu är tappar man alla ev beräkningar enligt ovan. Detta nära nog omöjliggör att ett observationstillfälle beräknas innan kampanjens alla observationer fullföljts och matats in (se även "Data-överföring").

Vid redigering av sessioner erhålls meddelande om att data organiseras till sessioner. Sessionsindelningen och alla beräknade värden finns dock kvar tills man använt alternativet "Redefine all Sessions".

7.5 TIPS

Efter de erfarenheter vi fått av beräkningar med PoPS, har vi här sammanställt en del tips:

Mät mer än tre timmar på minst ett band vid varje observationstillfälle. Detta öppnar möjlighet att välja en egen sessionsindelning (se kap. 7.4 Data-överföring).

Ha färdigformaterade disketter till hands för säkerhetskopiering innan start av programmet.

Se till att det är rätt satellitdatum (WGS 72 eller WGS 84) som används i kampanjen. (OBS! Det står alltid WGS 72 i PoPS även om det är ett annat datum.)

Beräkna varje dags mätningar sessionsvis under mätningkampanjens gång. Detta gör att man upptäcker dåliga eller oanvändbara mätningar och kan rätta till detta.

Ta hellre en utskrift av skärmen för de uppgifter som är intressanta än att ta ut de långa logfilerna. Om logfil används - se upp med hur den ackumuleras, vad som lagras, när den erbjuds och när det är lämpligt att skriva ut den.

Sammanställ intressanta delresultat och andra uppgifter av intresse efter hand som man erhåller dessa. Detta möjliggör snabbare och bättre beslut under beräkningens gång. Dessutom är det bra att dokumentera de beräkningar som man gjort och inte endast spara ett färdigt resultat. Se förslag på sammanställningsprotokoll i bilaga A7:1-4. Filosofin för felsökningen verkar ej helt utprovad. Det förslag som ges i manualen kan säkert förbättras. Prova gärna själv olika varianter och jämför.

För datorer av annat märke än IBM - var beredd på att programmet kanske inte fungerar fullständigt.

7.6 TIDSANGIVELSER FÖR POPS

I artikeln "PoPS: A new Generation of GPS Post-Processing Software" av Erwin Frei mfl anges ungefärliga tider för olika beräkningssteg. Tiderna hänför sig till beräkningar på en kampanj, som omfattar tre dagar med 1.5-2 timmar observationstid och fyra mottagare varje dag. Beräkningarna är gjorda på IBM PC-AT och data överförda från kassett. Vi har uppskattat tider för motsvarande exempel. Uppskattningen grundar sig på tidsmätning och omräkning till ovanstående exempel. Våra tidsangivelser är konsekvent tider för att genomföra de olika beräkningsstegen. WILD redovisar för den slutliga beräkningen endast ren datorbearbetningstid och för övriga beräkningssteg motsvarande våra tider. Alla tidsangivelser är i minuter. Se tabellen nedan.

	<u>WILD</u>	<u>Våra</u>
Förberedelse för fältarbete	-	10
Dataöverföring	60	60 *1
Förbearbetning - Banbestämning	<2	1
- Absolut positionsbestämning	24	60
- Baslinjedefinition	1.5	2
- Skapa mellanstations-diff.filer	6	6
- Felsökning	40.5	90 *2
Beräkning - Baslinjer	18	100 *3
- Session	12	25
- Helt nät	12	15

*1 ingen redigering av väderdata

*2 ingen sökning av halva "cycle-slips"

*3 varje baslinje i varje session beräknad för sig

Tab 1 Tidsangivelser

De tider som vi anger är c:a-tider, som en van användare enligt vad vi bedömer kan sträva mot. För oss har det i början tagit längre tid och det krävs att man har en klar strategi för att klara tidsangivelserna. Till detta tillkommer att studera delresultat och utvärdera dessa. Tiderna är även beroende på hur goda mätdata man erhållit. Har man otur kan observationsmaterialet vara av lägre kvalitet, vilket påverkar tidsåtgången.

7.7 ÖVRIGA KOMMENTARER

Det är lätt att peka på de fel och brister som programmet har pga att programmet är välstrukturerat. Detta gör att kommande versioner emotses med stort intresse.

8 PLANERING OCH ERFARENHETER AV BERÄKNING

8.1 BESKRIVNING AV MÄTKAMPANJEN

ALLMÄNT:

Den mätkampanj som vi använder för våra beräkningar utfördes av Lantmäteriverket (LMV), KTH och Wild i november 1986. Den omfattar tre dagar och utfördes i "Mårtsbonätet", i trakten omkring Gävle. Totalt användes sex olika punkter. Varje dag mättes tre punkter i c:a 2.5 timmar. En av punkterna, Mårtsbo, användes varje dag under hela kampanjen. Bland de övriga punkterna var det endast Hille som användes två gånger (dagar). Observationerna startade med antingen ingen eller mycket begränsad uppvärmning genomförd för mottagarna. Se tabell nedan.

SCHEMA ÖVER PUNKTER, OBSERVATIONS- SAMT UPPVÄRMNINGSTIDER:

Dag 1:	Hille	2:11-5:00	GMT	0	minuter
	Mårtsbo	2:17-5:01	"	8	"
	Nyhammar	2:22-5:05	"	13	"
Dag 2:	Västerbo	2:21-5:00	"	20	"
	Mårtsbo	2:22-4:59	"	10	"
	Mårtens Klack	2:05-4:53	"	3	"
Dag 3:	Sälgsjön	2:12-5:01	"	12	"
	Mårtsbo	2:11-5:01	"	9	"
	Hille	2:05-4:57	"	6	"

Tabell 2 Punkter, observations- och uppvärmningstider

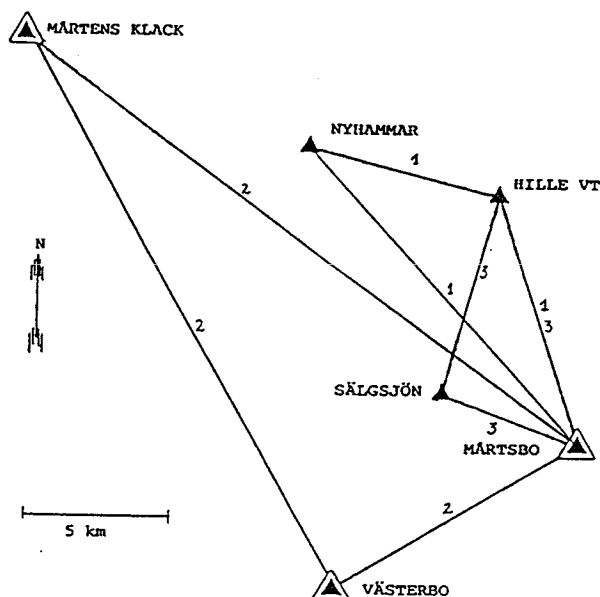


Fig 15 Mårtsbonätet med observerade baslinjer. samt index för observationsdag.

PUNKTBESKRIVNINGAR:

Hille: Belägen på Hille Vattentorn. Några antenner.

Mårtens Klack: 15 meter högt trätorrn. Ligger högre än de övriga punkterna i nätet, på en ca 100 meter hög kulle. Omgivningen är skogsbevuxen men når ej upp till trätornets topp.

Mårtsbo: Södra betongpelaren belägen på "balkongen" vid Mårtsbo observatorium. Kupolerna vid observatoriet når över antennen men understiger 15° lutning mha 0.70 meters förlängning. Taket till observatoriet (plant) består av svart takpapp och balkongen av galvaniserad metall. De ligger ca 2 meter (m) under antenncentrum.

Nyhammar: Skogsglänta ca 20 m i diameter. En tall ca 16 m hög står ca 12 m från punkten. Den övriga skogen når omkring 10 m:s höjd. Mast användes med höjden 11.57 m.

Sälgsjön: Skogsglänta ca 15 m i diameter. Den omgivande skogen når ca 12 m höjd. Mast användes med höjden 10.87 m.

Västerbo: Punkten belägen i skogområde med stationärt torn, 31 m högt. Omgivande skog ca 10 m hög.

ATMOSFÄR:

Fem av de sex punkterna ligger samlade med ett maximalt avstånd av c:a 25 km, i lägre terräng. Mårtens Klack ligger avsides på en högre nivå (200 m högre), vilket kan göra att den punktens atmosfär (troposfär) avviker från de övriga.

SATELLITERNAS ELEVATION OCH AZIMUT:

Under observations-perioderna (kl. 2:00-5:00 GMT), observerades totalt fem satelliter (satelliterna: 6,9,11,12 och 13). Även satellit 8 var "synlig". Denna observerades dock ej, pga oscillator-problem hos satelliten.

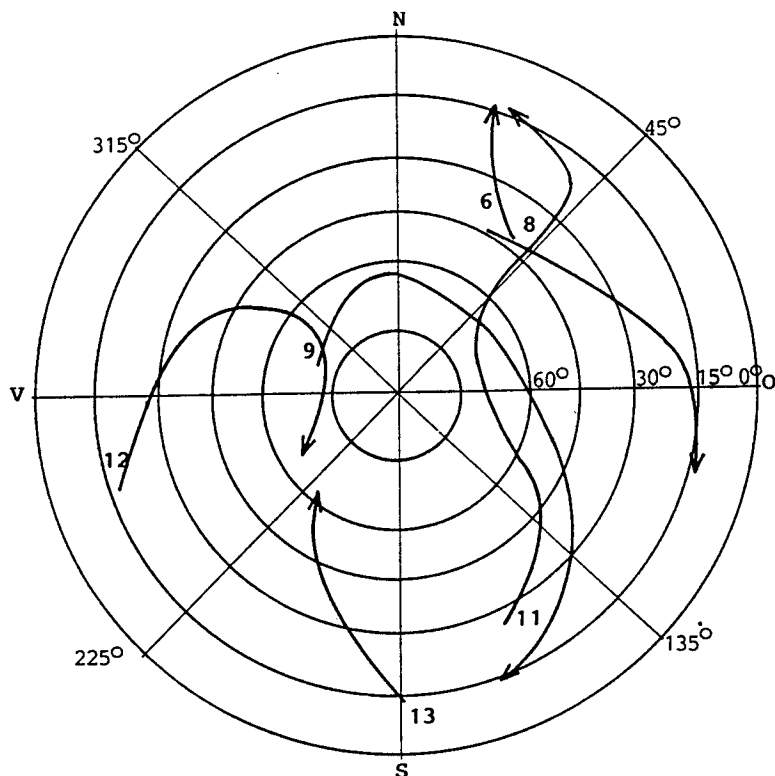


Fig 16 Polärddiagram, som visar satellittäckningen i Mårtsbonätet under observationsperioderna.

8.2 MÅL FÖR BERÄKNINGSARBETET

Syftet med den här delen av examensarbetet är bla att se hur bra man klarar av att använda ett program (PoPS) för bearbetning och beräkning av GPS-observationer, utan utbildning på programmet eller någon handledning - endast med möjlighet att rådfråga utbildad personal. Kan man på detta sätt erhålla lika goda resultat som någon med stor erfarenhet av beräkning av GPS-data med PoPS (tex leverantören)?

Ett annat syfte är att ta reda på hur långa observationstider som krävs för att få godtagbara resultat (noggrannhet bättre än 10 mm + 2 ppm, vilket är specificerat av leverantören). "Målet" var att få ner observationstiden till en halvtimme, då detta skulle medföra att man kunde observera fler punkter med samma mottagare.

I mätningarna från november 1986 värmdes mottagarna praktiskt taget aldrig upp före start. Om en uppvärmningstid ändå är nödvändig och hur lång denna då skulle behöva vara är en annan fråga vi har studerat. Vi har också tittat på repeterbarheten för baslinjemätningar, dvs en jämförelse av baslinjelängder beräknade från olika data.

8.3 ATT LÄRA SIG POPS

Vi började med att läsa igenom manualen från pärm till pärm för att få en överblick av programmet samt att för senare behov veta var information i olika frågor kunde hämtas. Därefter körde vi igenom ett övningsexempel som följde med programmet. Detta övningsexempel består av två punkter med bra data, vilket gick snabbt och enkelt att beräkna. Att ta sig igenom programmet och utföra de olika beräkningsstegen beredde inga större problem, eftersom man hela tiden lotsades fram med menyer. Ibland var det dock svårt att veta exakt var man befann sig i programmet, då många menyer är väldigt lika.

När vi började beräkna data från den ovan beskrivna kampanjen stötte vi på problem - se vidare följande delkapitel. Vi fick anledning att börja fundera över hur beräkningen egentligen gick till. Eftersom den bilaga i manualen som skall innehålla algoritmer ännu ej är tillgänglig, fick vi ägna mycket tid till att gissa och prova hur programmet räknade. Vissa delar är fortfarande oklara för oss.

8.4 ALLMÄN BESKRIVNING AV BERÄKNINGSVERSIONER

Som underlag för våra beräkningar används den tidigare beskrivna mätkampanjen. Vi bestämde oss för att använda en av programmet tillhandahållen normalatmosfär.

VERSION NR.1:

Denna version grundar sig på de sessionsindelningar man automatiskt får vid dataöverföringen (alla observationsintervall är omkring 2.5 timmar). Vi har i hela beräkningen använt oss av de av programmet tilldelade parametrarna och modellerna ("defaults").

Vid inläsning av data från Hille den 4:e nov, fick vi från programmet meddelande om att inga data överförts. Först när vi började med nästa version upptäckte vi att det fanns data överförda och att det endast var vissa uppgifter angående mottagaren (tex kalibreringsvärde på "klockoffset") som saknades. I den här versionen finns därför inte Hille med den första dagen.

Eftersom Mårtsbo var observerad alla dagar, valde vi att definiera baslinjerna så att de bildade ett stjärnät med Mårtsbo som knutpunkt.

Vi lärde oss programmet efter hand som denna version beräknades. Många erfarenheter vi fått, kommer ur denna, vilket gör att resultatet ej är av något intresse (utom att en viss erfarenhet är ett krav). Vi sökte oss fram med manualens hjälp, letade efter värden som kan anses normala och vad som skall göras om så ej är fallet (dåliga satelliter, observationer eller resultat). Vi bedömde att de långa sessionerna ej skulle vara användbara men

ville ändå prova om programmet kunde användas på detta sätt. Resultaten blev dock urusla. I detta skede styrde resultaten oss till en indelning med kortare sessioner.

Vid jämförelser med senare beräknade versioner reviderades våra teorier angående sessionsindelningens längd. Till vissa moment i programmet behövs träning, framför allt om observationsmaterialet ej håller den kvalitet man kan önska. Det har även visat sig att det går bra med långa sessioner om materialet är homogent. Detta håller nere antalet obekanta och gör det möjligt att lösa ut alla "ambiguities".

VERSION NR.2:

Efter de erfarenheter vi fått i version nr 1, beslöt vi att göra en sessionsindelning grundad på mottagarnas uppvärmningstid, satelliternas upp och nedgång samt att ha en maxlängd på sessioner. En uppvärmningstid om 12, 21 respektive 18 minuter av observationstiden uteslöts ur beräkningarna. Sessionslängden sattes till omkring 45 minuter, med undantag för en session varje dag om ca 15 minuter. Se sessionsindelningen, figur nr 17.

Baslinjedefinitionen ändrades från föregående version, för att uppfylla villkoren om att så många observationer som möjligt skall tas tillvara, att baslinjelängden minimeras och att dåliga punkter endast skall ha en baslinje knuten till sig. Detta ledde till en ändring den 5:e november då Västerbo istället för Mårtsbo valdes till gemensam punkt. Enligt kriterierna ovan verkar det mest optimala den första dagen vara att välja Hille som gemensam punkt. Vi misstänkte dock att något hänt vid uppstarten på Hille och valde i stället att behålla Mårtsbo som knutpunkt.

Vid felsökning använde vi oss av den strategi som rekommenderas i PoPS-manualen. Under beräkningarnas gång visade det sig att de antennexcentriciteter som angivits i fält var felaktiga. Detta föranledde oss att göra en ny beräkningsversion, så att de jämförelser vi ville göra kunde genomföras utan omberäkningar.

Vi fick rimligare resultat än i version nr 1, dock oacceptabla för sitt ändamål. Tendensen var densamma, att första dagens observationer innehöll en mängd dåliga observationer som försvagade materialet avsevärt.

VERSION NR.3:

I denna version rättades antennexcentriciteterna till, vilket innebar att mätningarna måste läsas in på nytt. Från föregående versionen justerades sessionerna något. De kortaste sessionerna (15 minuter) förlängdes till 30 minuter. Där det var möjligt försökte vi att sätta gränserna på ett sådant sätt att perioder med brus och många avbrott i signalsekvensen hamnade på en sida om gränsen. Detta för att inte flera sessioner skulle påverkas. Se sessionsindelningen, figur nr 17.

För att undersöka vilken observationstid som behövdes, försökte vi att kombinera sessionerna till flera olika lösningsvarianter, dels varianter med c:a en halvtimmes observationstid var dag och dels med c:a en timme, samt varianter med så mycket mätningar som möjligt. Baslinjedefinitionen behölls sen tidigare och i felsökningen fortsatte vi att använda den i POPS-manualen rekommenderade strategin.

Delresultat som erhöles var inte heller här så pass bra att de kan anses normala. Slutresultatet håller sig dock inom den felgräns som leverantören utlovar (jämförelse med AGA 8:s mätningar). Se vidare nästa kapitel, där beräkningsresultaten redovisas.

EFTERTANKE:

Vid denna tidpunkt började en viss erfarenhet av försöken att göra sig kännbar. Vi funderade på om de dåliga resultaten kunde förbättras genom att ändra på strategin vid beräkningarna. Vi var säkra på att problemen att få goda resultat berodde på dåliga mätdata och att man vid normala förhållanden ej skulle ha dessa problem. Det hade även visat sig vara svårt att ha sessionerna korta (15-45 minuter), vilket fick oss att blicka tillbaka på version nr 1. Orsaken till våra problem där hade med tiden klarnat. Vi hade inte haft den nödvändiga erfarenheten vid det första försöket. Vi beslöt att försöka på nytt med långa sessioner.

VERSION NR.4:

Syftet med denna version var i första hand att uppnå ett så bra resultat som möjligt. Från observationsintervallet tog vi bort en uppvärmningstid i samband med sessionsindelningen. I övrigt behöll vi sessionerna som de var. Resultatet från första dagen blev inte alls bra, vilket fick oss att stryka de intervall (c:a hälften av observationerna) som i tidigare beräkningar visat sig ge dåliga resultat. Värdena blev bättre men ej tillfredställande. Slutligen provade vi att förändra baslinjedefinitionen den första dagen. Mårtsbo uteslöts, då den gett de sämsta resultaten i absolutpositioneringen och istället användes baslinjen Hille - Nyhammar. Vi kunde bara använda den första tredjedelen av observationerna, med

anledning av ett stort avbrott i signalsekvensen, sk "cycle-slip", som vi förmodligen ej lyckades laga korrekt. Alternativet hade varit att göra om sessionsindelningen och ta bort en session vid just detta avbrott. De två senare dagarna behölls oförändrade i alla varianterna. Se vidare nästa kapitel, där beräkningsresultaten redovisas.

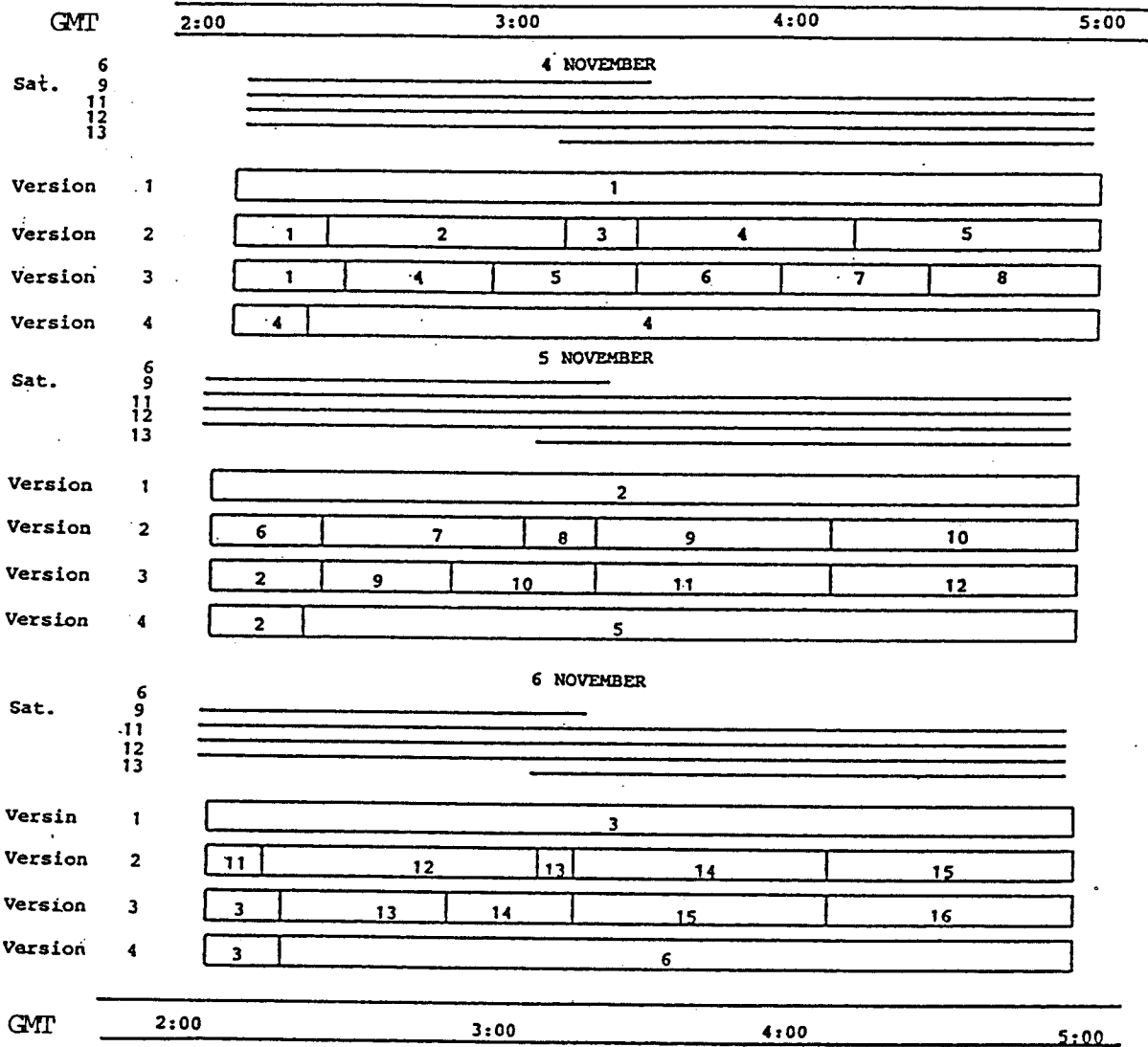
SAMMANFATTNING AV SESSIONSINDELNINGEN:

I version nr 1 delade vi inte av observationsintervallet i kortare perioder utan lät programmet styra sessionsindelningen.

Vi tog i version nr 2 bort en uppvärmningstid för mottagarna genom att dela av en session i början. Längden på denna session bestämde vi genom att studera residualerna i absolutpositioneringen i föregående version. De korta sessionerna, nr 3, 8 och 13 är tidsperioder då fem satelliter observerats, i övrigt observerades fyra satelliter. Intervallen efter de korta sessionerna delades av på mitten för att undvika långa sessioner.

I version nr 3 förlängde vi de korta sessionerna, då visat sig vara för korta för att ge bra resultat. Den ena sessionsgränsen behölls och den andra flyttades så att hänsyn togs till brus i data. Även uppvärmningstiden förlängdes något. Första dagen delades sessionerna på slutet också om för att om möjlig erhålla bättre resultat.

Version nr 4 är ytterligare ett försök med långa sessioner men med uppvärmningstiden borttagen. Se figur 17.



Figur 17 Sessionsindelning

BERÄKNINGSRESULTAT

9.1 BERÄKNINGSMATERIALETS INRE NOGGRANHET

I de olika beräkningsstegen kan man mha noggrannhetsmått i form av medelfel, bedöma kvaliteten på mätningarna. Vi har valt ut vissa av dessa som vi redovisar för version 3 och för två varianter av version 4.

För absolutpositioneringen redovisar vi medelfel för "klockoffset" och koordinater. I rutinen ingår dessutom en felsökning där pseudoavstånd anpassas till polynom. Medelfel för polynom av gradtal 4 redovisas.

Felsökningsrutinen anpassar polynom till differenser mellan konsekutiva mellanstations- och dubbeldifferanser. Medelfel vid anpassning till polynom av gradtal 4 respektive 2, redovisas, jämte antal funna avbrott i signalsekvensen ("cycle-slip").

I beräkningsrutinen som använder observationer av dubbeldifferanser anges medelfelet för dessa, dvs grundmedelfelet i utjämnningen, både före och efter att "ambiguities" är bestämda till heltal. Antalet "ambiguities" som man lyckats bestämma samt det totala antalet anges. Vi redovisar även differenser mellan längder beräknade baslinjevis och motsvarande utjämnad längd. Repeterbarheten studeras bäst i version 3, eftersom man där har flest oberoende bestämmningar av samma längd.

NORMALA VÄRDEN:

Nedan visas normala värden för den inre noggrannheten som anges i PoPS-manualen.

Absolutpositionering: Klockoffset RMS; $1 \cdot 10^{-8}$ sekunder
 Koordinater RMS; < 2.5 meter
 Polynomanpassning RMS; < 3 meter

Felsökning: RMS vid polynomanpassning:
 - Mellanstationsdifferanser; 2.5 perioder
 - Dubbeldifferanser; 0.04 perioder

Beräkning: RMS för baslinjer vid dubbeldifferanser:
 < 0,010 meter för baslinjer 0 - 20 km
 < 0,100 meter för baslinjer 20 - 100 km
 På korta baslinjer bör alla "ambiguities" kunna bestämmas till heltal.

Tabell 3 Normala värden

VERSION 3:**Absolutpositionsbestämning:**

I tabell 4 redovisas noggrannheten i "Absolutpositionsbestämningen". Jämför även med figur 17 sid 49. Värdena är bra bortsett från Hille i början och slutet av första dagen, där de är något högre - dock ej onormalt höga.

Felsökning:

Noggrannheten i felsökningen redovisas i tabell 5. De två senare dagarna har normala värden, men första dagen är det egentligen bara session 4 och 5 som ligger i närheten av normala värden.

Beräkning:

Beräkningen baslinjevis och sessionsvis, som redovisas i tabell 6, uppvisar samma tendens som "Felsökningen". RMS för dubbeldifferenserna den 5:e och 6:e november är normala, men det var generellt för alla dagar svårt att bestämma "ambiguities" till heltal. Detta visar sig också i höga RMS för de baslinjer, där alla "ambiguities" ej kunnat bestämmas.

Repeterbarhet:

Differenserna mellan beräknad längd baslinjevis och längderna från den slutliga utjämnningen (variant 3E-se nedan) varierar mycket. Baslinjer där alla "ambiguities" ej kunnat bestämmas, avviker upp till flera meter från övriga beräknade längder (vilket alltså är extremt mycket), men även baslinjer med alla "ambiguities" bestämda kan variera drygt en cm (t ex baslinjen Västerbo-Mårtsbo skiljer 13 mm mellan session 9 och 12. De båda sessionerna är mätta med samma antennenmontering, men antennen centrums läge kan naturligtvis ha flyttat sig beroende på från vilket håll vinden legat på tornet i Västerbo. Differensen motsvarar 0.8 ppm och ligger alltså inom felgränsen 10 mm + 2 ppm.)

Slutliga beräkningsvarianter:

Med beräkningar för varje baslinje och session som underlag kombinerades sessionerna samman till olika varianter för att kunna undersöka hur lång sessionstid som behövs. Den första dagen är det endast session 5 som är användbar. Session 13 från sista dagen gav dåliga värden och kan ej heller vara med. Se tabell 6.

Målet var att studera vad en halv respektive en timmes observationer per dag gav för resultat. Om det är möjligt med korta observationsintervall kan man mäta på flera punkter efter varandra under observationsperioden. För att efterlikna detta försökte vi att plocka ut intervall från olika delar av observationsperioden de olika dagarna. Med

den sessionsindelning vi i tidigare steg valt och de perioder med dåliga data som ingår, var det svårt att genomföra detta försök. Variant 3:B innehåller sessionerna 5 (30 min), 12 (51 min) och session 15 (52 min). I nästa variant 3:D, provade vi att ta med Mårtsbo-Nyhammar i session 4 för att få längre observationstid första dagen. Resultatet försämrades dock så mycket att endast session 5 togs med. Den andra dagen valde vi sessionerna 9 (24 min) och 10 (30 min) och den sista dagen behöll vi session 15. De båda varianterna (3B och 3D) är alltså till stora delar lika. Se figur 18 nedan.

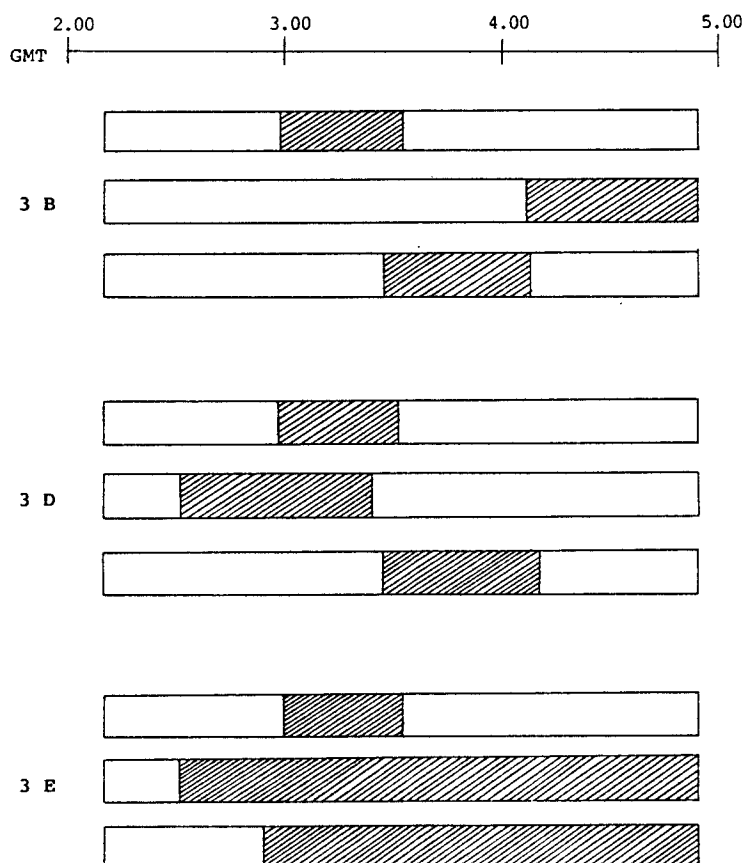


Fig 18 Utnyttjade observationer i olika beräkningsvarianter.

Grundmedelfelet efter att "ambiguities" bestämts till heltal (4 respektive 3 "ambiguities" kunde ej lösas ut) blev i båda fallen 0.014 meter, dvs något högt. I variant 3:D ligger medelfelet för baslinjerna relativt högt men ganska jämt fördelade. I variant 3:B är medelfelen ungefär de samma bortsett från de baslinjer där Mårtens Klack ingår, vilka har betydligt större medelfel. Detta stämmer överens med beräkningarna baslinjevis där session 12, uppvisade höga medelfel för baslinjen Mårtens Klack-Västerbo. Se tabell 7.

Vi gjorde även andra beräkningsvarianter för att se hur bra resultat vi kunde nå med den sessionsindelning och den felsökning vi hade gjort. Ju fler mätningar vi tog med, desto lägre blev medelfelen i baslinjerna. Här redovisas variant 3:E, som vi anser vara den bästa varianten. Denna omfattar session 5, 9, 10, 11, 12, 14, 15 respektive 16. Se figur 17 (sid 49) och tabell 7. De högsta medelfelen tillhör de baslinjer som ej direkt observerats, tex Sälgsjön - Nyhammar och Nyhammar - Västerbo. (Nyhammar observerades den första dagen, Västerbo den andra och Sälgsjön den tredje.)

VERSION 4:

Absolutpositionsbestämning:

Version 4, som är ett försök med långa sessioner ger i "Absolutpositionsbestämningen" värden något över de normala. Se tabell 3 och 4.

Felsökning:

I tabell 5 redovisas den inre noggrannheten i "Felsökningen", vilka i stort sett uppvisar normala värden. Att RMS i polynom Anpassningen är något högre än i version 3 beror förmodligen på att sessionerna är längre här. (Eventuell borde ett högre gradtal på polynomet valts.)

Beräkning:

Den första dagen (4:e nov) har höga RMS för dubbeldifferenserna och alla "ambiguities" kunde ej bestämmas till heltal. De andra två dagarna har normala värden. Se tabell 6.

Slutliga beräkningsvarianter:

Den första dagen gav liksom i tidigare versioner problem. Detta ledde oss till olika varianter där första dagens mätningar behandlades på olika sätt. Här redovisar vi variant 4:A som inte alls innehåller några data från första dagen, variant 4:B som innehåller första hälften av observationerna och slutligen variant 4:C med en annan baslinjedefinition och endast den första tredjedelen av den dagens mätningar. Slutberäkningen i de olika varianterna redovisas i tabell 7. I variant 4:C kunde alla "ambiguities" bestämmas till heltal, vilket inte var fallet i variant 4:B. Felsökningen och beräkningen baslinjevis gick bättre i variant 4:C, men däremot fick en del baslinjer höga RMS i den slutliga beräkningen, varför vi får anse variant 4:B vara den bästa lösningen. Se tabell 5, 6 och 7.

Session	Mårtsbo		Nyhammar		Hille		Västerbo		Mårtensklack		Sälgsjön		
	RMS poly	RMS klocka	RMS poly	RMS klocka	RMS poly	RMS klocka	RMS poly	RMS klocka	RMS poly	RMS klocka	RMS poly	RMS klocka	
Ver 3	4	1,57	0,40	2,17	0,43	8,12	0,49						
	5		0,55	3,70	0,60	1,06	0,30						
	6	1,83	0,61	2,31	0,57		0,11						
	7	1,74	1,50	2,09	0,72	9,20	3,7						
	8	1,82	2,1	3,25	1,3	1,01	3,3						
	9	2,0	0,53					1,75	0,35	1,52	0,15		
	10	1,89	0,59						0,61	1,15	0,19		
	11	1,46	0,50					2,38	0,65	1,11	0,36		
12	2,42	0,75					2,54	0,64	1,51	0,74			
13	3,25	1,5			1,69	0,43					2,40	0,56	
14	2,02	0,61			1,13	0,59					3,26	1,2	
15	1,7	0,91			1,32	0,63					2,18	0,82	
16	2,28	1,3			1,26	0,43					3,06	0,70	
Ver 4	4	2,26	1,9	2,03	1,3	5,44	0,62						
	5	2,26	0,86					2,22	0,57		1,2		
	6	3,54	1,0			1,31	1,2					2,36 0,54	

RMS poly = RMS för anpassning till polynom av grad 4, enhet : meter

RMS klocka = RMS för klockoffset, enhet : $1 \cdot 10^{-8}$ sekunder

Tabell 4 Inre noggrannhet i absolutpositionsbestämningen
(Jämför figur 17 sid 49)

Felsökning



Baslinje	Ver 3				Ver 4A/B				Ver 4 C				
	Ses. i ver 3	Mellanstationsdiff RMS	Mellanstationsdiff ant "cycle - slips"	Dubbeldiff. RMS	Dubbeldiff. Antal "cycle-slips":hela, halva	Mellanstationsdiff RMS	Mellanstationsdiff ant "cycle - slips"	Dubbeldiff. RMS	Dubbeldiff. Antal "cycle-slips":hela, halva	Mellanstationsdiff RMS	Mellanstationsdiff ant "cycle - slips"	Dubbeldiff. RMS	Dubbeldiff. Antal "cycle-slips":hela
Mår - Nyh	4	1.53	0	0.07	0,0								
Mår - Hill		1.28	0	0.07	0,0								
Mår - Nyh	5	0.74	0	0.06	0,0	1.79	0	0.06	2,0				
Mår - Hill		1.80	1	0.06	7,4	2.43	1	0.07	6,2				
Mår - Nyh	6	0.94	0	0.10	3,16								
Mår - Hill		0.68	0	0.10	2,13								
Mår - Nyh	7	0.79	0	0.13	7,15								
Mår - Hill		0.72	0	0.12	12,33								
Mår - Nyh	8	0.90	0	0.12	0,50								
Mår - Hill		0.62	0	0.13	26,32								
Väst - Mår	9	4.83	0	0.03	0,0								
Väst - Mkl		0.58	0	0.03	0,0								
Väst - Mår	10	2.32	0	0.04	0,0	6.31	0	0.09	0,0				
Väst - Mkl		0.99	0	0.05	0,0	1.28	0	0.06	0,0				
Väst - Mår	11	0.36	0	0.03	0,0								
Väst - Mkl		0.77	0	0.05	0,0								
Väst - Mår	12	0.49	0	0.04	0,0								
Väst - Mkl		0.99	0	0.06	0,0								
Mår - Hill	13	6.93	0	0.03	0,0								
Mår - Sälq		6.39	0	0.03	0,0								
Mår - Hill	14	1.06	0	0.04	0,0	3.30	0	0.08	7,0				
Mår - Sälq		0.97	0	0.04	0,0	9.70	0	0.10	0,0				
Mår - Hill	15	2.07	0	0.04	0,0								
Mår - Sälq		0.73	0	0.03	2,6								
Mår - Hill	16	1.43	0	0.04	0,0								
Mår - Sälq		1.12	0	0.04	0,0								

Tabell 5 Inre noggrannhet i felsökningen. Gradtal 4 resp 2 har använts vid polynom-anpassningen av differenser mellan konsekutiva mellanstations- resp dubbeldifferenser.

Ver 3

Ver 4A/B

Ver 4C

Baslinje	ses i ver 3	RMS dd	best amb/ tot amb	RMS basl	Diff	RMS dd före	RMS dd efter	best amb/ tot amb	RMS basl	Diff	RMS dd före	RMS dd efter	best a/b/ tot amb	RMS basl	Diff
Mår-Nyh Mår-Hill	4	0.019 0.015	2/3 0/3	0.036 0.094	-0.122 -0.404										
Mår-Nyh Mår-Hill	5	0.016 0.013	3/4 1/4	0.005 0.018	0.000 -0.005	0.021 0.021	0.026 0.021	3/4 1/4	0.009 0.009	0.000 0.136	0.012	0.013	3/3	0.002	-0.003
Mår-Nyh Mår-Hill	6	0.026 0.040	0/3 0/3	0.030 0.104	-0.049 -1.296										
Mår-Nyh Mår-Hill	7	0.076 0.059	0/3 0/3	0.117 0.844	-0.039 3.800										
Mår-Nyh Mår-Hill	8	0.069 0.064	0/3 0/3	0.151 0.455	2.484 -1.812										
Väst-Mår Väst-Mkl	9	0.005 0.006	3/3 1/3	0.004 0.031	-0.011 -0.020						Samma beräkningar som i version 4A/4B 				
Väst-Mår Väst-Mkl	10	0.006 0.004	3/4 1/4	0.004 0.007	-0.021 -0.006	0.008 0.016	0.010 0.025	4/4 4/4	0.001 0.002	-0.014 0.023					
Väst-Mår Väst-mkl	11	0.005 0.012	3/3 1/3	0.001 0.009	-0.004 -0.032										
Väst-Mår Väst-Mkl	12	0.006 0.016	3/3 0/3	0.003 0.011	0.002 -0.019										
Mår-Hill Mår-Sålg	13	0.011 0.011	0/3 3/3	0.198 0.002	0.467 0.009						Samma beräkningar som i version 4A/4B 				
Mår-Hill Mår-Sålg	14	0.008 0.007	4/4 4/4	0.004 0.001	-0.003 0.001	0.009 0.008	0.011 0.009	4/4 4/4	0.001 0.001	0.003 0.000					
Mår-Hill Mår-Sålg	15	0.008 0.005	0/3 3/3	0.009 0.001	0.035 0.001										
Mår-Hill Mår-Sålg	16	0.009 0.006	3/3 3/3	0.001 0.003	0.000 -0.009										

FÖRKORTNINGAR: Mår=Mårtebo
Nyh=Nyhammar
Hill=Hille
Väst=Västerbo
Mkl=Mårtens klack
Sålg=Sålgsjön

ses=session
ver=version
dd=dubbel-differens
best=bestämd
tot=total
amb="ambiguities"

basl=baslinje
RMS dd före/efter=
RMS för dubbel-
differenserna före/
efter bestämning av
"ambiguities"

Diff=Differens mellan
beräknad längd
baslinjevis och
längd från slutlig
utjämning (ver 3E
resp ver 4B)

De lodräta sträckorna i ver. 4 visar hur mycket data som är med i varje dag. Ex. i ver. 4C är ca: en tredjedel av tillgängliga data med från företa dagen.

Tabell 6 Inre noggrannhet i beräkningen (baslinjevis)

Version	3:B	3:D	3:E	4:A	4:B	4:C
Antal observationer	786	857	1876	1935	2106	1990
Grundmedelfel före bestämning av amb.	0.011	0.009	0.010	0.011	0.012	0.010
Grundmedelfel efter bestämning av amb.	0.014	0.014	0.016	0.015	0.016	0.015
Bestämda ambig/ totala ambiguities	16/20	25/28	53/54	16/16	19/20	19/19
Medelfel för baslinje Baslinje						
Mårtsbo-Sälgsjön	0.003	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001
Nyhammar-Hille	0.003	0.003	0.003	-	0.005	0.002
Sälgsjön-Hille	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
Sälgsjön-Västerbo	0.005	0.010	0.002	0.002	0.002	0.002
Mårtsbo-Hille	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
Mårtsbo-Västerbo	0.007	0.006	0.002	0.001	0.001	0.001
Sälgsjön-Nyhammar	0.006	0.005	0.006	-	0.005	0.010
Mårtensklack-Nyhammar	0.036	0.004	0.003	-	0.005	0.004
Nyhammar-Mårtsbo	0.004	0.004	0.005	-	0.005	0.008
Hille-Västerbo	0.005	0.010	0.002	0.002	0.002	0.002
Nyhammar-Västerbo	0.006	0.012	0.006	-	0.005	0.012
Mårtensklack-Hille	0.037	0.004	0.002	0.002	0.002	0.002
Mårtensklack-Sälgsjön	0.022	0.007	0.002	0.002	0.002	0.002
Mårtensklack-Västerbo	0.010	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001
Mårtensklack-Mårtsbo	0.025	0.006	0.002	0.001	0.002	0.001

Tabell 7 Inre noggrannhet i beräkningen (nätutjämnig).

9.2 JÄMFÖRELSE GPS-GEODIMETER

De ur GPS-observationerna beräknade längderna jämfördes med utjämnade terrestra längder. Totalt 11 av 15 möjliga baslinjer är mätta med geodimeter och ingår således i jämförelsen. De terrestra mätningarna kan ej anses som felfria, då även dessa är behäftade med fel. I nätet består alla punkter utom Mårtsbo av torn eller mast, vilket kan innebära att större centreringsfel införs än på markpunkter (gäller både terrestra och GPS-mätningar).

I tabell 8 nedan redovisas ungefärliga längder för de 11 baslinjerna, samt förbättringar till de Geodimetermätta (AGA 8) längderna (utjämnad - mätt längd). Förbättringarna ger en uppfattning av noggrannheterna i de terrestra mätningarna.

<u>Baslinje</u>	<u>Längd (km)</u>	<u>Förbättring (mm)</u>
Mårtsbo-Sälgsjön	8.3	5
Nyhammar-Hille	11.2	7
Sälgsjön-Hille	11.9	-5
Sälgsjön-Västerbo	13.1	4
Mårtsbo-Hille	15.4	-11
Mårtsbo-Västerbo	16.2	-1
Sälgsjön-Nyhammar	16.5	1
Mårtensklack-Nyhammar	17.8	21
Mårtensklack-Hille	29.0	5
Mårtensklack-Västerbo	37.4	38
Mårtensklack-Mårtsbo	40.2	39

Tabell 8 Terrestra längder och förbättringar
 Apriori längdmedelfel för AGA 8: 10mm+2ppm. Det uppskattade utjämnade längdmedelfelet är < 1 ppm.

I tabell 8 redovisar vi differenser mellan baslinjer i de olika versionerna beräknade ur GPS-observationer (nätutjämnade) och terrestra utjämnade längder. Differanserna mellan geodimeter och GPS för baslinjerna anges i mm och differansen/längd på baslinjerna anges i ppm. Observera att ppm-värdet blir större på de korta längderna eftersom man även har ett konstant fel. I genomsnitt är GPS-längderna kortare än de terrestra i alla versionerna, både i jämförelse med direkt mätta och utjämnade längder.

Generellt sett ligger differenserna inom den felgräns som utlovats av leverantören av GPS-mottagarna, 10 mm + 2 ppm. Toleransen för differanserna är högre än denna felgräns då det även finns fel i de terrestra mätningarna. Den kortaste baslinjen i nätet, Mårtsbo - Sälgsjön, faller dock utanför. Baslinjen, vilken är "direkt observerad" med GPS, får ett lågt medelfel, vilket alltså borde tyda på att denna är väl bestämd. Eventuellt kan avvikelser bero på bristfällig lodning av masten på Sälgsjön.

De största differanserna erhålls i variant 3:B, vilken förutom baslinjen Mårtsbo-Sälgsjön, har två baslinjer som klart faller utanför toleransen. Dessa är Mårtens Klack-Nyhammar och Mårtens Klack-Hille, med differanserna 14 respektive 15 cm (7,9 respektive 5,2 ppm). De interna medelfelen på dessa baslinjer var väldigt höga - 36 respektive 37 mm.

Variant 3:E stämmer något sämre överens med de terrestra mätningarna än 3:D, trots att denna innehåller fler mätningar och ger lägre medelfel för baslinjerna. Eventuellt försämrar session 12 resultatet.

Version 4 ger lite bättre överensstämmelse med de terrestra mätningarna. Även de lägre medelfelen från beräkningarna tyder på ett bra resultat. Baslinjen Sälgsjön- Nyhammar i variant 4:C, som fick ett högt medelfel i beräkningen, avviker mera från de terrestra mätningarna än samma baslinje i variant 4:B. Det gäller även flera av de andra baslinjerna. Varianterna 4:B och 4:C, kan dock allmänt betraktas som våra mest lyckade beräkningar.

Wild har tidigare genomfört en beräkning på samma observationskampanj. Deras resultat är bättre än de vi lyckats få i någon variant, både då det gäller den inre noggrannheten (här: RMS för dubbeldifferanserna respektive baslinjerna), och differanserna till de terrestra mätningarna. Wilds beräkningar klarar ej heller helt gränsen 10 mm + 2 ppm för baslinjen Mårtsbo-Sälgsjön, jämfört med utjämnad geodimeterlängd.

Svagheten i våra beräkningar jämfört med Wilds, ligger nog i att vi inte lyckats utnyttja den första dagens observationer optimalt. Hur Wild har genomfört sina beräkningar vet vi ej.

Även om varken mätningarna eller beräkningarna är de bästa tänkbara, kan de ändå ge en anvisning om kortast möjliga observationstid. Variant 3:B och 3:D, som båda har observationstiden c:a 30+50+50 minuter, klarar i det ena fallet att ge acceptabla värden (3:D), bortsett från baslinjen Mårtsbo-Sälgsjön. I det andra fallet (3:B) går det ej. Slutsatsen är att det går bra med observationstider som är knappt en timme långa, på avstånd upp till 40 km, då man erhåller bra mätningar. För att kunna beräkna även sämre data måste dock observationstiden förlängas.

Baslinje	Längd (km)	Ver. 3B		Ver. 3D		Ver. 3E		Ver. 4A		Ver. 4B		Ver. 4C		WILD	
		Differens mm	ppm	Differens mm	ppm	Differens mm	ppm	Differens mm	ppm	Differens mm	ppm	Differens mm	ppm	Differens mm	ppm
* Mår-Sälq	8	-0,038	-4,6	-0,038	-4,6	-0,039	-4,7	-0,035	-4,2	-0,035	-4,2	-0,035	-4,2	-0,030	-3,6
* Hill-Nyh	11	0,017	1,5	0,017	1,5	0,025	2,2	-	-	-0,010	-0,9	0,010	0,9	0,016	1,4
* Hill-Sälq	12	-0,018	-1,5	-0,018	-1,5	-0,019	-1,6	-0,017	-1,4	-0,017	-1,4	-0,017	-1,4	-0,005	-0,4
* Sälq-Väst	13	0,008	0,6	-0,014	-1,1	0,006	0,5	0,003	0,2	0,003	0,2	0,003	0,3	0,013	1,0
* Hill-Mår	15	-0,013	-1,6	-0,013	-0,8	-0,022	-1,4	-0,027	-1,7	-0,027	-1,7	-0,023	-1,5	-0,008	-0,5
* Mår-Väst	16	-0,011	-0,7	-0,029	-1,8	-0,013	-0,8	-0,013	-0,8	-0,013	-0,8	-0,013	-0,8	-0,001	0,0
* Nyh-Sälq	16	-0,012	-0,7	-0,012	-0,8	-0,008	-0,5	-	-	0,013	0,8	0,035	2,1	0,013	0,8
* Mkl-Nyh	18	-0,161	-9,0	-0,008	-0,4	-0,030	-1,7	-	-	-0,003	-0,2	-0,014	-0,8	-0,021	-1,8
* Hill-Mkl	29	-0,155	-5,3	0,000	0,0	-0,010	-0,3	-0,002	-0,1	-0,001	0,0	-0,006	-0,2	0,011	0,4
* Mkl-Väst	37	-0,039	-1,0	0,028	0,7	-0,020	-0,5	-0,015	-0,4	-0,016	-0,4	-0,016	-0,4	-0,001	0,0
* Mkl-Mår	40	-0,118	-2,9	0,013	0,3	-0,029	-0,7	-0,023	-0,6	-0,023	-0,6	-0,023	-0,6	-0,002	0,0
Medelvärde			-2,3		-0,8		-0,9		-1,2		-0,8		-0,6		-0,2
RMS			2,9		1,5		1,7		1,3		1,3		1,5		1,3

Tabell 8 Jämförelse av GPS med terrestra utjämnade längder.
(GPS - utjämnade geodimetermätta längder)
* = Direkt observerad med GPS (mottagare på båda punkterna samtidigt).

9.3 STATISTISK ANALYS AV JÄMFÖRELSEN GPS-GEODIMETER -TEORI

I föregående kapitel har vi jämfört GPS och terrestra mätningar. I detta kapitel försöker vi bilda oss en uppfattning om noggrannheten på statistiska grunder. Materialets 11 observationer är egentligen för litet, (bör vara > 30), för att man skall kunna dra några slutsatser ur det. Vi utför analysen främst för att visa på en metod som kan användas. Det skall även nämnas att det är vanligt i denna form av undersökningar att materialet ej är större, vilket gör att man kritiskt skall granska det resultat som redovisas. I detta delkapitel redovisas teorin och i nästa utför vi test på variant 3:D, eftersom det är den variant som på kortast observationstid ger acceptabla resultat.

Analysen grundar sig på differenser mellan längder ur GPS-observationer och geodimetermätta (AGA 8) längder. Geodimeterlängderna är omräknade till de lutande längder som observerats med GPS. Dessa kan ej anses felfria i förhållande till GPS-mätningarna, utan även dessa tilldelas en standardavvikelse (i detta fall lika stor som den förväntade noggrannheten i GPS-mätningarna). Resultatet av vilken noggrannhet GPS-mätningarna ger, blir på så vis beroende av vilken standardavvikelse geodimetermätningarna antas ha.

Test utförs dels för att jämföra om GPS-mätningarna har samma förväntade värde på längderna som de terrestra mätningarna och dels för att undersöka noggrannheten i GPS-mätningarna.

JÄMFÖRELSE AV FÖRVÄNTADE VÄRDEN PÅ LÄNGDER:

För testet ställs en hypotes upp om att differensen mellan terrestra och GPS-mätningar är noll. För att kunna utföra ett statistiskt test måste differenserna viktas så att de får samma standardavvikelse. Detta görs genom att dividera differenserna med dess uppskattade standardavvikelse (apriorimedelfel):

$$\Delta_v = \frac{\Delta}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}$$

där Δ_v = den viktade differensen: GPS - terrestra
 Δ = differens: GPS - terrestra
 σ_1 = apriorimedelfel för GPS-mätningar
 σ_2 = " " " terrestra mätningar

Därefter beräknas differensernas medelvärde, $\bar{\Delta}_v$, och deras standardavvikelse s. n stycken värden används.

Hypotesen prövas mha konfidensintervall. Allmänt kan ett konfidensintervall för θ , med konfidensgraden $1-\alpha$ då $\theta \in N(\theta, d^2)$ ställas upp:

$$\theta - t_{\alpha/2}(f) \cdot d < \hat{\theta} < \theta + t_{\alpha/2}(f) \cdot d$$

där θ = sannt värde
 $\hat{\theta}$ = skattat värde
 d = skattad standardavvikelse
 f = antal frihetsgrader
 $1-\alpha$ = konfidensgraden

Konfidensintervallet kan omformas till:

$$- t_{\alpha/2}(f) < \frac{\hat{\theta} - \theta}{d} < t_{\alpha/2}(f)$$

$$\left| \frac{\hat{\theta} - \theta}{d} \right| < t_{\alpha/2}(f)$$

I vårt test: $\theta = 0$
 $\hat{\theta} = \bar{\Delta}_v =$ medelvärdet av de viktade differanserna
 $d = s/\sqrt{n} =$ standardavvikelsen för D
 $f = n-1$
 $n =$ antal observationer i testet
 $\alpha = 0.05$ dvs 95% - konfidensintervall

Konfidensintervallet blir då:

$$\left| \frac{\bar{\Delta}_v}{s/\sqrt{n}} \right| < t_{0.025}(n-1)$$

UNDERSÖKNING AV NOGGRANNHETEN I GPS-MÄTNINGARNA:

Ett test görs för att undersöka om GPS-mätningarna uppfyller de noggrannhetskrav som WILD-Magnavox ställt upp (10 mm + 2 ppm). Resultatet blir, som tidigare nämnts, beroende av antagen noggrannhet i geodimeter-mätningarna.

Även här måste differenser viktas för att man skall kunna genomföra ett statistiskt test. Viktningen görs på samma sätt som ovan. Istället för att direkt testa om differenserna har en viss standardavvikelse, förutsätts en viss sådan hos GPS- respektive geodimeter-mätningarna. Om dessa förutsättningar är riktiga får de viktade differenserna standardavvikelsen = 1. Hypotesen blir alltså att de viktade differenserna har en standardavvikelse = 1.

Allmänt sett är ett konfidensintervall för σ med konfidensgrad $1-\alpha$:

$$\hat{\sigma} \sqrt{f/\chi_{\alpha/2}^2(f)} < \sigma < \hat{\sigma} \sqrt{f/\chi_{1-\alpha/2}^2(f)}$$

där σ = sann standardavvikelse
 $\hat{\sigma}$ = skattad standardavvikelse
 f = frihetsgrader

I vårt test: $\sigma = s$
 $\alpha = 0.05$
 $f = n-1$

Konfidensintervallet blir då:

$$[s\sqrt{f/\chi_{0.025}^2(n-1)}, s\sqrt{f/\chi_{0.975}^2(n-1)}]$$

9.4 TEST AV VARIANT 3D

Förutsatta standardavvikelser:

$\sigma_1 =$ standardavvikelse för GPS = 10 mm + 2 ppm
 $\sigma_2 =$ standardavvikelse för Geodimeter = 10 mm + 2 ppm

Viktade differenser:

Δ_v	
0.52	
0.20	
-0.18	
0.05	
-0.47	
-0.42	
0.55	
-0.20	
-0.50	
0.41	
-0.88	
	$\Delta_v = \frac{\Delta}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}$
	$\bar{\Delta}_v = -0.084$
	$s = 0.469$
	$n = 11$

Hypotes 1: $\Delta = 0 \rightarrow \bar{\Delta}_v = 0$

$$\text{Testkvot} = \left| \frac{\bar{\Delta}_v - 0}{s/\sqrt{11}} \right| = 0.59 < 2.23 = t_{0.025}(10)$$

Man kan inte förkasta hypotesen om att differenserna har medelvärdet noll på 5% risknivå.

Hypotes 2: De viktade differenserna har standardavvikelsen ett.

Konfidensintervall för σ :

$$[s\sqrt{10/\chi_{0.025}^2(10)}, s\sqrt{10/\chi_{0.975}^2(10)}] = [0.33, 0.82]$$

På 5% risknivå kan man förkasta hypotesen om att de viktade differenserna har standardavvikelsen = 1. Den måste vara lägre eftersom intervallet ligger under ett. Det innebär att de förutsatta standardavvikelserna σ_1 och σ_2 var för höga. Som vi tidigare nämt är observationsmaterialet litet och slutsatserna blir då osäkra.

9.5 HELMERTTRANSFORMATION

För att ge en mer överblickbar jämförelse med terrestra mätningar har vi även transformerat våra lösningar på det terrestra nätet (2.5⁹W RTR 10) med en tvådimensionell Helmert transformation. Detta kräver plana koordinater, vilka vi har beräknat på följande sätt: GPS-lösningens X, Y och Z i WGS-72 är först translaterade så att Mårtsbo (den fasta punkten) har fått sina kartesiska koordinater i 2.5⁹W RTR 10. Dessa räknas sedan om till geografiska koordinater (φ, λ, h) på Bessels korrigerade ellipsoid och därifrån projicerades de slutligen ner till projektionsplanet med Gauss-Krügers metod. På detta sätt erhåller Mårtsbo sina plana regionkoordinater. Vi har alltså inte tagit hänsyn till vridningen mellan WGS-72 och RTR 10 utan denna kommer att ge utslag i Helmerttransformationen. Transformationsresultatet redovisas i tabell 9.

Skalan varierar mellan 0.1 och 0.6 ppm, där GPS-längderna behöver förstoras och vridningen är c:a 20 cc (gon) mellan koordinatsystemen. Skalan är inte signifikant i något av fallen på 5%-risknivå. Grundmedelfelet som är i form av punktmedelfel är högst i version 3D (45 mm) och lägst i version 4a (14 mm). Det låga grundmedelfelet i version 4A beror dels på att de dåliga data från den första dagen inte är med, men även på att det är färre överbestämningar i den versionen.

På passfelen kan man se hur de olika punkterna kunnat anpassas till det terrestra systemet. De högsta förbättringarna återfinns, inte helt oväntat på Nyhammar och Mårtens klack. Nyhammar har i tidigare beräkningar hela tiden gett dåliga resultat eftersom den endast är mätt med första dagens osäkra data. I version 3D faller Mårtens klack ut betydligt mer än i övriga versioner, vilket antyder att observationstiden på knappt en timme ej är tillräckligt för så långa avstånd (c:a 40 km).

Baslinje	Ver 3D		Ver 4A		Ver 4B		WILD	
	vx	vy	vx	vy	vx	vy	vx	vy
Mårtensklack	46	2	1	6	-7	-9	3	1
Västerbo	14	18	1	4	-2	-4	-1	8
Mårtsbo	4	-4	5	-11	4	-15	-3	10
Nyhammar	-52	-39			15	13	-5	7
Hille	-10	-8	-8	2	-9	-1	4	-4
Sälgsjön	-2	30	1	19	1	16	3	-21
Grundmedel- fel per punkt	45 mm		14 mm		17 mm		10 mm	
Skalfaktor	0,1 ± 0,8 ppm		0,5 ± 0,3 ppm		0,5 ± 0,3 ppm		0,2 ± 0,3 ppm	
Vridning	20",7 ± 0",5		20",1 ± 0",2		20",2 ± 0",2		20",0 ± 0",2	

Tabell 9 Passfel i mm i Helmerttransformation

Transformationsparametrar:

I transformationerna har vi använt oss av följande parametrar, vilka överensstämmer med de som används i 2,5^a W RTR 10.

Bessels ellipsoid: $a = 6377397.1542$
 $f = 1/299.153$

Gauss-Krügers projektion:

Förstoringsfaktor i medelmeridianen = 1.0
Medelmeridian = 15°48'29"8000
Additionskonstant för Y = 1 500 000 m.

9.6 SLUTSATSER

Slutsatserna som kan dras ur beräkningsresultatet kan sammanfattas enligt följande. I stort sett stämmer noggrannhetsmåttan i beräkningen överens med resultatet från jämförelsen med terrestra mätningar. Baslinjer med höga medelfel i beräkningen gav dålig överensstämmelse med det terrestra nätet. (Undantaget är baslinjen Mårtsbo - Sälgsjön). Däremot är medelfelen från beräkningen betydligt lägre än den verkliga osäkerheten. (Det är ju interna medelfel som anges i beräkningen.)

Att använda data från ouppvärmade mottagare visade sig inte alls gå bra. De data som erhöles i början av varje mätning försämrade hela beräkningen så avsevärt att vi inte lyckades få ut något användbart resultat. I vårt fall räckte det med att ta bort c:a 20 minuter i början av varje dag.

Vad beträffar observationstidens längd kan vi ej dra några säkra slutsatser ur vårt försök. Vi studerade bla fallet med knappt en timmes observationstid varje dag. Beroende på vilka data vi tog med i beräkningen blev resultatet i det ena fallet godtagbart i jämförelse med terrestra längder, men i Helmerttransformationen avvek Mårtens klack, som ligger i ytterkanten av nätet. I det andra fallet låg jämförelsen med de terrestra längderna utanför toleransen.

Att lära sig programmet utan operatörskurs kräver en stor arbetsinsats. Råd och diskussion med leverantören kan höja kvaliteten. Erfarenhet krävs för att få goda resultat.

10 FÄLTFÖRSÖK

Den 3:e juni levererades de tre WM 101-GPS-mottagarna från Svenska Wild-Leitz. Efter en vecka på KTH transporterades instrumenten till LMV den 12:e juni. Den 15:e till 19:e juni genomförde vi tillsammans med vår handledare Bo Jonsson testmätningar i Mårtsbonätet, dvs samma nät som vi tidigare utfört beräkningar på. Eftersom många punkter i nätet krävde att man var minst två personer fick vi hjälp med hantlangning.

Mätningarna planerades så att vi hela tiden hade en station fast (Mårtsbo) och en gemensam baslinje mellan dagarna. Vid utformning av GPS-nät återstår mycket att undersöka. Den metod vi valt är endast en av flera möjliga. På grund av det stora avståndet mellan punkterna och deras beskaffenhet samt den korta observationstid som var till förfogande varje dag, genomfördes inga förflyttningar utan alla mottagare stod stilla under hela observationsperioden varje dag.

Mätningarna utfördes enligt följande schema:

15/6	Mårtsbo, Hille
16/6	Mårtsbo, Hille, Sälgsjön
17/6	Mårtsbo, Sälgsjön, Mårtens klack
18/6	Mårtsbo, Mårtens klack, Västerbo
19/6	Mårtsbo, Västerbo, Nyhammar

Den första och näst sista dagens observationer blev lidande av vår ovana att klättra i torn. Med väderlekens hjälp inställdes Mårtens klack (15 m blött träorn) den första dagen, och näst sista dagen förkortades observationerna på Västerbo (31 m "svajigt" torn i blåsväder).

Meteorologiska data (temperatur, tryck och luftfuktighet) samlades in under mätningens gång. I stort sett regnade det alla dagar utom torsdagen den 18/6. På midsommarafton den 19/6 var det dessutom åskväder, vilket förmodligen var orsaken till att det den dagen blev många dåliga observationer.

Strömförsörjningen till mottagarna bestod på Mårtsbo och Hille av nätström via kraftaggregat och på de andra punkterna till en början av internbatteri. Internbatteriet på åtminstone en mottagare visade sig inte räcka till hela observationsperioden, varför vi senare använde externbatteri på de punkter som ej hade tillgång till nätström. Mottagarna värmdes upp c:a en timme under transporten ut till punkterna.

En bärbar 10-m mast användes på Sälgsjön och Nyhammar. Den fungerade bra. Två helst tre man behövdes för att resa masten och nedtagning klarades av en person.

Den andra dagen, 16/16 provade vi att använda kommunikationsradio mellan Sälgsjön och Hille, men vi lyckades aldrig upprätta någon förbindelse. De två följande dagarna hyrde vi mobiltelefoner, vilka nu för övrigt tillhör instrumentpoolen. Detta visade sig vara ett förträffligt hjälpmedel dels för att diskutera problem som uppkommit och dels för att under mätningens gång kunna förändra planerna och t ex förlänga observationstiden om komplikationer tillstött på någon station. Kommunikationsradion blev även störd av GPS-mottagaren, så att man vid anrop fick förflytta sig 50-100 m från mätplatsen för att kunna tala obehindrat, inte alltid utan problem då man tex vill jämföra värden hos mottagarna. Telefonerna stördes ej alls. Om mätningarna störs av telefonerna får framtiden utvisa. Det kan inte nog poängteras vad ett fungerande kommunikationssystem är värt.

På grund av tidpunkten för leveransen ingick inte beräkningarna i examenarbetet, utan dessa utförs av Bo Jonsson.

Våra tidigare erfarenheter av satellitmätningar bestod av några dagars mätningar med Dopplerutrustningen JMR-1 respektive Magnawox 1502. För att lära oss GPS-utrustningen utgick vi från manualen. Till mottagarna hör två manualer - en "fältmanual" som är relativt kortfattad och en mer omfattande teknisk referensmanual. Vi hade till en början endast tillgång till den kortare fältmanualen och saknade i denna en överblick av mottagarens uppbyggnad och funktion. Manualen kändes ostrukturerad och det var svårt att endast med hjälp av denna förstå vilka moment som var nödvändiga och när de olika momenten kunde och borde utföras. Vi kände oss kort sagt osäkra på hur mottagarna borde hanteras och avstod från att röra mottagarna mer än nödvändigt under mätningarnas gång.

Vår uppfattning är att manualen ej räcker till för att lära ut hur mottagarna skall hanteras, utan det bästa och effektivaste sättet är nog att erfaren personal demonstrerar mottagarna och låter "eleverna" genomföra de olika momenten under handledning. Däremot kan kortmanualen vara bra som "lathund" för en redan van operatör.

SLUTORD

Innan vi började med det här examensarbetet visste vi inte speciellt mycket om GPS. Under hand som vi genomfört arbetet har vi lärt oss mycket nytt och gjort en hel del misstag. Vi har insett att baskunskaper om GPS samt vana av mätningar och beräkningar är nödvändiga för att uppnå goda resultat. Speciellt om observationerna, liksom delvis i vårt underlag, är av sämre kvalite, är det viktigt med tidigare erfarenhet av beräkningar av GPS-observationer.

På grund av den skiftande kvaliteten på observationsmaterialiet och av att vi då saknade den nödvändiga erfarenheten, kunde försöken med avseende på observationstidens minimala längd och repeterbarheten för baslinjer ej utföras på ett riktigt bra sätt. Ur vårt försök har vi inte kunnat dra några säkra slutsatser. Det är därför intressant med flera undersökningar på observationstidens längd och repeterbarhet hos baslinjemätningar.

En annan studie, som vi ser som mycket intressant och angelägen, är att studera olika nätkonfigurationer - både teoretiskt och praktiskt. I övrigt kan nämnas att det finns många bitar kvar att utreda, prova och kontrollera. Förslag på nya examensarbeten kan säkert ges av GPS-gruppens medlemmar.

Utvecklingen inom GPS går för närvarande mycket snabbt och GPS kommer troligen att spela stor roll för geodesin, fotogrammetrin och många andra områden i framtiden.

REFERENSER

- Bergström, K., (1982): En Introduktion till
Positionsbestämning med Satellit-Doppler Teknik.
Examensarbete. Institutionen för Geodesi, Kungliga
Tekniska Högskolan, Stockholm
- Blom, G., (1980): Sannolikhetsteori och Statistikteori med
Tillämpningar. Studentlitteratur, Box 1719,
221 01 Lund
- Brunner, F.K., E. Frei and S. Chamberlain, (1986): Test
Measurements Using The WM101. Wild Heerbrugg LTD.
CH-9435 Heerbrugg, Switzerland and Magnavox Advanced
Products and Systems Company, 2829 Maricopa Street,
Torrance, CA 90503. Reprinted from: Proc. Seminar on
GPS. Royal Inst. Technology, Dept. of Geodesy,
Stockholm, Trita Geod. 4001:20p
- Chamberlain, S., R. Eastwood, J. Maenpa: (1986), The WM101
GPS Satellite Surveying Equipment. Magnawox
Advanced Produkts and System Company, 2829 Maricopa
Street, Torrance, California, 90503, USA.
To appear in the proceedings of the Fourth
International Geodetic Symposium on Satellite
Positioning, 28 April - 2 Maj 1986, Austin, Texas, USA
- Frei, E., R. Gough, F.K. Brunner, (1985): POPS: A new
generation of GPS post-processing software. Wild
Heerbrugg LTD, 9435 Heerbrugg, Switzerland
- Goad, C.C.: Precise Relative Positioning
Determination Using Global Positioning System
Carrier Phase Measurements in a Nondifference Mode.
National Geodetic Survey, Charting and Geodetic
Services, National Ocean Service, NOAA, Rockville,
Maryland 20852
- Gurtner, W., G. Beutler, I. Bauersima, T. Schildknecht:
Evaluation of GPS Carrier Difference Observations:
The Bernese Second Generation Software Package.
Astronomical Institute, University of Berne,
Sidlerstrasse 5, 3012 - Berne, Switzerland
- Hath, R. and K. Larson, : MAGNET-4100 GPS Survey Program,
Processing Techniques and Test Results. Magnavox
Advanced Products System Company, 2829 Maricopa
Street, Torrance, California 90503 and Geophysical
Service Incorporated, 7800 Banner Drive, Dallas, Texas
75265

- Hein, G., B. Eissfeller, : The Basic Observation Equations of Carrier Phase Measurements to the Global Positioning System including General Orbit Modelling. Institute of Astronomical and Physical Geodesy, Werner-Heisenberg-Weg 39, 8014 Neuberg, Federal Republic of Germany
- Håkansson, A. (1987: GPS i Bjäre. ISBN:91-7170-908-8
Tekniska högskolan, 100 44 Stockholm
- Jonsson, B., (sept. 1986): GPS Observations with Trimble 4000 S and Texas TI 4100 - Status Report. National Land Survey, Gävle, Sweden.
Nordic Geodetic Commission, 10th General Meeting
Helsinki 1986
- Jonsson, B., (1987:1): Några Svenska Erfarenheter av Positionsbestämning med Global Positioning System (GPS). Lantmäteriverket. Svensk Lantmäteritidskrift nr. 1987:1.
- Kass, W.G., R.L. Dulaney: Procedures for processing GPS phaseobservations at the National Geodetic Survey. National Geodetic Survey, National Ocean Service, NOAA, Rockville, Maryland 20852, USA
- King, R.W., E.G. Masters, C. Rizos, A. Stoltz, J. Collins, (1985): Surveying with GPS. Monogram No.9, School of Surveying. The University of New South Wales, Kensington NSW, Australia 2033
- Langely, R.B mfl. The spring 1985 GPS High-Precision Baseline Test: Preliminary Analyses with DIPOP. Geodetic Research Laboratory, Dept. of Surveying Engineering, University of New Brunswick, P.O. Box 4400, Fredericton, N.B., Canada E3B5A3
- MATEMATISK STATISTIK, Formel och Tabellsamling i Matematisk Statistik Fortsättningskurs II, För LMK3 KTH, Inst. för Matematik, 100 44 Stockholm
- Pehrson, S., (1986): GPS, En Marknadsöversikt Med Introduktion. Examensarbete, Kungliga Tekniska Högskolan, Institutionen För Geodesi
- PoPS Manual, (okt. 1986): PoPS Manual. Wm Satellit Survey Company, A joint venture of Magnavox Survey System Inc. and Wild Heerbrugg Survey Corporation
- Ringström, U., L.-E. Selin, (1984): Vågrörelselära, Akustik, Optik. Tredje Reviderade Upplagan. Teknisk Högskolelitteratur i Sthlm ,AB THS Fack, 100 44 Stockholm

- Santerre, R. mfl: Precise Relative GPS Positioning with
DIPOP 2.0. Dept of Surveying Engineering, University
of New Brunswick, P.O. Box 4400, Fredericton N.B.
Canada
- Scherrer, R., The WM GPS Primer. WM Satellit Survey
Company. Wild Heerbrugg, Geodesy Division, CH-9435
Heerbrugg, Switzerland
- Sjöberg, L., (1981): Geodetiska Satellitmetoder - en
Översikt. Tekniska Skrifter nr. 1981:6,
Lantmäteriverket, 801 12 Gävle, Sweden
- Sjöberg, L.E., L. Eliasson, (nov. 1982): A Comparison
of ED79 and Satellite Doppler Coordinates in Sweden.
Lantmäteriverket - National Land Survey, S-801 12
Gävle
- TRIMBLE, (aug. 1986): TRIMVEC, GPS Survey Software,
Preliminary User's Manual Trimble Navigation Limited
585 North Mary Avenue, Sunnyvale, California 94086
- Vanicek, p., A. Kleusberg, R.B. Langley, R. Santerre,
D.E. Wells: On the Elimination of Biases in
Processing Differential GPS Observations. Department
of Surveying Engineering, University of New Brunswick,
P.O. Box 4400 Fredericton, New Brunswick, Canada
- Wells, D. m fl, (1986): Guide to GPS Positioning. Canadian
GPS Associates, P.O. Box 3184, Postal Station B,
Fredericton, New Brunswick, Canada, E3A 5G9
- WM101 Technical Reference Manual (1986), Wild-Magnawox
Satellite Survey Company, Wild Heerbrugg, CH-9435
Heerbrugg, Schweiz
- Wübbena, G.: Software Developments for Geodetic
Positioning with GPS Using TI 4100 Code and Carrier
Measurements. Institut für Erdmessung, Universität
Hannover, Nienburger Strasse 6, 3000 Hannover 1,
Federal Republic of Germany
- Ørpen, O., (10 jan. 1985): Orientering om Navsar GPS.
Forsvarets Forskningsinstitutt, Norge.
Presentert ved Nautisk Forums Seminar on Navsar
GPS 10 jan 1985

