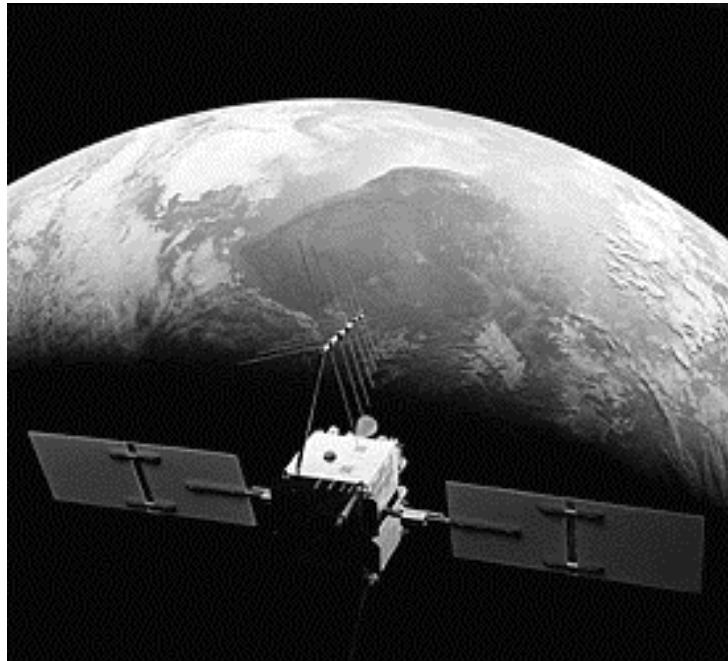


Så fungerar GNSS



Ett samarbetsprojekt mellan

Banverket
Lantmäteriet
Vägverket

Andreas Engfeldt
Lotti Jivall

Gävle 2003

L A N T M Ä T E R I E T





Copyright ©

2003-11-20

Författare Andreas Engfeldt, Lotti Jivall

Typografi och layout Rainer Hertel

Totalt antal sidor 44

LMV-rapport 2003:10 – ISSN 280-5731

Innehåll:

1	Förord	3
2	Läsanvisning	3
3	Inledning	4
4	Satellitsystem	4
4.1	GPS	5
4.1.1	Satellitsignalen	6
4.1.2	GPS-tjänster för absolut mätning	7
4.1.3	GPS i framtiden	7
4.2	GLONASS	9
4.2.1	Satellitsignalen	10
4.2.2	GLONASS-tjänster för absolutmätning	10
4.2.3	GLONASS i framtiden	11
4.3	Galileo	11
4.4	Framtida tillgång på satelliter	12
4.5	Information om GPS, GLONASS och Galileo	13
5	Mätmetoder	13
5.1	Kodmätning	14
5.2	Bärvågs mätning	14
5.3	Bärvågsunderstödd kodmätning	15
6	Positionsbestämningsmetoder	16
6.1	Absolut mätning	16
6.2	Relativ mätning	17
6.2.1	DGPS	17
6.2.2	Nätverks-DGPS	18
6.2.3	RTK	19
6.2.4	Nätverks-RTK	21
6.2.5	Statisk mätning	21
6.3	Utrustning	22
6.4	Faktorer som påverkar resultatet	23

7	Satellitillgänglighet	25
7.1	Satellitprognos	25
7.2	Signalkvalitet och satellitgeometri	27
7.3	Sikthinder	27
8	Stödsystem	29
8.1	Svenska stödsystem	29
8.1.1	SWEPOS	30
8.1.2	Nätverks-RTK med SWEPOS	30
8.1.3	Epos	31
8.1.4	Sjöfartsverkets DGPS-system	31
8.2	Internationella stödsystem	31
8.2.1	OmniSTAR och Landstar	31
8.2.2	EGNOS	32
8.2.3	IGS och EUREF	32
9	Referenssystem	33
10	Tillämpningar	33
10.1	Geodetisk mätning	34
10.2	GIS	34
10.3	Navigation	35
10.4	Jord- och skogsbruk	35
11	Referenser	36
	Bilaga 1: GPS-teknik, en liten ordlista	37

Så fungerar GNSS

1 Förord

Denna rapport är framtagen i ett samarbetsprojekt mellan Lantmäteriet, Banverket och Vägverket. Andreas Engfeldt och Lotti Jivall på Geodetiska utvecklingsenheten vid Lantmäteriverket har ställt samman rapporten med stöd och synpunkter från övriga i projektet.

Rapporten har nu delvis skrivits om av Andreas Engfeldt med stöd av Sten Lundén (Banverket), Per Isaksson (Vägverket) och Bo Jonsson (Lantmäteriet). Denna upplaga av rapporten ersätter alltså den gamla (Kort introduktion till GNSS, LMV rapport 2000:2).

2 Läsanvisning

I den här skriften presenteras de olika satellitbaserade positionssystemen och en del stödsystem till dem. Vidare tas mätmetoder och noggrannheter upp, liksom exempel på olika tillämpningar.

Rapporten är avsedd som en introduktion till satellitbaserade navigationssystem, GNSS - Global Navigation Satellite Systems. Framför allt beskrivs systemet GPS, som är ett GNSS. Rapporten kompletterar även den serie OH-bilder (GPS-generell) som tidigare tagits fram.

Rapporten och OH-serien är ett grundläggande material för GPS-kurser. Bildserien består av bilder på tre nivåer. Bilderna på den övergripande nivån (1, 2, 3 osv.) kan användas för sig, men om bilderna på mellannivån eller den detaljerade nivån ska användas, bör också bilderna på nivåerna över användas och då i ordningen 1, 1.1, 1.1.1, 1.1.2, 1.2, 1.2.1 osv.

Ytterligare kunskapsinformation återfinns på "anteckningsidorna" i OH-serien, speciellt på den mest detaljerade nivån.

Rapporten övergår gradvis, liksom OH-serien, från en övergripande nivå till mer detaljerade nivåer. Därför används vissa begrepp som är fackterminologi. Dessa uttryck finns i de allra flesta fallen förklarade i ordlistan (Bilaga 1).

3 Inledning

Satellitbaserade positionssystem, GNSS, har genom det amerikanska systemet GPS - Global Positioning System - fått en betydande roll inom många områden under den senaste 10-15-årsperioden. De är en självklar del i många navigationssystem. I början användes GNSS (GPS) mest för navigation till sjöss och i luften, men landnavigering ökar allt mer. Snart ingår GNSS-mottagare i de flesta moderna bilar och mobiltelefoner. För att möta höga civila integritets- och noggrannhetskrav har stödsystem utvecklats och nya är på gång. Även ett helt nytt GNSS, Galileo, är under utveckling. Vidare utvecklas GPS-systemet så att noggrannheten och tillförlitligheten förbättras.

Förutom för navigering används GNSS till en rad tillämpningar med varierande noggrannhetskrav, t.ex. inmätning till GIS, geodetisk stommätning, maskinguidning, deformationsmätning, meteorologiska studier och tidssynkronisering. Utbyggnad av stödsystem för centimeternoggrannhet (Nätverks -RTK) har inletts och kommer att utöka och förenkla användningen i denna noggrannhetsklass.

Det här är bara början. Endast fantasin sätter gränserna för vad man kan använda GNSS till.

Inom några år kommer GNSS vara var persons egendom och lika vanligt som mobiltelefoner, både yrkesmässigt och på fritiden.

4 Satellitsystem

I detta avsnitt beskrivs tre olika satellitsystem, deras uppbyggnad, status, tjänster och framtidsutsikter.

- GPS

NavStar GPS (Navigation Satellite Time and Ranging Global Positioning System) är ett amerikanskt system som i grunden är militärt. Det påbörjades 1973 och blev operationellt 1993.

- GLONASS

GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) är ett ryskt system som i grunden är militärt. Det påbörjades 1982 och blev operationellt 1996, men går nu ej längre att använda ensamt eftersom det innehåller för få satelliter. Framtiden för systemet är oviss.

- Galileo

Galileo är ett europeiskt framtida system som i grunden skall vara civilt. Beslut om att utvecklingsfasen kunde börja togs i mars 2002. Systemet planeras vara klart för driftsättning år 2008.

4.1 GPS

GPS är ett satellitbaserat navigations- och positionsbestämningssystem. Det är uppbyggt av det amerikanska försvaret, som också förvaltar systemet.

Projektet startades 1973. Systemet var klart att använda för civila ändamål (IOC = Initial Operational Capability) 1993, och 1995 nådde det också upp till de specificerade kraven för militära tillämpningar (FOC = Full Operational Capability). GPS har nu betydligt fler civila användare än militära.

GPS-systemet kan användas gratis, d.v.s. det finns inga användaravgifter.

GPS ger möjlighet till positionsbestämning över hela världen, dygnet runt, oberoende av väder, i realtid. Det är ett passivt system med hög inbyggd noggrannhet. Dess utformning innebär att det finns minst 4 satelliter tillgängliga (över 5 graders elevation) jorden runt under 99.9 procent av tiden. Det amerikanska försvaret garanterar 24 satelliter, och livslängden för dem är specificerad till 7,5-10 år. Oftast finns det fler satelliter, t.ex. 27 stycken i april 2002.

Inklinationen, dvs. kort uttryckt vilken latitud som satelliterna vänder vid, är 55 grader för GPS. Det motsvarar ungefär Bornholms sydspets. Omloppstiden 11 timmar och 57,97 minuter innebär att samma satellitkonstellation återupprepas cirka 4 minuter tidigare varje dygn sett från jorden.

Satelliterna styrs och kontrolleras av det s.k. kontrollsegmentet, som hela tiden är i kontakt med satelliterna.

Kontrollsegmentets uppgift är att övervaka satellitsystemet, bestämma satelliternas ban- och klockparametrar, ladda upp data till satelliterna och vid behov flytta på satelliter. Fem monitorstationer, utplacerade i huvudsak längs ekvatorn, registrerar kontinuerligt signaler från alla satelliter som befinner sig ovanför respektive stations horisont. Data från stationerna sänds till driftledningscentralen i Colorado Springs, där satelliternas banparametrar och korrektioner till satellitklockorna beräknas och förutsägs framåt i

tiden. De framräknade värdena sänds sedan upp till satelliterna från någon av de fyra monitorstationer som också är matarstationer.

Ur användarsynvinkel är GPS ett envägssystem satelliterna sänder och användarna tar emot. Mellan kontrollsegmentet och satelliterna finns en tvåvägskommunikation.

Positionen från GPS fås i referenssystemet WGS84.

4.1.1 Satellitsignalen

Satelliterna sänder ut signaler på två olika frekvenser, nämligen L1 (1575.42 MHz, vilket motsvarar våglängden 19 cm) och L2 (1227.60 MHz, vilket motsvarar våglängden 24 cm). På L1-frekvensen sänds både s.k. P-kod (Precision) och s.k. C/A- kod (Coarse / Acquisition), medan L2-frekvensen endast innehåller P-kod. C/A-koden är tillgänglig för civila användare, medan P-koden endast är tillgänglig för amerikanska försvaret och USA:s allierade.

C/A-koden upprepas efter en millisekund, med våglängden 300 m. P-koden upprepas efter 267 dagar, med våglängden 30 m. Varje satellit har unika koder.

Dessutom sänder satelliterna ut ett satellitmeddelande som innehåller nödvändig information för att beräkna satellitens position och satellitklockans korrektioner (banddata, satellitklockparametrar, satellithälsa m.m.). Meddelandet har överföringshastigheten 50 bitar per sekund.

P-koden är sedan 1993 krypterad till Y-kod, vilket kallas för A/S (Anti-spoofing). Anledningen är att USA och dess allierade inte vill riskera att en fiende återskapar P-koden och på så sätt vilseleda dem. Tillverkarna av civila mottagare har dock olika koncept för att kunna utföra bärvågsmätningar på L2-frekvensen utan tillgång till krypteringskoden.

(Den 1 juli 1991 aktiverade USA:s försvarsdepartement en avsiktlig störning, kallad SA (Selective Availability). Anledningen var att USA:s och dess allierades försvar skulle få positioner med högre noggrannhet än fiendliga styrkor. De beslöt att noggrannheten skulle bli 100 m horisontellt och 156 m vertikalt (95%) för de som inte är allierade med USA. Detta innebar att satellitklockparametrarna medvetet blev degraderade till just den specificerade nivån, vilket då innebar en rejäl försämring av positionsnoggrannheten vid absolut mätning (se avsnitt 6.1). Enligt ett uttalande av presidenten (1996) skulle SA tas bort någon gång mellan år 2000 och år 2006. Detta skedde den 1 maj 2000 och har inneburit att DGPS (se avsnitt

6.2.1) inte behövs i lika stor utsträckning längre. SA påverkade nämligen framför allt mätning med en mottagare.)

L1 19 cm 1575 MHz	C/A-kod 300 m	P (Y)-kod 30 m
L2 24 cm 1227 MHz		P(Y)-kod 30 m

Satellitmeddelande

Figur 1: GPS-signalens struktur.

4.1.2 GPS-tjänster för absolut mätning

GPS har två olika tjänster, SPS och PPS, med olika tillgång till signaler och noggrannheter (vid absolut mätning, se avsnitt 6.1).

SPS-tjänsten (Standard Positioning Service) är avsedd för civilt bruk. Den ger tillgång till C/A-kod och bärvåg för L1 och L2, samt till satellitmeddelandet. Positionsnoggrannheten (95 %) är specificerad till 13 m horisontellt, 22 m vertikalt, samt 40 nanosekunder relaterat till UTC (95 %) vid tidsöverföring.

PPS-tjänsten (Precise Positioning Service) ger tillgång till C/A- och P-koder samt bärvåg för L1 och L2. Denna tjänst är avsedd för användning militärt av USA och USA:s allierade, men den kan tillhandahållas civilt för dem som uppfyller USA:s nationella säkerhetskrav. PPS ger tillgång till krypterad P-kod (Y-kod) för både L1 och L2 utöver SPS. Den exakta noggrannheten är ännu så länge hemlig.

4.1.3 GPS i framtiden

I mars 1998 beslutades att GPS ska förses med två nya civila signaler. Beslutet innebär att den andra civila signalen kommer att sändas på L2-frekvensen. Därmed kommer både L1 och L2 att innehålla en civil

(C/A) och en militär (P(Y)) signal. Den tredje signalen ska ligga på den nya frekvensen L5, som planeras att få frekvensen 1176,45 MHz.

De båda nya civila signalerna kommer att införas på nästa generations satelliter, Block IIF. Införandet kommer att ske stegvis. Den civila signalen på L2 kommer att finnas på de satelliter som sänds upp från år 2004 och den tredje civila signalen L5 från 2005, enligt ett presidentuttalande 25 januari 1999. Dessutom kommer en ny militär signal, Lm (M-kod), att sändas på både L1 och L2.

L1 19 cm	C/A-kod 300 m	P(Y)-kod 30 m	M-kod
L2 24 cm	C/A-kod 300 m	P(Y)-kod 30 m	M-kod
L5 (L3c) 25,5 cm	Kod		

Satellitmeddelande

Figur 2: Satellitsignalen i framtiden (de två vänstra kolumnerna är civilt tillgängliga signaler, de två högra är militära signaler).

Koderna på den nya frekvensen kommer att ha en högre bit-hastighet (kortare våglängd) än C/A-koden, vilket bl.a. ger högre upplösning vid kodmätning, lägre brus och mindre känslighet för flervägsfel (multipath).

Den stora fördelen med en andra civil signal är ökad noggrannhet för absolut kodmätning och tillförlitlighet.

Den största anledningen till en tredje civil frekvens är att säkerställa användningen av GPS i tillämpningar som har direkt betydelse för människors säkerhet, inom t.ex. civil luftfart. Den tredje civila frekvensen kommer också till mest nytta vid precisionsmätning (bärvågsmätning med kort observationstid, lättare att lösa period-obekanta, se avsnitt 5.2). Mättiden förväntas förkortas och tidsbestämningen, noggrannheten och tillförlitligheten förbättras.

En utökning av antalet satelliter till över 30 diskuteras också, men inget beslut finns.

Aktivitet	Datum
SA upphörde	maj 2000
C/A-kod på L2 och M-kod på L1 & L2 <ul style="list-style-type: none"> • 1:a satelliten • IOC (18 satelliter) • FOC (24 satelliter) 	2004 2009 2012
Tredje civil frekvens, L5 <ul style="list-style-type: none"> • 1:a satelliten • IOC (18 satelliter) • FOC (24 satelliter) 	2005 2012 2015
GPS III Framtida förbättringar	2011 – TBD

Figur 3: Tidsplan för utvecklingen av GPS (TBD= To be determined)

Andra planerade förbättringar är en utökning av kontrollsegmentet med ytterligare sex stationer samt tätare uppladdning med information till satelliterna.

4.2 GLONASS

GLONASS-projektet startade i oktober 1982 och är uppbyggt och förvaltas av det ryska försvaret. Systemet ska egentligen innehålla 24 satelliter (21 + 3 i reserv), men har endast gjort det under en kort period 1996. Efter det dröjde det ganska länge innan någon ny uppskjutning av satelliter kom till stånd. Medellivslängden för en GLONASS-satellit endast är 4,5 år, vilket innebär att systemet måste fyllas på med satelliter betydligt oftare än GPS-systemet (vars satelliter har en livslängd på 7,5-10 år i snitt). I november 2003 fanns det åtta GLONASS-satelliter, efter att systemet ett tag hade varit nere på fem satelliter.

Inklinationen är 64,8 grader för GLONASS. Satelliterna vänder alltså ungefär vid Skellefteå. Alltså skulle GLONASS täcka in Sverige på ett bättre sätt än GPS (jfr Skellefteå och Bornholms latitudläge) om systemet hade varit fullt utbyggt. Omloppstiden 11 timmar 15,73 min innebär att samma satellitkonstellation sett från jorden uppträder ca 1,5 timme tidigare varje dygn.

Kontrollsegmentet för GLONASS finns i sin helhet inom det forna Sovjetunionens territorium. Följden blir att det kan dröja flera timmar innan felaktiga satelliter kan upptäckas och åtgärdas.

GLONASS använder sig av referenssystemet PZ90, men vid mätning med kombinerade GPS/GLONASS-mottagare korrigerar mottagarens programvara för skillnad i tid och referenssystem och presenterar positionerna i WGS84 och GPS-tid.

4.2.1 Satellitsignalen

Signalen för GLONASS är snarlik signalen för GPS, men det finns en del skillnader:

Från början var det samma identitet (koder) för alla satelliter men unika frekvenser för varje satellit. Det innebar att de tog upp ett stort frekvensspektrum. Formeln för GLONASS-frekvenserna på L1 och L2 låg då inom intervall som var olika för varje satellit.

$$L1 = 1602 + n \cdot 0.5625 \text{ MHz}$$

$$L2 = 1246 + n \cdot 0.4375 \text{ MHz}$$

På senare år har frekvenser blivit alltmer efterfrågade och GLONASS har fått lämna ifrån sig några av frekvenserna. Istället delar nu två satelliter på var sin sida om jorden på en frekvens.

Koderna som finns är C/A- och P-kod och precis som i GPS finns båda koderna på L1 men endast P-koden på L2.

C/A-kod finns på L2 från och med generation GLONASS-M (nästa generation GLONASS-satelliter).

4.2.2 GLONASS-tjänster för absolutmätning

Även för GLONASS finns det två sorters tjänster, CSA och CHA, med olika tillgång till signaler och noggrannheter (vid absolut mätning).

CSA (Channel of Standard Accuracy) används för civilt bruk och har tillgång till C/A-kod och satellitmeddelande. Positionsnoggrannheten (99,7 %, notera procentsatsen) är specificerad till 60 m horisontellt, 75 m vertikalt, samt till 1 mikrosekund relaterat till UTC (99.7 %) vid tidsöverföring.

CHA (Channel of High Accuracy) är avsedd för militära ändamål.

4.2.3 GLONASS i framtiden

Framtiden för GLONASS-systemet är fortfarande mycket osäker. Det finns en plan som anger att sex satelliter ska skickas upp 2003 och sedan tre satelliter per år under 2004 och 2005.

Nästa version av systemet är under utveckling och kallas för GLONASS-M. År 2006 kommer det enligt planerna att finnas elva sådana satelliter i bruk. De första två GLONASS-M satelliterna beräknas skickas upp redan i år (2003).

GLONASS bedöms tills vidare vara ett militärt system i grunden men delvis öppet med garanti för civilt internationellt bruk.

4.3 Galileo

Galileo är under utveckling och skall bli ett civilt satellitsystem. Ägarna är EU (Europeiska Unionen) och ESA (European Space Agency). Den första satellituppskjutningen beräknas ske år 2005 och systemet beräknas vara i funktion år 2008. Systemet ska vara kompatibelt med GPS (och även GLONASS om systemet är i drift då). Integritet ska sändas via geostationära satelliter eller via en särskild integritetskanal.

Tidsplanen för Galileo:

Juni 1999	beslut att starta definitionsfasen
Juni 1999 - 2001	definitionsfas
2002	beslut att starta utvecklingsfasen
2002 - 2004	utvecklingsfas
2005 - 2007	implementeringsfas
2007 - 2008	slututvecklingsfas.

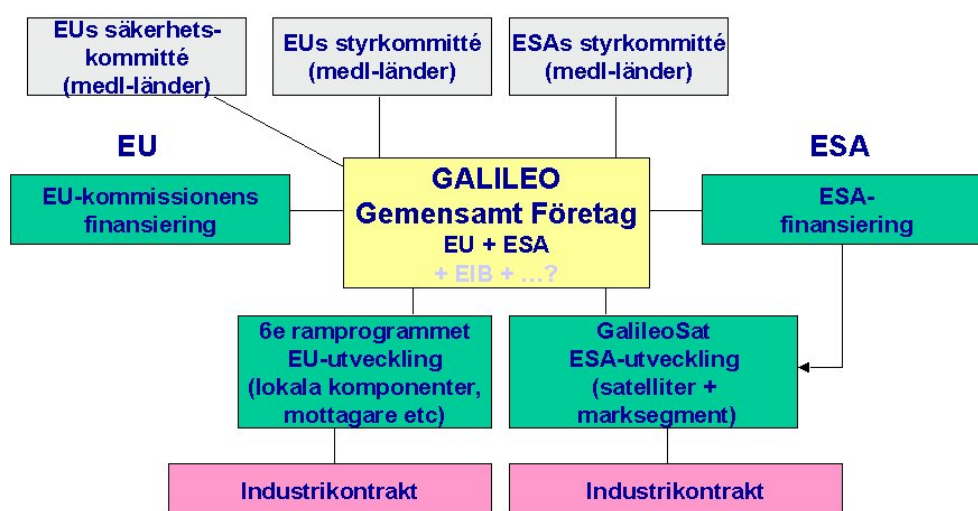
Sverige är med och påverkar Galileos tekniska utformning på ett antal olika sätt. I EU:s styrgrupp ingår representanter från Luftfartsinspektionen och Rymdstyrelsen, i ESA:s styrgrupp ingår en representant från Rymdstyrelsen, och i en svensk referensgrupp ingår representanter från bl.a. Lantmäteriet, Vägverket och Banverket.

Även politiskt har Sverige varit med och påverkat Galileos utformning genom att representanter från Näringsdepartementet ingår i EU:s transportråd (Transport council).

Styrgrupperna var involverade i definitionsfasen av Galileo. De svenska representanterna verkade där för att Galileo ska fungera bra även på höga latituder.

Styrgrupperna förankrade den svenska ståndpunkten dels hos referensgruppen, dels hos Näringsdepartementet. Svenska ställningstaganden inför beslut bereddes på Näringsdepartementet.

Galileo kommer att finansieras genom offentligt-privat partnerskap (PPP). Just nu (maj 2003) pågår en offertfas för privata operatörer och i augusti 2003 kommer två stycken att väljas ut. Dessa ska sedan göra en parallell affärsplansutveckling och under 2004 kommer en av dem att väljas ut.



Figur 4: Schema över Galileos organisation under utvecklingsfasen

4.4 Framtida tillgång på satelliter

De planer som finns för de olika systemen innebär att tillgången på satelliter (eller snarare till C/A-kod) i framtiden skulle bli enligt Figur 5.

	GPS			GALILEO			GLONASS		Totalt antal	
	L1	L2	L5	OS1	OS2	CS	G1	G2	Signaler	Satelliter
2003	27						8	8	3	35
2006	28	8	2	10	10	10	15	15	3	53
2009	28	16	10	20	20	20	24	24	6	72
2012	28	24	18	30	30	30	24	24	8	82
2015	28	28	24	30	30	30	24	24	8	82

Figur 5: Så här skulle framtiden kunna se ut med avseende på satellit-tillgång (eller snarare C/A-kodstillgång) (2003= april 2003)

4.5 Information om GPS, GLONASS och Galileo

Det finns en svensk standard som berör satellitbaserad positionsbestämning, nämligen "Satellitbaserad positionsbestämning - GPS - terminologi" (SS 637001). Här finns svenska benämningar och förklaringar av termer inom satellitbaserad positionsbestämning med tonvikt på GPS.

Det finns webbplatser för GPS, GLONASS och Galileo.

SWEPOS: <http://www.swepos.com>

US Coast Guard: <http://www.navcen.uscg.gov/>

GLONASS: <http://www.glonass-center.ru/frame.html>

Galileo:

http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/index_en.htm

Den amerikanska federala navigeringsplanen (FRP) är ett officiellt policydokument som tas fram av USA:s försvars- och transportdepartement. Planen är tvåårig och reglerar radionavigering i USA och system för detta, inklusive GPS. Den senaste utgavs i mars 2002. De utkommer vartannat år och finns att läsa på <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/frp2001/default.htm>

"Radionavigeringsplanen för Sverige" (RNP) är den svenska motsvarigheten. Förutom viktiga tekniska data för olika radionavigeringssystem ges även en prognos för den framtida utvecklingen. Den senaste svenska radionavigeringsplanen utgavs i april 2000 (och innehåller allt från GPS till radiofyrrar och Loran-C). Det finns en uppdaterad summering av den svenska radionavigeringsplanen på engelska, som utgavs i mars 2002.

Man kan beställa "Radionavigeringsplanen för Sverige" från Sjöfartsverket eller hämta den på deras webbplats: <http://www.sjofartsverket.se>

5 Mätmetoder

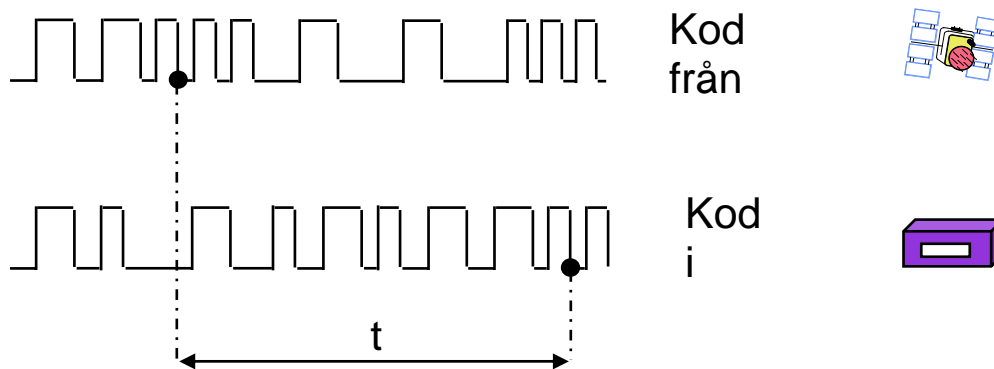
Med en GPS-mottagare mäts i princip tiden det tar för signalen att gå från satelliten till mottagaren. Med hjälp av kännedom om satellit-signalens utbredningshastighet kan tiden omvandlas till ett avstånd, och i och med att satelliternas positioner är kända kan man med hjälp av inbindning i rymden bestämma GPS-mottagarens position.

Det finns två principiellt olika metoder för avståndsmätningen, kodmätning respektive bärvågsmätning.

5.1 Kodmätning

Kodmätning är detsamma som avståndsmätning på C/A- eller P-koden. Precisionen i kodmätningen kan för de bästa mottagarna uppskattas till några decimeter. I GPS-mottagaren skapas en kopia av koden som genereras i satelliten. Den kod som tas emot från satelliten jämförs sedan med den som skapats i mottagaren och fördröjningen mellan de båda koderna mäts med hjälp av tidsmarkeringar. Den uppmätta fördröjningen motsvarar den tid det tar för den utsända signalen att gå från satellit till mottagare, s.k. gångtid. Ur gångtiden kan sedan avståndet mellan satellit och mottagare beräknas eftersom signalens utbredningshastighet är känd (= ljusets hastighet).

Detta avstånd brukar betecknas pseudoavstånd eftersom det i allmänhet innehåller fel som uppkommer på grund av att mottagarklockan inte är fullständigt synkroniserad med satellitklockan.



Figur 6: Kodmätning.

5.2 Bärvågsmätning

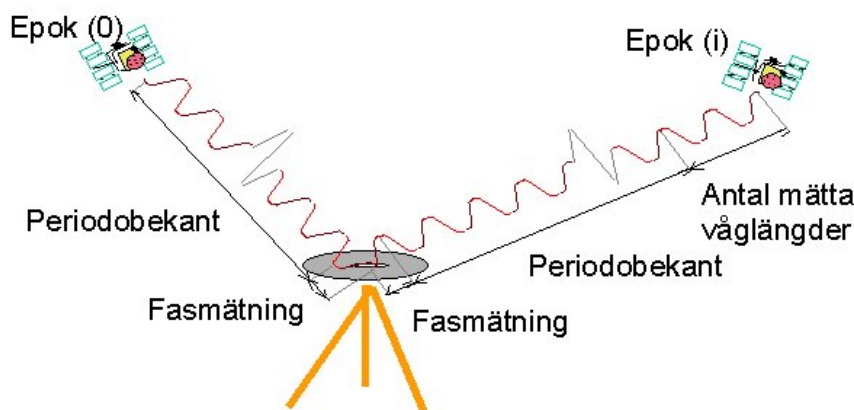
Bärvågsmätning är det samma som mätning på satellitsignalens bärvåg, L1 eller L2 (eller båda). Upplösningen vid bärvågsfasmätning kan uppskattas till några millimeter.

I GPS-mottagaren skapas en signal som har samma frekvens som GPS-systemets bärvåg. Frekvensen för den signal som tas emot från

satelliten är dopplerförskjuten. Denna signal kombineras med den frekvens som genereras i mottagaren. Bärvågen innehåller inga tidsmärken och därför kan signalens gångtid (fördröjning) inte mätas upp direkt.

Däremot kan fasen för den mottagna signalen bestämmas mycket noggrant, med upplösningen någon hundraleds period. Avståndet mellan satellit och mottagare kan i princip uttryckas som ett antal hela bärvågsperioder plus en del av en period. Bestämning av delen av perioden sker genom fasmätning, som är en relativt okomplicerad procedur. Vid bibehållen låsning av satellitsignalen till mottagaren räknas förändringen av antalet hela våglängder från den tidpunkt då mottagaren först låste på signalen.

Antalet hela perioder vid den tidpunkt då mätningen började, s.k. periodobekanta, måste bestämmas för att avståndet mellan satellit och mottagare ska kunna bestämmas. För realtidsmätning kallas denna process initialisering. När initialiseringen är klar erhålls en fixlösning (se Bilaga 1) och innan denna är klar ger mottagaren en flytlösning (se Bilaga 1). Tillfälliga avbrott i signallåsningen leder till att ett okänt antal perioder "förloras", s.k. periodbortfall. Korrigering för denna störning görs automatiskt i mottagaren eller manuellt i ett beräkningsprogram.



Figur 7: Bärvågsmätning.

5.3 Bärvågsunderstödd kodmätning

Positionsbestämningen vid kodmätning kan förbättras genom att signalbruset reduceras genom filtrering av kodmätningarna med

bärvågsmätningar. Detta kallas för bärvågsunderstödd kodmätning. För detta används integrerad doppler, vilken innebär att ändringen i avstånd mellan satelliten och GPS-mottagarens antenn mellan två epoker (två på varandra följande mätningar) beräknas ur bärvågsmätningarna. Kodmätningarna filtreras med denna avståndsändring över ett antal epoker. Bärvågsunderstödd kodmätning kräver alltså sammanhängande mätning under någon eller några minuter. De enklaste GPS-mottagarna använder sig inte av bärvågsunderstödd kodmätning.

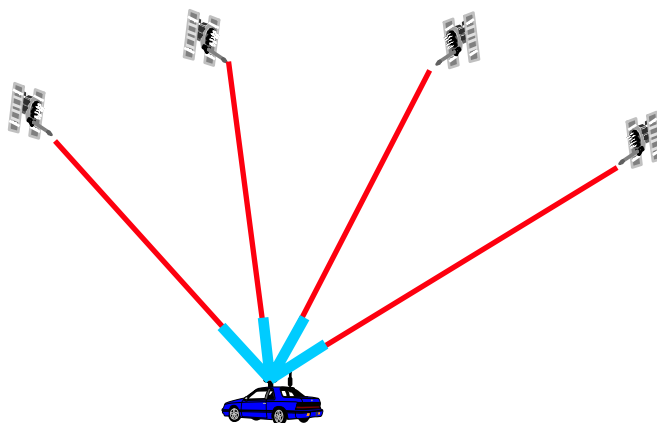
6 Positionsbestämningsmetoder

Mottagarens position kan bestämmas genom att ovanstående avståndsmätningar kombineras med information om satelliternas positioner vid utsändningen av signalerna. Satelliternas positioner kan beräknas ur banddatainformation i satellitmeddelandet.

6.1 Absolut mätning

Den enklaste formen av positionsbestämning kallas absolut positionsbestämning. Den utförs med *en* mottagare. Vid absolut positionsbestämning används nästan uteslutande kodmätning för avståndsmätningen.

Mottagarpositionen bestäms direkt i förhållande till satelliterna genom en inbindning i rymden. För bestämning av en tredimensionell position behövs längdmätning mot minst 4 satelliter. De fyra obekanta - tre koordinater och en mottagarklockkorrektur - ska bestämmas. Satellitpositionen fås initialt i det koordinatsystem som satellitsystemet använder, d.v.s. ett globalt system.



Figur 8: Princip för absolutpositionsbestämning.

För absolutpositionsbestämning finns noggrannhets-specifikationer i GPS respektive GLONASS (se avsnitt 4.1.2 respektive 4.2.2). I praktiken verkar dock GPS ha en högre noggrannhet än i specifikationen. Tester visar att 95 %-nivån nu ligger på bättre än 10 meter horisontellt och 15-25 meter vertikalt.

Skillnaden i specificerad noggrannhet mellan GPS och GLONASS beror på procentsatsen som noggrannheten anges i (se avsnitt 4).

6.2 Relativ mätning

Om högre noggrannhet önskas används relativ positionsbestämning.

Mottagarens position bestäms i förhållande till en känd punkt. Genom att det bildas differenser mellan mätningarna av de båda punkterna elimineras eller reduceras de flesta felkällorna som försämrar mätnoggrannheten vid absolut mätning. Minst två mottagare behövs för att mäta relativt. För att få en korrigerad position måste man mäta mot minst fyra satelliter som är gemensamma för de båda mottagarna.

Noggrannheten är betydligt högre än vid absolut positionsbestämning.

De vanligaste relativa mätmetoderna kallas DGPS, RTK och statisk mätning.

DGPS (=Differentiell GPS) använder sig av kodmätning eller bärvågsunderstödd kodmätning i realtid och har medelfelet 0,5-5 m per koordinat.

RTK (=Real Time Kinematic positioning) använder sig av bärvågsmätning i realtid och har medelfelet 1-3 cm per koordinat.

Statisk mätning innebär en mättid från några minuter till några timmar eller dygn. Baslinjer bestäms genom efterberäkning av bärvågsmätningar. Metoden ger medelfelet 0,5-2 cm per komponent.

6.2.1 DGPS

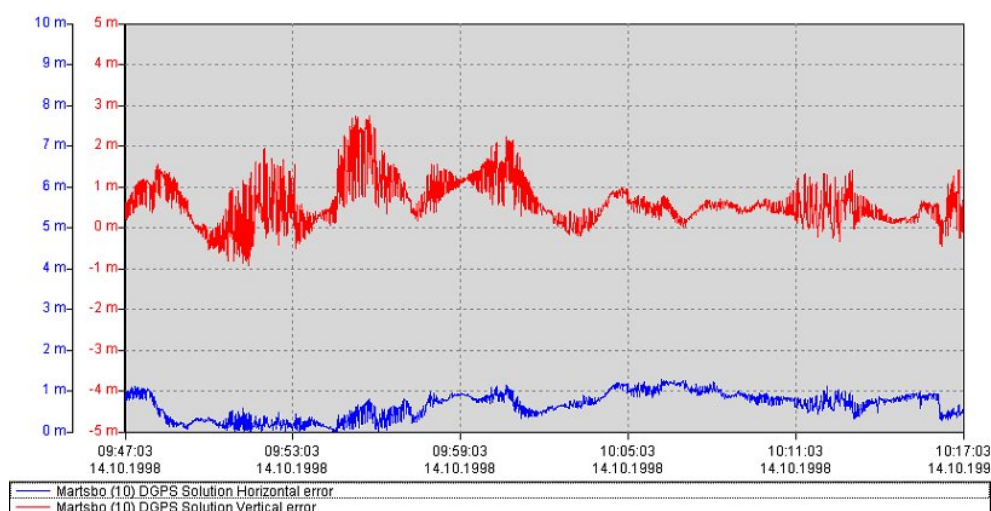
DGPS (Differentiell GPS) innebär relativ kodmätning. En mottagare på känd position kan med hjälp av skillnaden mellan den mätta positionen och den kända positionen beräkna korrektioner för avstånden till satelliterna. Korrektionerna sänds sedan till den rörliga mottagaren, rovern.

Det finns ett standardiserat överföringsformat för avståndskorrektioner, RTCM ver 2.2.

Noggrannheten i DGPS-mätning beror dels på vilken upplösning kodmätningen har, dels på om bärvågsunderstödd kodmätning (se 5.3) används. Med hög upplösning på kodmätningen (narrow correlator) och bärvågsunderstöd erhålls en noggrannhet på ca 1 m horisontellt och 2 m i höjd (95%). Ren kodmätning med standardupplösning ger ett horisontellt medelfel på 10 m (95%).

Figur 9 visar hur DGPS-positionen varierar med tiden. Bilden är tagen ur övervakningsprogrammet i SWEPOS (se avsnitt 8.1.1) där DGPS-mätning görs mellan närliggande SWEPOS-stationer. Bärvågsunderstödd kodmätning med hög upplösning på koden används.

Den övre linjen visar hur positionen varierar i höjd, och den nedre linjen (med skala längst till vänster) visar hur positionen varierar i plan. Avvikelsen i plan från kända koordinater är som sämst strax över 1 meter. Avvikelsen för höjden är sämre, som sämst något bättre än 3 meter. Notera korrelationen i tid. Mätningar som är gjorda nära i tiden överensstämmer ofta väl, men kan avvika från den sanna positionen.



Figur 9: DGPS-positionens variation med tiden.

6.2.2 Nätverks-DGPS

Något som har utvecklats under senare tid är Nätverks-DGPS. Det innebär att användaren får korrektioner som baseras på data från fler referensstationer i stället bara en, som vid vanlig DGPS. En engelsk term för detta är Widearea DGPS (WADGPS).

6.2.3 RTK

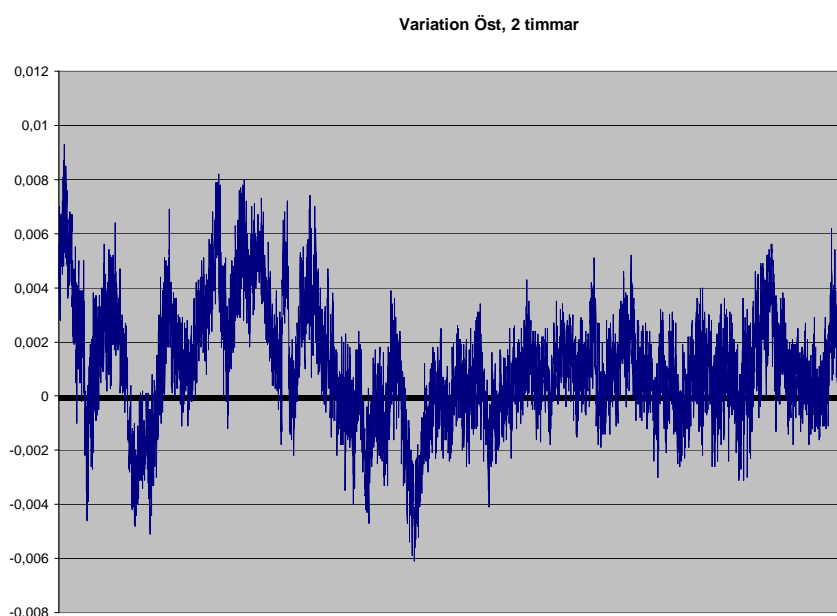
RTK (Real Time Kinematic) innebär bärvågsmätning i realtid. Vid detaljmätning med RTK står användaren i de flesta fall stilla vid själva mätningen och rör sig mellan mätpunkterna. För att fixlösning ska erhållas måste den rörliga mottagaren (rovern) initialiseras, dvs. periodobekanta ska lösas. Detta kan göras på tre olika sätt, nämligen

- känd punkt
- snabb statisk mätning (se 6.2.5)
- flygande, vilket kräver minst 5 satelliter

Tidsåtgången för initialiseringen är från något 10-tal sekunder till några minuter. Det beror på bland annat antal satelliter, satellitgeometrin, avståndet till referensstationen och mottagarens kvalitet. Fixlösningen kan oftast behållas mellan mätpunkterna, men när den tappas så krävs att initialiseringen görs om innan mätning.

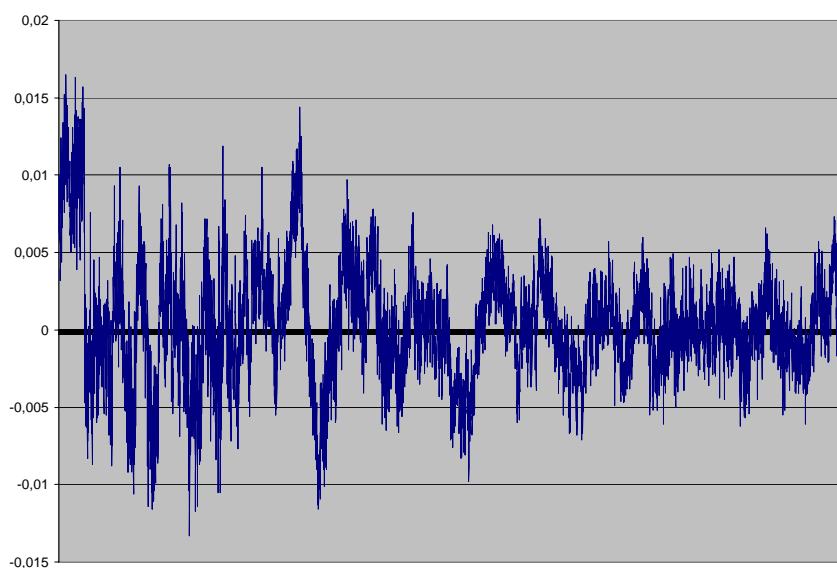
Positionsbestämningen görs i realtid. Algoritmerna för RTK är anpassade för avstånd som är mindre än 10 km från referensstationen. Att de blir sämre på längre avstånd beror bl.a. på skillnaden i jonosfärsrefraktion, som ökar ju längre från referensstationen man kommer. Noggrannheten i plan är ungefär 1 - 2 cm (95%) + 1-2 ppm (1-2 ppm = 1-2 mm/km). Noggrannheten i höjd är ungefär 1,5-2 gånger sämre.

Figur 10 och 11 är tagna från en test av RTK-teknikens kapacitet, som utfördes i november 2003. Den visar hur RTK-positionen varierar med tiden i östlig respektive nordlig komponent. Under mätningens gång var det mellan sju och tio satelliter. Avvikelsen från kända koordinater är som mest ca 2 cm i plan.



Figur 10: RTK-positionens variation med tiden i den östliga komponenten.

Variation Norr, 2 timmar



Figur 11: RTK-positionens variation med tiden i den nordliga komponenten.

Vid RTK-mätning används antingen en lokal referensstation eller en RTK-tjänst. För närvarande (2003) finns ingen rikstäckande RTK-tjänst, men det finns planer för en delvis rikstäckande tjänst. I dagsläget finns det tre regioner med så kallad Nätverks-RTK (se avsnitt 6.2.4 och 8.1.2): Skåne, västra delen av Götaland och ett område runt Mälaren med Gävle i norr, Mjölby i söder och Karlstad i väst. Alla dessa tjänster bygger på SWEPOS (se avsnitt 8.1.1) och i dagsläget används GSM som radiolänk.

När man använder sig av en lokal referensstation betyder det att man måste ha tillgång till minst två RTK-utrustningar. Alltså måste man sätta upp en egen referensstation och använda sig av en egen datalänk för överföring av korrektioner. Det största bekymret med detta brukar vara radiolänken (se nedan).

Räckvidden för denna brukar sättas till max 10 km, beroende på att beräkningsalgoritmen inte klarar så mycket längre avstånd.

Någon slags radio (modem, FM-nätet, GSM) används som datalänk. Det är av största vikt att utrustningen är fältmässig, dvs. att den inte är otymplig och att den klarar extrema väderförhållande etc. Om man tänker använda sig av en effekt högre än 0,5 W måste man ansöka om tillstånd för detta hos Post- och Telestyrelsen. Utrustningen ska också använda sig av en godkänd frekvens. Eftersom effekten spelar in på hur långt ifrån referensstationen man kan mäta är detta viktigt. Alltså ger hög effekt ökad räckvidd, vilket också en bra antenn gör. Radioutrustningen är också terrängberoende. Sändaren ska stå högt, absolut inte nere i en dal.

Standardformatet RTCM version 2.3 inkluderar även RTK-korrekationer och bärvågsrådata.

6.2.4 Nätverks-RTK

Nätverks-RTK innebär, liksom Nätverks-DGPS, att korrekationer erhålls som baseras på data från flera referensstationer. Skillnaden mellan Nätverks-RTK och Nätverks-DGPS är i första hand noggrannheten, som är betydligt högre för Nätverks-RTK och på ungefär samma nivå som vanlig RTK. Med hjälp av de många referensstationerna interpoleras en atmosfärsmodell fram, som gör att det går att få en bra position på betydligt längre avstånd än med vanlig RTK. Dessutom blir positionen säkrare i och med att många referensstationer bidrar.

Nätverks-RTK har en mängd fördelar jämfört med enkelstations-RTK:

- Endast en avancerad mottagare behövs för att få centimeternoggrannhet (istället för två).
- Ingen referensstation behöver etableras dagligen och förses med korrekta koordinater. Samma sak gäller om mätning skall utföras i ett annat område under dagen, då referensstationen normalt sett skulle behöva flyttas.
- Det finns en stöldrisk för referensstationen. Men när Nätverks-RTK används behöver någon sådan inte vaktas, i och med att det är permanenta referensstationer som används.
- Täckningsarean blir sömlös.
- Det är möjligt att få kvalitetskontroll av de utsända GPS-data (från referensstationen) under själva mätningen.
- Kräver mindre personal och tid för mätning

6.2.5 Statisk mätning

Vid statisk mätning utnyttjas en förändrad satellitgeometri för att bestämma periodobekanta. För att satellitgeometrin ska hinna ändra sig tillräckligt mycket krävs en observationstid på minst 20 minuter. Långa baslinjer kräver längre observationstid, upp till ett dygn för att lösa periodobekanta och upp till flera dygn för att få en bra position på 500-1000 km.

Statisk mätning beräknas genom efterberäkning och är den positionsbestämningsmetod som är mest noggrann. Medelfelet är från några mm till några cm, beroende på observationstid, baslinjelängd och beräkningsalgoritmer.

Det finns en variant av statisk mätning med kortare observationstid, snabb statisk mätning. På 5-20 minuter kan baslinjer upp till ca 20 km bestämmas. Snabb statisk mätning utnyttjar liknade algoritmer som RTK för att bestämma periodobekanta. Noggrannheten blir dock inte lika hög som för "vanlig" statisk mätning.

6.3 Utrustning

Schematiskt är en GPS-mottagare uppbyggd av följande delar: antenn med förförstärkare, radiofrekvensdel, kraftaggregat, GPS-signalprocessor, mikroprocessor som styr registreringen av satellitsignalerna och utför bearbetningen i fält av erhållna observationsdata, kontrollenhet (tangentbord och display, eventuellt i en lös fältdator) samt dataregistreringsenhet. Mottagarmodellerna skiljer sig åt på några viktiga punkter där följande frågeställningar kan vara relevanta beroende på förväntade prestanda:

- Kan mottagaren utföra kodmätningar eller både kod- och bärvägsmätningar? Upplösning i kodmätningen?
- Arbetar den med en (L1) eller två (L1 och L2) frekvenser?
- Från hur många satelliter kan mottagaren samtidigt registrera signaler?
- Har den en kanal per satellit? Om inte, växlar någon eller några kanaler mellan olika satelliter?
- Kan mottagaren användas i såväl kinematiska som statiska tillämpningar?
- Kan mottagaren användas för RTK? Kan periodobekanta lösas när mottagaren är i rörelse?
- Finns ingångar för standardformatet RTCM?
- Hur bra är GPS antennen? Kan den ta emot en eller två frekvenser? Är den försedd med jordplan (se avsnitt 6.4)?
- Hur bra är signalbehandlingen? Ju bättre signalbehandlingen är i mottagaren, desto sämre GPS-antenn kan man använda sig av.

Ju bättre och noggrannare GPS-mottagare desto högre pris, dvs. noggrannhet kostar!

Nedan ges en översikt över vilken utrustning som krävs för olika noggrannheter. Kostnaderna är mycket grovt uppskattade.

Noggrannhet	Kostnad
20 m	1-3 000 kr.
5 m	3-4 000 kr.*
1 m	30-50 000 kr.*
1 dm	50-100 000 kr.(*)
1 cm (med RTK-tjänst)	100-200 000 kr.(*)
1 cm (utan RTK-tjänst)	200-400 000 kr.
* Kostnad för abonnemang tillkommer	

Figur 12: Olika noggrannhetsnivåer och kostnad för GPS-utrustning.

Noggrannhetsnivå	Utrustning
20 m	Den enklaste sortens mottagare utan tillbehör.
5 m	Samma utrustning som ovan, fast med ingång för DGPS-korrekationer (RTCM). Abonnemang på DGPS-tjänst tillkommer.
m	Mottagare som använder sig av bärvågsunderstödd kodmätning + DGPS-tjänst. Abonnemang på DGPS-tjänst tillkommer.
dm	L1-bärvågsmätning. 2 mottagare eller mätning mot nationell (idag ej rikstäckande) RTK-tjänst. I det senare fallet tillkommer abonnemangskostnad.
cm	Mottagare som använder sig av L1-, L2-bärvågsmätning är ett måste. Om ingen RTK-tjänst utnyttjas måste man ha två mottagare. Abonnemangskostnad tillkommer vid användning av en RTK-tjänst.

6.4 Faktorer som påverkar resultatet

Utrustningen och använd positionsbestämningsmetod (absolut, DGPS, RTK, statisk..) har väldigt stor betydelse för noggrannheten. Noggrannheten kan variera från några mm till 20 m beroende på

detta. Antal satelliter, satellitgeometrin, mättiden och sikthinder påverkar både noggrannheten och tillförlitligheten.

Dessutom finns ett antal felkällor som påverkar.

De huvudsakliga felkällorna är:

- fel i satelliternas banbestämningar
- fel i tidsbestämningen mellan satellit och mottagare
- störningar från jonosfär och troposfär
- solaktivitet
- signalbrus
- flervägsfel (multipath).

De tre förstnämnda felen reduceras till största delen genom relativ mätning. Det fungerar för alla GPS-mottagare, även för de billigaste. Den kvarvarande delen från dessa felkällor uppges enligt olika fabrikanter vara i storleksordningen 1-10 ppm (mm per km) av avståndet mellan referensstationen och den rörliga mottagaren.

Utsända banddata (broadcast ephemeris), som finns med i satellitmeddelandet har medelfelet ungefär 3 m. Bättre predikterade banddata och efterberäknade banddata beräknas av ett antal beräkningscentrum knutna till IGS (International GPS Service), däribland CODE (Center of Orbit Determination in Europe vid universitetet i Bern). Banddata som är predikterade 48 timmar framåt i tiden finns tillgängliga samma dag på CODE eller SWEPOS ftp (swepos.lmv.lm.se). Utsända banddata kan användas utan problem för korta baslinjer, upp till 10 km. Så kallade IGS Ultra Rapid Orbits, som innehåller både efterberäknade och predikterade banddata, uppdateras två gånger per dygn med 3-15 timmars fördröjning och finns tillgängliga på IGS-ftp (igs.cb.jpl.nasa.gov).

Vid noggrann mätning (centimeternoggrannhet) mot SWEPOS där baslinjerna kan bli 100-200 km bör 48-timmars prediktioner (medelfel 0,5 m) eller bättre banor användas.

Det slutliga resultatet beror också på kvaliteten på transformationen om resultatet ska redovisas i annat system än det globala.

En stor felkälla är också flervägsfel, som uppkommer då satellit-signalen stöter på en reflekterande yta, t.ex. ett plåttak, en spegelvägg eller en spegelblank vattenyta, och studsar mot denna till GPS-antennen. Signalen går då en längre väg och resultatet blir fel. Oftast får man då samma signal från två olika håll, men det kan hända att signalen endast kommer från det felaktiga hållet på grund av att sikten är skymd mellan satelliten och antennen. Flervägsfel kan reduceras genom att man använder en anpassad antenn med jordplan (reflektion kan ej komma underifrån), samt genom signal- och databehandling.

7 Satellittillgänglighet

För att kunna mäta behöver man i teorin tillgång till minst fyra satelliter, eftersom det finns fyra obekanta parametrar, nämligen de tre dimensionerna och klockfelet. GPS-systemet är utformat så att man ska ha kontakt med minst fyra GPS-satelliter hela dygnet runt, oavsett var man befinner sig på Jorden. Men för att få ett riktigt bra mätresultat behövs i praktiken tillgång till minst sex satelliter, vilket inte går att ha dygnet runt på hela jordklotet. Därför kan det vara bra att i förväg ta reda på hur satellitkonstellationen ser ut då mätningen ska utföras. Dessutom gäller garantin med fyra satelliter endast för öppna ytor. Därför kan det vara en stor fördel att ha lite extra satelliter så att man vet att man kommer att få ut en position även på platser utan fri horisont.

7.1 Satellitprognos

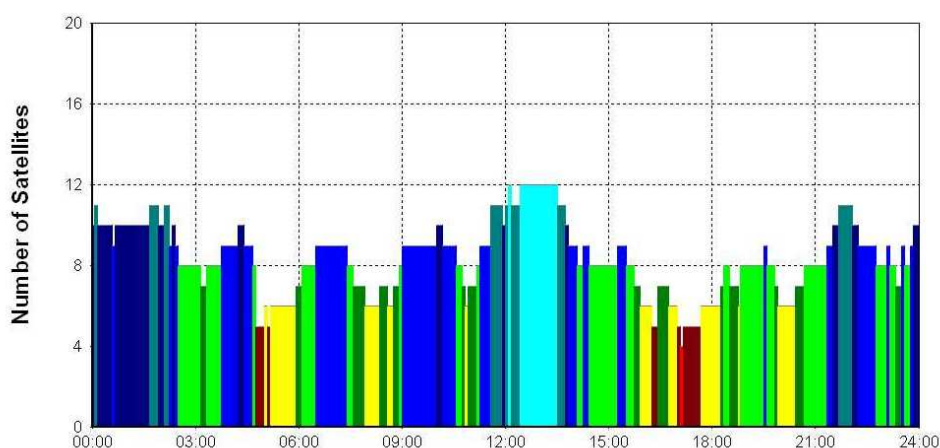
En satellitprognos visar tillgängliga satelliter vid olika tidpunkter. Med de flesta större (och även med några mindre) GPS-beräkningsprogram är det enkelt att göra en satellitprognos. Det kan vara av stor fördel att göra en sådan, så att man vet under vilka tider på dygnet det är mest lämpligt att mäta och under vilka tider man kan ta paus.

Det som är viktigt att tänka på när man gör en satellitprognos, är att GPS-almanackan man använder är ny (inte äldre än två veckor). Dessa almanackor blir fort gamla och är knappt användbara efter cirka två månader. En GPS-almanacka innehåller banparametrar och går att få från en GPS-mottagare eller via Internet.

I ett fåtal program fungerar detta även för GLONASS och en kombination av GPS och GLONASS. Idag går det även att göra en prognos online på ett antal ställen på Internet, t.ex. på <http://www.swepos.com>

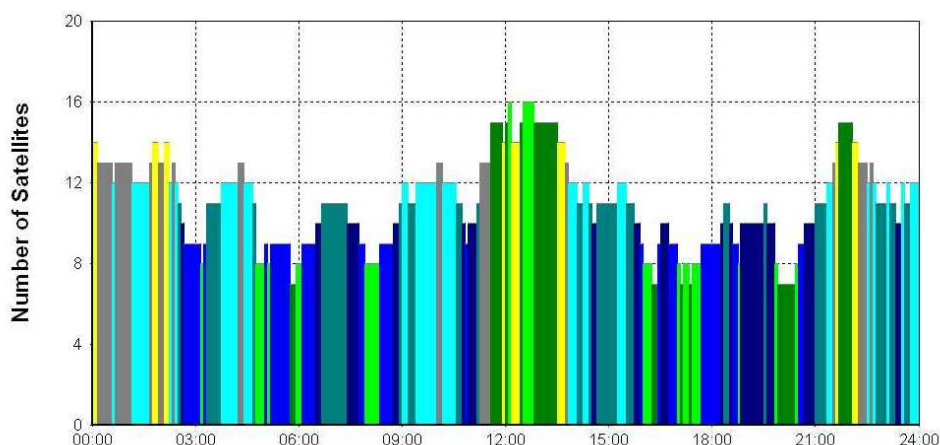
Ett exempel på satellitprognos finns i figur 13. Den visar antalet GPS-satelliter över 13 graders elevation i Gävle den 4 april 2003, då det totalt fanns tillgång till 27 satelliter. Som mest fanns det samtidigt 12 satelliter och som minst 4 satelliter. Observera att satellitkonstellationen flyttas "framåt i tiden" ca 4 minuter per dygn.

Best Visibility



Figur 13: Satellitprognos för GPS.

Best Visibility



Figur 14: Satellitprognos för GPS och GLONASS.

Figur 14 visar antalet GPS- och GLONASS-satelliter över 13 graders elevation i Gävle den 4 april 2003, då det totalt fanns tillgång till 27 GPS och 9 GLONASS-satelliter. Som mest fanns det samtidigt 16 satelliter och som minst till 7 satelliter. Som synes är GLONASS, trots att det finns få, till stor hjälp. Men man måste ha tillgång till minst två GLONASS-satelliter för att de ska vara till någon nytta, eftersom en satellit går åt till att beräkna tidsskillnaden mellan systemen. Observera att eftersom omloppstiden är olika för GPS och GLONASS, så återkommer inte samma satellitkonstellation varje dygn.

7.2 Signalkvalitet och satellitgeometri

För att positionen ska anges så bra som möjligt ska parametrarna signalkvalitet och satellitgeometri optimeras. Som framgår nedan säger de två parametrarna mot varandra. Därför brukar man som en kompromiss inte använda satelliter med lägre höjd över horisonten än ca 10 grader. Vinkeln för elevationsmasken kan användaren själv bestämma för de flesta mottagare.

Signalkvaliteten, kan vara dämpad eller störd av atmosfären eller miljön kring punkten och är sämre när satelliten går lågt över horisonten.

För att få en bra satellitgeometri är det bra att även ha med satelliter som går lågt över horisonten. Med bra satellitgeometri menas nämligen att satelliterna skall täcka så stor del av himlen som möjligt. Satellitgeometrin blir dålig t.ex. när man mäter invid en husvägg och bara satelliter från ett speciellt håll kan tas emot av mottagaren.

DOP-värdet (Dilution Of Precision) är ett mått på hur bra satellitgeometrin är. Ju lägre DOP-värde desto bättre satellitgeometri.

$$\sigma \text{ (medelfelet i positionen)} = \text{DOP} * \sigma_0 \text{ (mätmedelfelet)}$$

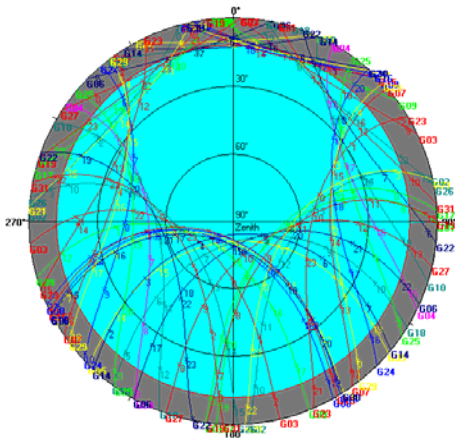
Det finns ett antal olika sorters DOP-värden:

- GDOP (= Geometric DOP) har att göra med fyra storheter: de tre dimensionerna + klockfelet. Är alltid störst av DOP-värdena.
- PDOP (= Position DOP) har att göra med de tre dimensionerna och är det DOP-värde man oftast använder sig av för att sätta någon gräns för vilken satellitgeometri man inte ska mäta vid.
- HDOP (= Horizontal DOP)
- VDOP (= Vertical DOP)
- TDOP (= Time DOP eller Temporal DOP (båda namnen förekommer i GPS-litteratur))

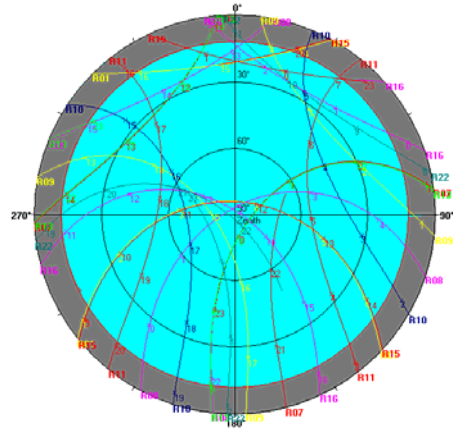
7.3 Sikthinder

Satellitpositioneringssystemen kräver fri sikt mellan satelliten och mottagarens antenn. Därför är det oftast svårare att göra GPS-mätningar (eller GLONASS-mätningar) på platser som inte har fri sikt åt alla håll uppåt. Invid de flesta vägar och järnvägar i Sverige växer det skog, vanligtvis barrskog, och därför kan det ibland vara svårt att få kontakt med tillräckligt många satelliter. Ju bredare gata

som är upphuggen i skogen, desto större chans har man att få kontakt med tillräckligt många satelliter. Med GPS satellit-konfiguration är det i Sverige (på höga nordliga latituder) viktigare att det är fritt söderut än norrut, eftersom de flesta satelliterna går där. Vidare är satellittäckningen sämre ju närmare polerna man kommer.



Figur 15:
Sky plot för GPS under ett dygn i Gävle. Som synes är det ett större hål på himlen som inte täcks av GPS jämfört med GLONASS.



Figur 16:
Sky plot för GLONASS under ett dygn i Gävle.

Löv- och barrskog uppför sig i vissa fall olika vid GPS-mätningen. Vanligen går inga satellitsignaler igenom lövträdskronorna, medan satellitsignalerna ofta går igenom barrträdskronorna, vilket medför att signalen i det fallet blir dämpad. Detta innebär att positionen har en tendens att bli sämre när man mäter i eller nära en barrskog (ju fuktigare, desto sämre). Så länge man har tillräckligt många satelliter med godtagbar signalkvalitet i eller nära en lövskog brukar positionen bli bra.

DGPS (0,5-2 m noggrannhet) störs betydligt mindre av träd än vad RTK (centimeternoggrannhet) gör. Detta innebär att när man mäter med DGPS är sikthindren ofta av underordnad betydelse, men för RTK är dessa en stor begränsning.

Hus räknas också som sikthinder. Men eftersom signalen inte kan ta sig genom dessa blir resultatet här att antalet satelliter minskar, medan kvaliteten på GPS-signalerna inte försämras.

8 Stödsystem

För att rationalisera relativ mätning kan man använda **stödsystem**, olika GPS-tjänster. Då behövs endast en mottagare, precis som vid absolut mätning. Tillkommer gör abonnemang och en radio-mottagare för att ta emot korrektioner om man vill mäta i realtid. Grunden i stödsystemen är **fasta referensstationer** (permanenta stationer) som kontinuerligt mäter mot GPS-satelliterna. Det finns stödsystem för kod- och bärvågsmätning, som distribuerar data i realtid och för efterbearbetning.

I den enklaste formen av stödsystem används referensstationerna var för sig. Data från varje station distribueras i dess täckningsområde. Mer avancerade stödsystem använder sig av s.k. **nätverkslösningar**, som modellerar de olika felkällorna, framförallt atmosfärsfelen, ur data från ett antal stationer. Nätverkslösningar ger högre noggrannhet med samma punktavstånd och högre tillgänglighet än nät av enstaka fasta referensstationer. En del stödsystem använder satelliter för att distribuera korrektionerna. Dessa satelliter kan då också sända GPS-signaler eller motsvarande och på så vis ge användarna fler satelliter att mäta mot. Trenden för stödsystem går mot nätverkslösningar. Datadistribution via satellit används i flertalet internationella realtidstjänster.

Det finns lokala, nationella och internationella stödsystem. Nedan beskrivs exempel på nationella och internationella stödsystem. Ett exempel på ett lokalt stödsystem var nätet av fasta referensstationer för Öresundsbron.

8.1 Svenska stödsystem

De nationella (svenska) stödsystem som beskrivs här är allmänt tillgängliga. Förutom dessa finns även Luftfartsverkets och Försvarets egna nationella stödsystem.

8.1.1 SWEPOS



SWEPOS är en nationell tjänst, som består av 57 fasta referensstationer (21 fundamentstationer + 36 enkla stationer). Deras data kan användas för efterberäkning eller i realtid. För DGPS och RTK kan man få korrektioner i realtid från SWEPOS, via Epos, via Omnistar och via Nätverks-RTK (se vidare avsnitt 8.1.3, 8.2.1 och 8.1.2).

Figur 17: SWEPOS-station.

SWEPOS drivs av Lantmäteriet, men vid utformningen och finansieringen medverkade flera andra statliga verk och bolag (Banverket, Försvarmakten, Lantmäteriet, Luftfartsverket, SJ, Sjöfartsverket, Telia och Vägverket). Sedan år 2000 finansieras SWEPOS av anslag och användaravgifter.

SWEPOS har tre huvudsyften:

- tillhandahålla GPS-data för navigering, positionsbestämning och vetenskapliga ändamål
- realisera det nationella referenssystemet (SWEREF 99)
- övervaka GPS-systemets integritet.

SWEPOS blev driftklart för realtidstillämpningar på meternivå (DGPS) den 1 juli 1998. Genom efterbearbetning (av tvåfrekvens bärvågmätningar) kan centimeternoggrannhet erhållas.

För att få tillgång till SWEPOS-data för efterbearbetning krävs att man löser ett abonnemang. Data nås sedan via ftp. Information om abonnemangspriser och övrigt om SWEPOS finns på <http://www.swepos.com>.

8.1.2 Nätverks-RTK med SWEPOS

För att använda Nätverks-RTK behövs endast en RTK-utrustning. När Nätverks-RTK används i Sverige idag (november 2003) skickar den rörliga mottagaren (rovern) sin absolutposition via en GSM-länk till en programvara för Nätverks-RTK på SWEPOS driftledningscentral. Denna programvara beräknar då korrektioner för en så kallad virtuell referensstation, som skapas på rovers initiala absolutposition. Den virtuella referensstationen fungerar sedan som om en lokal referensstation var uppställd på den punkten. När GSM-förbindelsen kopplas ned och sedan kopplas upp igen, skapas en ny

virtuell referens-station. Tanken finns att man i framtiden ska kunna använda sig av FM DARC kombinerat med GSM, eftersom täckningen för FM-nätet är bättre än täckningen för GSM-nätet och det blir betydligt säkrare distribution för användaren.

8.1.3 Epos

Epos är en DGPS-tjänst (meternoggrannhet) som drivs av Cartesia. DGPS-korrekationer kommer från SWEPOS, där de först har kontrollerats på driftledningscentralen innan de skickas ut via Kaknästornet och RDS-kanalen på P3 och P4. Hela den proceduren tar mellan 2 och 5 sekunder.

8.1.4 Sjöfartsverkets DGPS-system

Sjöfartsverkets DGPS-tjänst består av 8 fasta referensstationer och utsändningen sker över befintliga radiofyrrar. Systemet följer internationellt fastställd standard. Tjänsten är avsedd för navigation i svenska farvatten. Det finns ingen garanterad täckning på land.

Noggrannheten är strax över 1 meter (95 %). Varje referensstation består av två separata referensmottagare (varav en är reserv) och sändare med gemensam sändarantenn.

Användare måste ha speciell radiomottagare (radiofyrrmottagare), men någon abonnemangsavgift tas inte ut eftersom abonnemanget bekostas av farledsavgifter.

8.2 Internationella stödsystem

Det finns även internationella stödsystem. Flertalet av dessa går inte bra att använda, framförallt i norra Sverige, eftersom de använder sig av geostationära satelliter vid utsändningen av data. Geostationära satelliter ligger i ekvatorsplanet och har en elevationsvinkel som understiger 15 ° norr om polcirkeln.

8.2.1 OmniSTAR och Landstar

OmniSTAR och Landstar är två internationella Nätverks-DGPS-tjänster som utnyttjar geostationära kommunikationssatelliter för distribution av DGPS-korrekationer. OmniSTAR drivs av företaget Fugro och Landstar av företaget Thales.

Båda systemen är globalt täckande men eftersom de använder sig av geostationära satelliter blir elevationsvinkeln till kommunikations-satelliterna låg nära polerna (15 ° vid polcirkeln), vilket försvårar mottagningen framförallt vid landtillämpningar på höga latituder. OmniSTAR bygger på ett antal europeiska referensstationer, varav SWEPOS-stationen Visby är en.

Att begagna sig av tjänsterna OmniSTAR och Landstar kostar ungefär lika mycket och kostnaden är något högre än för Epos-tjänsten.

Noggrannheten är angiven till 1-2,5 m (95 %).

8.2.2 EGNOS

EGNOS står för European Geostationary Navigation Overlay System och är ett europeiskt stödsystem, som sänder integritetsinformation, korrektionsdata och GPS-signal.

Även EGNOS använder sig av geostationära satelliter för utsändning. Liksom OmniSTAR och Landstar fungerar det därför inte så bra vid markytan på höga latituder.

EGNOS påbörjades 1996 och har befunnit sig i en testfas sedan i början av 1998. Denna testfas är snart slut och systemet beräknas bli driftklart under 2004. I Gävle invigdes den första markstationen för EGNOS i mars 2003.

USA:s motsvarighet heter WAAS, Wide Area Augumentation Service, och fungerar enligt samma princip. Japans motsvarighet heter MSAS. Tillsammans bildar EGNOS, WAAS och MSAS ett globalt system.

EGNOS kommer eventuellt att ingå i Galileo (se avsnitt 4.3).

8.2.3 IGS och EUREF

IGS (International GPS Service) och permanenta EUREF (EUROpean REference Frame) är stödsystem för efterbearbetning. IGS består av ca 200 stationer spridda över jorden (SWEPOS-stationerna Onsala och Kiruna ingår). Permanenta EUREF kan betraktas som en förtätning av IGS (där ingår ytterligare tre SWEPOS-stationer).

Båda tjänsterna tillhandahåller tvåfrekvens GPS-data för efterberäkning (30-sekundersintervall), banparametrar (både predikterade och efterberäknade), satellitklockkorrektioner, jordrotationsparametrar m.m.

Tjänsterna kan användas kostnadsfritt och bygger på att data från nationella referensstationer tillhandahålls gratis. Man kommer åt tjänsterna via FTP.(ftp://igs.ifag.de,ftp://igs.jpl.nasa.gov. Ban-

parametrar, satellitklockkorrektioner och jordrotations-parametrar finns även på SWEPOS anonym ftp: <ftp://www.swepos.com>.

9 Referenssystem

Positionsbestämning med satellitsystem ger primärt positioner i ett globalt system. GPS använder referenssystemet WGS 84 och ellipsoiden med samma namn, vilken nästan är identisk med GRS80-ellipsoiden. Sedan 1994 är WGS knutet till de internationella ITRF-systemen. I Sverige används idag (2003) SWEREF 99 som globalt system och även detta är knutet till ITRF via EUREF. SWEREF 99 är alltså en certifierad ETRS 89-lösning. Skillnaden mellan de olika ITRF-baserade systemen är några decimeter, vilket gör att de för de flesta praktiska tillämpningar kan betraktas som identiska. Man kan t.ex. kombinera referenskoordinater i SWEREF 99 med bandata i WGS 84 utan problem i de allra flesta praktiska tillämpningarna.

I allmänhet är det nödvändigt att transformera de positioner som erhålls ur GPS-observationerna till det nationella eller lokala referenssystem som används i den aktuella tillämpningen. Lantmäteriet, Vägverket och Banverket använder t.ex. RT 90 och RH 70, medan kommunerna ofta har egna mer eller mindre lokala referenssystem.

På <http://www.lantmateriet.se>, under "Geodesi och GPS" finns parametrar och formler för ett officiellt nationellt samband mellan SWEREF 99 och RT 90. För att konvertera höjder i SWEREF 99 till höjder i RH 70 används idag (2003) geoidkorrektionsmodellen SWEN01L. Även transformationsprogramvaror finns där.

10 Tillämpningar

Det finns en mängd olika användningsområden för satellitteknik. Några är:

- geodetisk mätning (t.ex. inmätning, utsättning och studier av jordskorpans rörelse)
- byggande och underhåll (t.ex. maskinguidning)
- GIS (t.ex. inmätning av fornlämningar med DGPS)
- fordonslokalisering (t.ex. övervakning av farligt gods)

- räddningstjänst (t.ex. lokalisering av larm)
- fordonsnavigering (t.ex. bil- och båtnavigering)
- jord- och skogsbruk (t.ex. arealmätning och skördekartering)
- zoologi (t.ex. älgstudier och myggbekämpning).

10.1 Geodetisk mätning

Stommätning är den geodetiska tillämpning där GPS först visade sig vara konkurrenskraftig. All mätning av stornät med större punktavstånd än några km görs idag med GPS. Stommätning med GPS finns dokumenterat i Handbok till mätningsskuggörelsen, geodesi, GPS (se avsnitt 11). För stommätning används statisk eller snabbstatisk mätning.

Detaljmetning innebär både inmätning och utsättning. För utsättning använd någon reelltidsmetod, DGPS eller RTK. Även inmätning görs oftast med ovan nämnda metoder men kan även göras med efterberäkning.

För deformationsmätningar av t.ex. broar, dammanläggningar används ofta upprepade statiska mätningar. Permanenta kinematiska system finns också för detta ändamål.

GPS används t.ex. för att positionsbestämma (framförallt i höjd) gravimetriska mätningar.

Långa serier av statiska mätningar eller upprepade statiska mätningar kan användas för att studera rörelser i jordskorpan (SWEPOS används för att studera landhöjning och därmed förknippad landtöjning.).

Vid t.ex. väg- och järnvägsbyggnad används GPS för maskinguidning och maskinstyrning.

10.2 GIS

GPS är ett utmärkt hjälpmedel för att positionsbestämma objekt vid insamling av data till geografiska informationssystem (GIS) och kartdatabaser. Nyttan av det har varit stor, eftersom det inte var ekonomiskt möjligt att positionsbestämma enskilda objekt förut, när det inte fanns referenssystem.

Mätmetoden brukar vara DGPS, antingen i realtid eller med efterbearbetning.

Här följer några exempel på GIS-tillämpningar med GPS:

Inmätning av provytor i skog görs t.ex. av Sveriges Lantbruksuniversitet i Umeå. I deras fall gäller det riksskogstaxeringen och

metoden som används är DGPS med efterberäkning. Anledningen till att man inte gör inmätningen i realtid är att den ofta sker i Norrlands inland och i djupa dalar, där radiotäckningen inte är så god.

Inmätningar av fornlämningar görs t.ex. av Riksantikvarieämbetet. De använder DGPS med Epos, och får alltså ut positionen i realtid.

En hel del försök har gjorts att använda DGPS för att mäta in detaljer i orienteringskartor. Åtminstone en orienteringsklubb (Jönköpings OK) arbetar på detta sätt sedan flera år tillbaka.

Ajourhållningen av allmänna kartor görs numera med GPS. Man använder sig då av absolut mätning.

10.3 Navigation

Den största volymen av GPS-användning gäller navigation. Både DGPS och absolut mätning används. För privata syften till fjälls, i skogen (svampplockning m.m) och i fritidsbåtar används oftast absolut mätning. I yrkessjöfarten används DGPS, och då både Sjöfartsverkets DGPS-tjänst och EPOS (SWEPOS). GPS används i kombination med andra hjälpmedel för flygnavigation i Sverige.

Navigation av flygplan med hjälp av GPS används också vid t.ex. flygfotografering och kalkning av skog. Taxi och räddningstjänst använder GPS för att snabbt komma till rätt plats.

10.4 Jord- och skogsbruk

Inom jord- och skogsbruket används GPS, och då främst DGPS, för en mängd olika tillämpningar. Bland annat används DGPS för skogsvård och timmertransporter inom skogsbruket och för skördekartering och spridning av konstgödsel inom jordbruket. Likaså används DGPS för arealmätning av jordbruksmarker för EU-bidrag. DGPS med Epostjänsten gör det också lättare att ta markproverna för dosering av konstgödning på samma ställe varje år.

11 Referenser

- Berner, Christer Dokumentation från föredrag om Galileo på GPS/GNSS-seminariet, Gävle 18-19 Mar 2003.
- CGSIC LMV-rapport 1999:4. CIVIL GPS SERVICE INTERFACE COMMITTEE, INTERNATIONAL SUBCOMMITTEE, 7TH EUROPEAN MEETING, Gävle 3-4 Dec1998
- European Commission Global Satellite Navigation Service for Europe, broschyr 1999.
- Internet GLONASS:<http://www.rssi.ru/SFCSIC>
GPS:<http://www.navcen.uscg.gov/>
- Jonsson, Bo Kort introduktion till GPS. 1991. LMV-rapport 1991:4.
- Lantmäteriverket Handbok till Mätningenskungörelsen, Geodesi:GPS (HMK-Ge:GPS). 1996.
- McDonald, Keith D GPS Improvements in the next decade. ION Newsletter, Spring 1999.
- Radionavigeringsnämnden Radionavigeringsplanen för Sverige april 2000
- Radionavigeringsnämnden RNN-Bulletinen, mars 1999.
- SIS-STG Satellitbaserad positionsbestämning – GPS-Terminologi. Svensk standard SS 63 70 01.
- US DoD och DoT Federal Radio Navigation Plan 2001. (DoD= Department of Defence och DoT=Department of Transportation)

Bilaga 1: GPS-teknik, en liten ordlista

SATELLITSYSTEM

- GPS** *Global Positioning System.* Amerikanskt satellitbaserat navigationssystem uppbyggt av USA:s försvarsmakt. Systemet är globalt täckande och används för navigation, positionsbestämning och tidsöverföring för såväl civila som militära tillämpningar. Positionsbestämning med GPS bygger på att avstånden från minst 4 satelliter till mottagaren bestäms genom noggrann gångtidmätning. GPS blev operationellt för civilt bruk 1993 och består av 24 satelliter c:a 20 200 km över jordytan. Se vidare under GPS-policy. Inga användaravgifter.
- GLONASS** *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema.* Rysk motsvarighet till GPS. Både civilt och militärt tillgängligt. GLONASS hade under en kort period i början av 1996 full konstellation med 21+3 satelliter. Mars 2003 finns 9 satelliter. P.g.a. större inklinations av satellitbanorna har GLONASS lite bättre täckning på höga latituder än GPS. Inga användaravgifter.
- GNSS** *Global Navigation Satellite Systems.* En generell beteckning på satellitbaserade navigationssystem som inkluderar en eller flera satellitkonstellationer, mottagare, integritetssystem eller stödsystem.
- Galileo** Ett europeiskt framtida system som i grunden skall vara civilt. Befinner sig nu i utvecklingsfasen. Systemet planeras vara klart för driftsättning år 2008.

GPS-POLICY OCH SPECIFIKATIONER

Satellitsignalen	Satellitsignalen består av två bärvågor, L1 (1575.42 MHz) och L2 (1227.60 MHz), vilka är modulerade med koder (C/A- och P(Y)-kod) och ett satellitmeddelande. På L1 finns både C/A- och P(Y)-kod, på L2 endast P(Y)-kod. Satellitmeddelande innehåller information om satelliternas banor, klockkorrektioner, status mm. L2 är inte fullt tillgänglig för civila användare när P-koden är krypterad till Y-kod, däremot är tillgången till bärvågen på L2 garanterad för civilt bruk.
SPS	<i>Standard Positioning Service.</i> Civilt tillgänglig GPS-tjänst som ger positionsnoggrannheten 13 m horisontellt och 22 i höjd samt tidsnoggrannheten 40 nsek på 95%-nivån.
PPS	<i>Precise Positioning Service.</i> GPS-tjänst tillgänglig endast för auktoriserade användare (amerikanska försvaret och dess allierade) med hemlig positionsnoggrannhet.
SA	<i>Selective Availability.</i> Försämring av positionsnoggrannheten för en användare som endast har tillgång till SPS-tjänsten. SA aktiverades 1 juli 1991 och togs bort 1 maj 2000.
AS	<i>Anti-spoofing.</i> Kryptering av P-koden till Y-kod. Detta görs för att auktoriserade användare skall vara säkra på att det är en signal från en GPS-satellit och ingen falsk signal som de tar emot.
GPS-modernization	Program för vidareutveckling av GPS-systemet som gör systemet mer tillgängligt för civila användare. Genom att addera C/A-koden på L2 erhålls en andra civil frekvens, vilket kommer att vara implementerat på de satelliter som sänds upp från år 2004. En tredje civil frekvens på 1176.45 MHz kommer att finnas på satelliterna som skjuts upp från år 2005. Utöver nya frekvenser

diskuteras bl.a. militära signaler och funktioner samt fler satelliter.

MÄTMETODER

Kodmätning	Mätning på satellitsignalens C/A-kod (våglängd(λ) = 300 m) eller P-kod(λ = 30 m) som är modulerade på bärvågen. Kodmätning är enkel och går snabbt att utföra. Enkla billiga mottagare kan användas. Upplösningen i kodmätningen varierar mellan olika typer av mottagare från någon decimeter till några meter. Bärvågsunderstöd höjer noggrannheten, men kräver läsning till satellitsignalen under några minuter
Bärvågsmätning	Mätning på satellitsignalens bärvåg (λ_{L1} = 19 och λ_{L2} = 24 cm). Upplösningen i bärvågsmätningen är några mm. Periodobekanta måste bestämmas. Kräver mer avancerad mottagare och beräkningsrutiner. Känslig för signal avbrott.
Absolutpositionsbestämning	En position bestäms direkt i förhållande till satelliterna. Kan geometriskt beskrivas som en inbindning i rymden. Vanligen används kodmätning. Noggrannhet: se under SPS och PPS i föregående avsnitt.
DGPS	Differentiell GPS. Relativ GPS-mätning, vanligen underförstås relativ kodmätning. Noggrannhet*: 0.3-5 m. För att få högsta noggrannhet krävs bärvågsunderstödd kodmätning med noggrann upplösning på koden.
Statisk mätning	Underförstått statisk relativ bärvågsmätning. Stillastående mätning under längre tid (20 min - flera dygn). Noggrannhet*: 5-20 mm. Baslinjer mätta på detta sätt bestäms vanligen genom efterbearbetning. Baslinjer upp till flera tusen km kan bestämmas med denna metod (för dessa avstånd krävs dock avancerade beräkningsrutiner).

- Snabb statisk mätning** Variant av statisk mätning med kortare observationstid (5-20 min). Fungerar på avstånd upp till 15-20 km. Något lägre noggrannhet än vanlig statisk mätning. Särskilda metoder för bestämning av periodobekanta används.
- Kinematisk mätning** Mätning då GPS-mottagaren är i rörelse, ofta underförstås kinematisk relativ bärvågsmätning. Denna ger en noggrannhet* på 10-30 mm och fungerar (med algoritmerna i dagens mottagare) upp till 10-15 km. Periodobekanta bestäms genom en initialiseringsprocedur (mätning på känd baslinje, snabb statisk mätning eller under rörelse (**OTF** = On The Fly Ambiguity Resolution = "flygande bestämning av periodobekanta").
- Semikinematisk mätn.** Variant på kinematisk mätning för detaljmätning, där man stannar upp någon minut eller del av minut på varje punkt. Noggrannhet*: 10-20 mm för baslinjer upp till 10-15 km.
- RTK** *Real Time Kinematic*. Kinematisk relativ bärvågsmätning i realtid. Radiokommunikation från referensen (bas) till den rörliga enheten (rover) behövs.

BEARBETNING AV GPS-DATA OCH FELKÄLLOR

Periodbortfall	”Hopp” på ett helt antal våglängder (perioder) i den annars kontinuerliga bärvågsmätningen, beroende på att mottagaren tappat faslösningen till bärvågen. Engelska: Cycle-slip.
Periodobekant	Okänt antal hela våglängder mellan satellit och mottagare vid bärvågsmätningens början. När periodobekanta fixerats till heltal erhålls en s.k. fix-lösning. Innan dess har man en flyt-lösning. Engelska: Ambiguity.
Flervägsfel	Fel beroende på interferens mellan radiovågor som färdats olika väg (direkt eller reflekterat) mellan sändaren (satelliten) och mottagaren. Påverkar både kod- och bärvågsmätning. Flervägsfel kan reduceras genom bättre antenner och/eller bättre signalbehandling. Engelska: Multipath.
Banfel	Brist i modellering av satellitbanorna. Påverkan på en baslinje vid relativ mätning är direkt proportionell mot felet i bandata och baslinjens längd: $(fel\ i\ baslinjen = fel\ i\ bandata * (baslinjens\ längd/avstånd\ till\ satelliten))$. Utsänd bandata har ett medelfel på 3-5 m och det finns efterberäknade bandata med medelfelet 5 cm.
Jonosfärsfel	Brister i modelleringen av jonosfären (den delen av atmosfären som kännetecknas av hög jontäthet - 50-1000 km över jordytan). Påverkan av jonosfären gör bärvågsmätningarna för korta och kodmätningarna för långa. Vid relativa mätningar innebär detta ett skalfel. Påvekan är dessutom beroende av signalens frekvens, vilket gör det möjligt att (nästan helt) eliminera effekten av jonosfären genom en s.k. jonosfärsfri linjärkombination av L1 och L2. Vid enfrekvensmätning kan jonosfärsfelet reduceras genom att använda en jonosfärsmodell.

Troposfärsfel	Brister i modelleringen av troposfären (lägre delen av atmosfären - upp till c: 40 km). Kod- och bärvågsmätningar påverkas på samma sätt och det finns inget frekvensberoende. Troposfärsfördröjningen ger upphov till dels ett ganska litet skalfel, dels ett relativt höjdfel som på längre avstånd (30-40 km och uppåt) vid ogynnsamma förhållanden kan uppgå till 1 dm. Troposfärsfördröjningen hanteras genom en standardmodell och i mer avancerade programvaror kan även s.k. troposfärsparametrar beräknas.
DOP	<i>Dilution of precision.</i> Det geometriska bidraget till osäkerheten i en positionsbestämning, ju större DOP-värde desto sämre noggrannhet. Olika DOP beroende på vad som löses ut, t.ex. PDOP (3D-koord.), HDOP (2D-koord.), GDOP (3D-koord.+tid).
Fixlösning	Även kallat heltalslösning. Resultat från utjämnning av data (dubbeldifferenser) från fasmätning på bärvågen, där antalet våglängder (periodobekanta) har fixerats till heltal.
Flytlösning	Även kallat flyttalslösning. Resultat från utjämnning av data (dubbeldifferenser) från fasmätning på bärvågen, där antalet våglängder (periodobekanta) ej har lösts på annat sätt än som flyttal.
Baslinje	Tredimensionell vektor mellan två punkter.