

Rapportserie: Geodesi och Geografiska informationssystem

Litteraturstudie om RTK-tekniken

ett samarbetsprojekt mellan

Banverket
Lantmäteriverket
Vägverket

Martin Lidberg

Gävle 1998

LANTMÄTERIVERKET



Rapporter i geodesi och geografiska informationssystem från Lantmäteriverket

- 1996:2 Lejonhufvud C & Wiklund P: Undersökning av semikinematisk GPS-mätning i realtid.
- 1996:5 Ammenberg P & Hansson K: The Compatibility of SWEPOS-data with GPS-Equipment available on the market.
- 1997:1 Östlund J: Metoder för ruttoptimering, en översikt.
- 1997:2 Becker J-M: Riksavvägningsarbeten i Sverige under perioden 1974-1995
- 1997:8 Rystedt S: Q-Vadis. Ett geografiskt informationssystem för regional planering och miljöövervakning
- 1997:12 Minör U: Generalisering av linjer i vektormiljö.
- 1997:13 Rydén A: Ajourhållning med SPOT-data. Ett förslag till digital revideringslinje
- 1997:14 Hertzberg M, Jansson S: Karteum på internet
- 1997:15 Låås P: Klassificering av myrar med satellitdata – en möjlighetsstudie för ett svenskt CORINE Land Cover
- 1997:16 Jonsson B: Geodetic applications of GPS
- 1997:17 Andersson U, Eriksson U: Kompatibilitet för olika GPS-utrustningar vid RTK-mätning mot SWEPOS
- 1997:18 Engfeldt A: Accuracy Studies of RTK Surveying at Long Distances
- 1997:19 Ohlsson L: Different Methods and Equipment for Determination of New Points Relative to the SWEPOS Stations - A Comparative Study
-

Förord

Syftet med föreliggande arbete har varit att studera vilken prestanda som kan förväntas av RTK-tekniken. Speciella frågor att belysa har varit:

- Vilka faktorer som påverkar noggrannheten. De hittills kända är antennval, flervägsfel och elektriska fält, utöver de traditionella som t.ex. centring. Finns fler?
- Vilka försök finns gjorda om detta och vad har de kommit fram till?
- Har någon utvecklat eller pågår utveckling av beräkningsalgoritmer som förbättrar noggrannheten?
- Har någon utvecklat program för dubbla referensstationer vid RTK-mätning? Hur förbättras i så fall noggrannhet och tillförlitlighet?
- Har någon undersökt problemet med hur hög solaktivitet påverkar RTK-mätning? Är det någon skillnad på bärvågsmätning och kodmätning eller realtidsmätning kontra statisk mätning?

Arbetet har utförts av Lantmäteriverket på uppdrag av och i samarbete med Vägverket och Banverket. En av anledningarna till studien är att egna praktiska försök inte givit så goda resultat som förväntats och som efterfrågas för vissa tillämpningar.

Då mycket forskningsresurser satsas på GPS området, finns det idag mycket material publicerat. Det är därför omöjligt att läsa allt och ge en komplett redogörelse av alla frågeställningar inom ämnesområdet. Angreppssättet för denna litteaturstudie om RTK-tekniken har istället varit att försöka besvara frågeställningarna ovan så bra som möjligt inom anvisad arbetstid.

Rapporten är i stort sett uppbyggd som korta referat av lästa artiklar och en sammanfattning på slutet.

Innehållsförteckning

1	Uttalanden om GPS	7
2	Flervägsfel	11
3	Interferens	17
4	Flera referensstationer	23
5	Solaktivitet	27
6	Kombinerad GPS/GLONASS RTK	31
7	Tillämpningar	35
8	Maskinstyrning	39
9	Sammanfattning	42

1 *Uttalanden om GPS*

Detta avsnitt har tagits med för att få en bedömning om vartåt utvecklingen inom GPS-området i stort är på väg.

Uttalanden hämtade från "GPS World Showcase" från december 1996

Günter Seber, prof. Hannover

Precis realtids kinematik, eller RTK, kommer att vara standardmätproceduren. Den avståndsberoende ökningen av mätfelen kommer att försvinna i nätkoncept med referensstationer. Existerande kontinuerligt observerande referensstationer kommer knytas ihop och tillhandahålla lägesberoende korrektionsmodeller tillsammans med noggranna GPS-data. Mobila "stand-alone" användare kommer att bestämma sin position med 1 cm noggrannhet i realtid över stora avstånd. Behovet av temporära referensstationer kommer att försvinna!

"GPS surveying box" kommer att dyka upp, och leverera 1 centimeter realtidspositioner överallt i det officiella referenssystemet. SAPOS är ett sådant system som startat 1 januari 1997 i Tyskland, och levererar data i RTCM v 2.1 format.

Günter tror på ökad användning av GPS/GLONASS produkter som kommer att stödjas av förbättrade programvaror med bättre "ambiguity-resolution" algoritmer med högre noggrannhet, tillförlitlighet och "robustness". Eftersom användaren kommer att efterfråga mer än bara koordinater, kommer tiden för "stand-alone" GPS el. GLONASS närma sig slutet, och GPS/GLONASS kommer att integreras i andra sensorsystem.

Vi får se fler steg mot 1 mm sensorn. Detta fordrar förbättrade modeller för flervägsfel, absolut antenn-fascentrum variationer, och troposfäreffekter. En nyckelfaktor kan vara införandet av regional realtids troposfärmodell baserad på tillgängliga meteorologidatanätverk.

Peter Daily, University of Leeds

Peter Daily är först euforisk över tillgången till GPS och GLONASS, och dess potential som navigationshjälpmedel. Som baksidor ser han att GPS och GLONASS är under militär kontroll och kommer så att förbli, samt att alla elektroniska navigationshjälpmedel är utsatta för interferens (störningar).

Tekniken för att hantera interferens förbättras dag för dag och sårbarheten kommer att minska. Han tror inte att ett enskilt land kommer att bekosta en civil efterföljare till GPS/GLONASS, men om regeringar är beredda att

samarbeta kan det Europeiska GNSS-2 bli ett första steg mot ett civilt kontrollerat "Global Navigation Satellite System".

Ronald Braff, MITRE Corporation

Differentiella GPS+GLONASS nät diskuteras: "En annan viktig milstolpe för differentiella system kommer att bli utvärdering av realtids flervägsfelreducerings (real-time multipath-mitigation) teknik för referens mottagare".

Han menar också att med en andra civil frekvens i GPS och borttagande av SA fås en kapacitet motsvarande CAT II landning (möjligen bortsett från integritets-reaktionstid).

Matt Higgins, Senior Surveyor, Queensland Dept. Of Natural Resources, Australia

Beskriver en tekniks utvecklingssteg, och menar att GPS har visat många tecken på mognad under 1996. Bl.a. med presidenttuttalandet om GPS i mars 1996. Möjligheten att hämta noggranna banddata via Internet från IGS efter bara några timmar nämns också.

Ett kärt ämne för honom själv är fokuseringen på nödvändigheten att förbättra höjdmätning med GPS. För framtiden ser han att planerade satellitbaserade mobiltelefonsystem (MSS-Mobile Satellite Systems) med tiotal upp till hundra satelliter som använder samma frekvensband som GPS och GLONASS (L-bandet) kan bli kapabla att stödja eller till och med ersätta GPS. Han spår därför att realtids centimeterposition som en "option" till mobiltelefonjänster inte är långt borta. (Om han menar att telefonen skall ta emot korrektionsdata för att mäta RTK med en GPS-mottagare, eller om telefonen skall fungera som ett navigationsinstrument och direkt bestämma sin position från MSS-satelliter framgår inte tydligt av artikeln.)

Paul A. Cross, Newcastle

Ställer frågan "Hur bra är de grundläggande GPS pseudoavstånds och fasobservationerna?" Fabrikanterna redovisar oftast brusnivån internt i mottagaren, medan det som egentligen behövs vid GPS-beräkning är "precisionen i skillnad mellan mätta och modellerade kvantiteter" - och vi är långt ifrån att ha modeller av klassen "en liten del av en millimeter".

Användare går mot kvalitetsinriktade snarare än metodinriktade specifikationer. Att beräkna kvalitén av GPS-resultat fordrar en riktig beskrivning av datakvalitén i realtid av alla de viktiga felkällorna - flervägsfel, atmosfär, banddata - vilket inte låter sig göras på ett tillfredsställande sätt idag. Problemet är konstaterat och han förväntar sig betydelsefulla framsteg de närmaste åren, så vi kan snart förvänta oss GPS produkter med kvalitetstal som vi verkligen kan lita på.

Referentens kommentar: Pågående arbete med att beräkna och eliminera flervägsfel i GPS-mottagarna, att beräkna och korrigera för störningar i troposfär och jonosfär, arbete med att uppskatta modeller över hur antenners elektriska centrum varierar med elevation och azimut, och arbete som syftar till "RTK-tjänster" med hjälp av glesa (punktavstånd om 50 km eller mer) nätverk av permanenta GPS-stationer bidrar alla till att öka kunskapen om olika felkällor i GPS-mätning och hur de kvantifieras. Detta tillsammans med kombinerad användning av GPS och GLONASS, vilket ger fler satelliter och därmed fler överbestämningar, bör avsevärt kunna förbättra möjligheten att beräkna tillförlitliga kvalitetstal framöver.

Randolph Ware, UNAVCO

Beskriver felkällor från atmosfär och troposfär. I GPS mätning (surveying) kan mm-precision erhållas om "wet-delay" är samma i olika riktningar. Om inte kommer precisionen att degraderas till cm-nivå. Detta är vanligt eftersom vattenånginnehållet är lika varierande som molnförekomsten.

Uttalanden hämtade från "GPS World Showcase" från december 1997

Flera uttalar sin oro över att GLONASS inte har så många satelliter operationella som man hoppas (15 st i december jämfört med 24 för en full konstellation), (Cannon, Jonsson). Detta gör att endast ett fåtal tillverkare tar risken att investera i GLONASS utveckling, vilket är olyckligt eftersom det finns ett tydligt behov.

Leonard W. Allen, U.S. Coast Guard, påpekar att forskare studerar RTK-mätning över långa avstånd (300-400 km). Om resultaten är lovande kan ett amerikanskt stödsystem för RTK-mätning visa sig genomförbart, vilket kan ge en noggrannhet om några cm med nationell täckning.

Flera personer uttalar sin oro över att GPS-frekvenserna är för dåligt skyddade. Bl.a. har risken för interferens från mobiltelefonsystem (MSS) som vill använda samma frekvensband som GPS och GLONASS blivit tydligt under 1997. Wolfgang Lechner, President Telematica, påpekar att det är och alltid kommer att vara osäkert att förlita sig på radionavigering som använder bara ett frekvensband.

Paul A. Cross tar upp svårigheterna för användare att jämföra olika RTK-utrustningar på marknaden, eftersom jämförbara uppgifter om deras kapacitet saknas. Det som behövs är en uppsättning väldefinierade standardtester för att få mått på noggrannhet och tillförlitlighet i mätresultaten, tid det tar att erhålla en position (tid för att bestämma periodobekanta) i ett antal standard-geometrier och kontrollerade yttre förhållanden, och möjlighet att bibehålla god RTK-lösning vid skymd sikt mot en del av satelliterna och under dåliga förhållanden beträffande flervägsfel. Sådana tester är inte lätta att utforma, och det är troligt att de kommer vara kontroversiella i början.

Arbetet kan lämpligen göras med stöd från stora internationella organisationer som ION eller FIG. (Problemställningen är vidarebefordrad till FIG kommission 5.)

2 Flervägsfel

Improvements in Real-time GPS Surveying Performance Using EVEREST™ Multipath Rejection Technology

och

Improvements in Code-Phase DGPS Performance of Trimble 4000 Series GPS Recivers with EVEREST™ Multipath Rejection Technology

Trimble Navigation, Surveying & Mapping division; 1996

Trimble marknadsför en teknologi för "multipath rejection" - flervägsfels eliminering" som de kallar Everest. Teknologin minskar effekten av flervägsfel, och tycks vara implementerad som en "digital signalbearbetnings-teknologi". Everest kan fås som en mjukvaru uppgradering även i en del äldre mottagare. I rapporten beskrivs inte hur teknologin fungerar, men det diskuteras att GPS-signalernas polarisation ändras vid reflektion, och att kodföljningsloopen (eng. "code tracking loop") kan eliminera reflexioner som gått längre än kodens bit längd (eng. "chip length", vilket är ca 300 m för C/A-koden).

Flervägsfel påverkar kod- och fasmätningar olika mycket (flera meter för kodmätning och några cm för fasmätning). Vid läsning av rapporterna fås intryck av att Everest eliminerar flervägsfel i både kod- och fasmätningar, men någon tydlig skrivning som stödjer slutsatsen är svårt att hitta.

Vetskapen om att de signaler/data som används i positionsbestämningsprogramvaran är fria från flervägsfel gör också att RTK-OTF-algoritmerna kan optimeras på ett sätt så att prestanda höjs. Enligt redovisade resultat ökar tillförlitligheten i initialisering vid RTK-mätning och antalet initialiseringar som tar lång tid minskar avsevärt (däremot ändras medeltalet bara lite).

Enligt uppgift finns liknande flervägsfelselimineringar långt framme även hos andra fabriker.

Determination of multipath errors by means of a GPS attitude Platform

D.Becker, K.H. Thiel; Institut für Navigation, Universität Stuttgart; SFB 228, High Precision Navigation 95

I artikeln redovisas att en testanordning för att generera kontrollerade flervägsfel har utvecklats tillsammans med programvara för att ta bort dessa artificiella flervägsfel.

Arbetet är gjort med tanke på GPS-plattformar för noggrann bestämning av attitydvinklar, där flervägsfel är en speciellt viktig felkälla. I rapporten ges en matematisk beskrivning över flervägsfel ur ett geometriskt perspektiv, vilket sedan används i programvaran för att ta bort dessa effekter.

Idén med en testanordning för att generera kontrollerade flervägsfel kan vara intressant vid undersökning av huruvida utrustning med algoritmer för att eliminera flervägsfel, fungerar på avsett sätt.

Enhanced Strobe Correlator Multipath Rejection for Code & Carrier

Lionel Garin, Jean-Michel Rousseau; Ashtech Inc.; ION-GPS 1997, Kansas City

I rapporten beskrivs en teknik för att ta bort/mildra effekten av flervägsfel i GPS-mätning. "Enhanced Strobe Correlator" tycks vara implementerad som en programrutin som förbättrar signalbehandlingen internt i GPS-mottagaren. Tekniken tycks påminna mycket om "Everest" från Trimble. För att fullständigt förstå hur tekniken fungerar bör läsaren ha mer kunskap om signalbehandling är referenten.

För högprecisions GPS sägs flervägsfel vara den största felkällan. Först beskrivs några andra metoder för att minska effekten av flervägsfel såsom Narrow Standard Correlator, Ashtech Edge Correlator och Ashtech Strobe Correlator. Ordet "correlator" kommer sig av att då en GPS-mottagare mäter på GPS-signalerna gör den det genom att jämföra inkommande signal från satelliten (via antenn och antennkabel) med en signal genererad i GPS-mottagare. Processen innebär alltså att de två signalerna skall korreleras.

Den beskrivna metoden minskar effekten av flervägsfel på både kodobservationer och fasobservationer. För kodmätning ges exempel på en reflekterad signal med halva amplituden jämfört med den direkta signalen. Detta kommer orsaka ett mätfel vars storlek beror av hur mycket den reflekterade signalen är fördröjd. En "standard correlator" kan ge upp till ca 80 m mätfel om fördröjningen är ca 220 m. En "narrow correlator" kan ge knappt 10 m mätfel för fördröjningar upp till ca 300 m (jfr C/A-kodens bit-längd). I den nya metoden har flervägsfelen ett känslighetsområde om ungefär 24 m och ger mätfel om ca 3.5m.

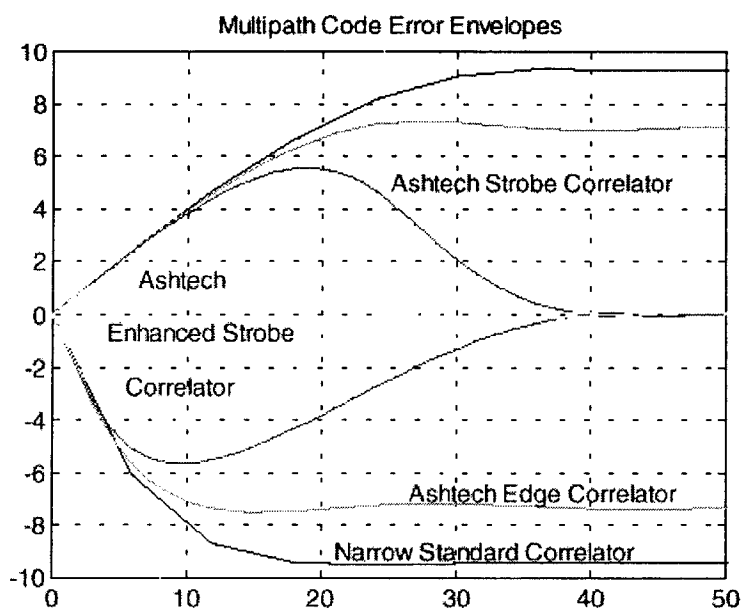


Fig. 1. Storleken av mätfel (vertikal axel (m)) orsakade av flervägsfel av olika storlek (horisontell axel (m)) för GPS mottagare med olika korrelationsmetoder.

För fasmätning redovisas maximala mätfel om ca 15 mm för alla korrelationsmetoder, men där den nya metoden inte är känslig för fördröjningar längre än 25 m.

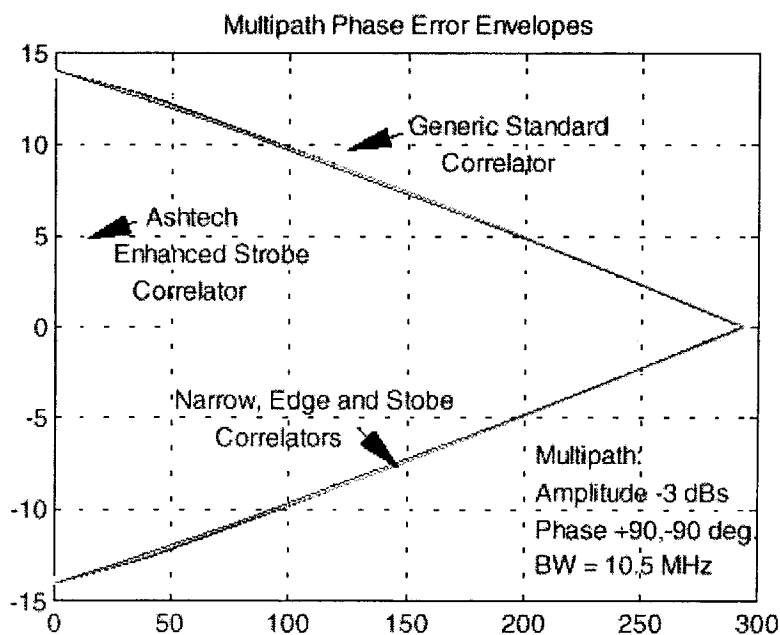


Fig. 2. Fel i fasmätning (vertikal axel (mm)) orsakad av flervägsfel (horisontell axel (m)) för GPS mottagare med olika korrelationsmetoder.

Fälttest

Resultat från ett försök redovisas där mätning gjorts 13.5 m från en 100x10m stor plåtvägg. Till en antenn kopplades två GPS-mottagare, en med och en utan "Enhanced Strobe Correlator". En referensstation placerades några 100 m bort.

För DGPS minskades 2D RMS fel från 1.84 till 0.55 m och maxfel från ca 8 m till 2.5 m med den nya tekniken. För bärvågsmätning (beräknat kinematiskt i efterhand) redovisas förbättring från ett RMS om 14 mm till 6.5 mm.

För RTK-mätning innebär det att noggrannheten ökar eftersom felen i bärvågsdata minskar, och eftersom C/A kodsmätningarna blir bättre kan söksområdet för att leta periodobekanta minska, vilket leder till snabbare och säkrare bestämning av periodobekanta.

För att få ut full nytta av de förbättringar som flervägsfels-borttagnings tekniken erbjuder, bör RTK-programmen justeras och anpassas efter förbättringen i observationsdata.

Att denna artikel beskrivits förhållandevis utförligt beror mera på att den var lättillgänglig snarare än att Ashtechs metod anses vara bättre än övriga tillverkares.

A multiple outlier Diagnostics Approach Towards Sub-Centimetre GNSS Kinematic Positioning

Yanming Feng; Space Centre for Satellite Navigation, Queensland University of Technology; KIS '97 Banff, Canada (pg 113 ff)

Artikeln beskriver hur datasnooping används för att hitta fel i enskilda bärvågsmätningar, och diskuterar hur små fel som går att upptäcka, och om detta räcker för att nå nivån +/- 1 cm.

Rapporten berör alltså hur stora fel detekteras och utesluts vid beräkningen, vilket är ett sätt att se vad som är möjligt att uppnå. Hur mätning, dattainsamling, mottagare och utrustning skall utformas för att mätningarna skall ha så små fel som möjligt berörs i stort sett inte.

Målet att kunna nå en noggrannhet om +/-1 cm visas i stort sett vara möjligt att uppnå. Ett problem kan vara att detektera och korrigera för små fel i enskilda mätningar av i storleksordningen 2 cm.

Anm. 1. Metoden bör kunna användas för att ge ett mått på hur stora felen måste vara för att de skall kunna upptäckas, och hur mycket ett sådant icke

upptäckt fel skulle påverka resultatet! (motsvarande inre och yttre tillförlitlighet i ett stomnät).

Anm. 2. Mapping funktionen, som beskriver hur mycket satellitsignalernas fördröjning i troposfären varierar med elevationen, är viktig om satelliter med låg elevation skall användas, vilket behövs för att få många mätningar och god geometri och kontrollerbarhet.

Multipel Antennas for Advanced GNSS Multipath Mitigation and Multipath Direction Finding

Dignus-Jan Moelker; Telecommunications and Traffic Control Systems Group, Delft University of Technology, The Netherlands; ION-GPS 1997, Kansas City

Flervägsfel är en av de viktigaste begränsningarna av noggrannheten i differentiell (eller relativ) GNSS. Detta gäller för kod- såväl som bärvågsmätning. Därför har reduktion av flervägsfel blivit extremt viktig, och många tekniker har föreslagits och studerats. Dessa kan i huvudsak klassificeras i tre grupper:

- reduktion före signalmottagning, t.ex. choke-ring antenner, antenner med speciellt anpassad känslighet, eller vald placering
- signalbehandling i mottagaren, t.ex. MEDLL (Multipath Estimating Delay Lock Loop), narrow-, edge- och strobe correlator teknik
- databehandling efter signalmottagning, t.ex. flera referensantenner och tekniker baserade på signal/brus-förhållanden.

I övrigt är artikeln ganska teoretisk. Framst beskrivs två metoder för att hitta riktningen av flervägsfel och för att eliminera flervägsfel med hjälp av flera antenner. Metoderna kallas "Multipath Phase Estimation" (MPE) och "Multiple Signal Classification" (MUSIC).

Multipath Mitigation, Benefits from using the Signal-to-Noise Ratio

Jean-Marie Sleewaegen; Royal Observatory of Belgium; ION-GPS 1997, Kansas City

Rapporten försöker ge en förståelse för vad signal-brus-förhållande (SNR) är, och hur det påverkas vid flervägsfel. Det visas att SNR följer flervägsfellets storlek mycket väl, speciellt för mottagare med s.k. "narrow correlator spacing" (noggrann C/A-kodsmätning), och alltså är ett bra mått på närvaron av flervägsfel.

En algoritm har också utvecklats för att ta bort flervägsfel ur mätningar från en permanent referensstation. Idén är att flervägsfelet i stort beror av var satelliten befinner sig, och alltså är lika efter ett dygn (justerat med 4 min). Genom att utnyttja detta antagande och att använda variationerna i SNR för att synkronisera när flervägsfelen uppträder i tiden, kan standardavvikelse i kodmätning reduceras med 65%.

New results about GPS multipath and RF jammers effects

*Ms Shahrzad Mahooti and René Jr. Landry
Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique de l'Espace*

Författarna har studerat hur flervägsfel påverkar signalbehandlingsprogramvaran inne i en GPS-mottagare. Dels redovisas en teoretisk analys av hur störningar från flervägsfel ser ut matematiskt, dels redovisas experiment som har genomförts med en Sextant GPS-mottagare kopplad till en GPS-simulator. Rapporten tycks förutsätta att läsaren är tämligen väl förtrogen med signalteori, vilket gör den lite svårt att förstå.

Intressant är dock att det tydligen går att behandla flervägsfel mjukvarumässigt inne i GPS-mottagarens programvara, och på så sätt minska dess effekt.

Fault Detection, Isolation and Correction in GPS/GLONASS Receivers

Dimitry Kinkulkin; Ashtech, Moscow Development Center; ION 1997, Kansas City

Rapporten beskriver nya algoritmer för att detektera och korrigera flera samtidiga fel vid GPS+GLONASS-mätning. Metoden tycks påminna mycket om data-snooping.

Metoden är egentligen generell för att detektera och identifiera grova fel, men eftersom grova fel i GPS/GLONASS-mätning oftast antas bero på flervägsfel, betraktas den som en "Multipath Mitigation Technique".

3 Interferens

Med interferens menas här att GPS-mottagaren, förutom att ta emot signaler från GPS-satelliter, tar in andra främmande signaler som blandas (interfererar) med GPS-signalerna. Dessa främmande signaler kan ibland helt förhindra GPS-mottagaren från att låsa på GPS-signalerna, eller försämra signal/brus-förhållandet så att kvaliteten på GPS-observationerna försämras.

GPS and GLONASS Radio Interference in Germany

Felix Butch; Institut of Navigation, University of Stuttgart; ION-GPS 1997, Kansas City

I början konstateras att GPS-mottagare som drivs kontinuerligt på en del Universitet i Tyskland ibland fungerat konstigt och tappat signallåsning till satelliterna utan synbar anledning. En möjlig anledning ansågs vara elektromagnetisk interferens. Därför har GPS och Glonass-mottagares känslighet för stör signaler undersökts. Fig 1 beskriver hur satellit-mottagarens signal-brusförhållande påverkas av stör signalens frekvens och effekt.

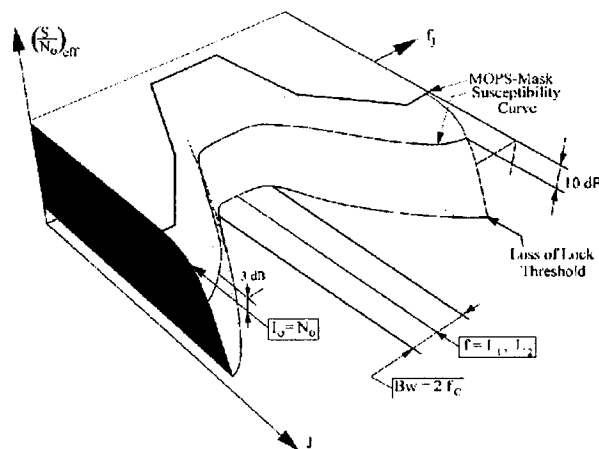


Fig. 3. Signal-brusförhållande (S/N_{eff}) kontra interferenssignalens effekt (J) och frekvens (f_j).

Känslighetsundersökning

En testbänk har ställts i ordning där satellit-signaler från en GPS/Glonass-antennen blandas med en störsignal från en signalgenerator innan den kombinerade signalen går in i den GPS eller Glonass-mottagare som skall testas. Genom att variera frekvens och effekt på signalgeneratoren kan man

ta reda på när mottagarens signal/brus-förhållande försämrats med visst värde, eller när mottagaren helt tappar signallåsning.

Då rapporten handlar mycket om störningar vid olika frekvenser etc. kan det vara på sin plats att repetera bärvågs-frekvenserna för GPS och GLONASS:

- GPS L1=1575.42 MHz
- GPS L2=1227.42 MHz
- GLONASS L1=1602+k*0.5625 MHz, där k är frekvensindex
- GLONASS L2=1246+k*0.4375 MHz, där k är frekvensindex

Frekvensindex, k , används för att identifiera satelliterna och kan ungefär jämföras med PRN-nummer för GPS-satelliterna.

Tabell 1 visar hur stor störsignalen kan vara på L1 frekvensen innan mottagaren förhindras att låsa på satellitsignalen (no Acquisition), resp. tappar signallåsning (Loss of Lock).

Tabell 1. Jämförelse av gränsvärde på störsignalens styrka (J) för olika GPS-mottagares möjlighet att låsa på GPS-signalen och då de tappar signallåsning.

GPS Receiver	no Acquisition for $J(L1) >$	Loss of Lock for $J(L1) >$
A-old	-107 dBm	-90 dBm
A-new	-104 dBm	-76 dBm
B	-108 dBm	-92 dBm
C	-109 dBm	-70 dBm
E	-120 dBm	-96 dBm

Anm. Tabell 1, fig. 2 och fig. 3 har tagits fram genom att låta en artificiell störsignal interferera med signalen från GPS-antennen innan den når GPS(/GLONASS)-mottagaren. En uppfattning om signalstyrkan från GPS kan fås från "GLOBAL POSITIONING SYSTEM STANDARD POSITIONING SERVICE SIGNAL SPECIFICATION, 2nd Edition". Satelliterna skall sända med sådan effekt att signalstyrkan vid jordytan är minst av storleken -160 dBw för L1 och -166 dBw för L2, vilket bör vara detsamma som -130 dBm resp. -136 dBm.

Under signallåsning är mottagaren mer känslig för störning än då den bara skall bibehålla låsningen. Detta beror på att mottagarens bandvidd måste vara större innan låsning, eftersom dopplerskiftet inte är riktigt känt då.

Fig 2 visar hur mycket störning som behövs för att försämra S/N på L1 med 10 dB för en gammal resp. nyare tvåfrekvensmottagare. Notera att en

störning nära L2-frekvensen också stör mottagningen på L1. Detta beror på dålig isolering mellan kanalerna för L1 och L2, d.v.s. att signalmottagningen på L1 också påverkas av ev. störningar på L2 frekvensen. .

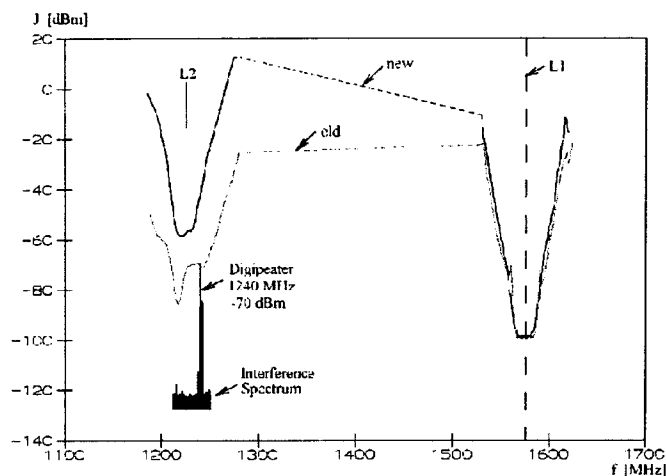


Fig. 4. Effekt för att försämra L1 signal/brusförhållande med 10 dB vid olika frekvens.

Fig 5 visar hur en kombinerad GPS/Glonass-mottagare påverkas av störningar.

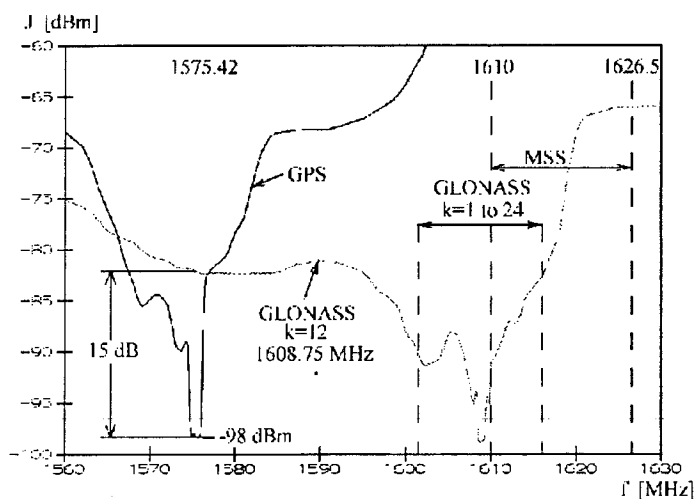


Fig. 5. Känslighetskurvor för en kombinerad GPS/GLONASS mottagare.

Detta innebär att en kombinerad mottagare kan ha en högre risk för interferens än vad två separata mottagare skulle ha.

För GLONASS-mottagare kan användningen av frekvensområdet mellan 1610 MHz och 1626.5 MHz av kommunikationssatelliter (MSS - mobile satellite system) bli störande. Idag använder GLONASS frekvensindex k=0 till

24, vilket innebär överlappning med MSS. GLONASS skall dock sluta att använda de högsta frekvenserna, och från 1998 skall k=12 (1608.75 MHz) vara den satellit som ligger närmast MSS-frekvenserna.

Anmärkningsvärt var att den provade GPS-GLONASS-mottagaren hade en minimal isolering om 7.5 dB mellan kanalen för k=12 och den lägsta MSS-frekvensen 1610 MHz.

Mätningar i fält

Under tester i fält i Tyskland hittades inga störkällor nära L1-bandet som orsakade allvarliga försämringar i mottagning. Däremot kunde mottagning av L1-signalen för L1/L2-mottagare vara försämrade p.g.a. störningar nära L2-bandet. Störkällan visade sig vara ett nät av amatörradio-stationer för digital datatrafik, s.k. Digipeaters, som i Tyskland använder frekvenser mellan 1240 MHz och 1243.25 MHz. Digipeaterlänkar i Europa visas i fig 6. I Sverige tycks frekvensbandet i närheten av 1240 MHz för närvarande inte användas för detta eller liknande ändamål, enligt en enklare undersökning.

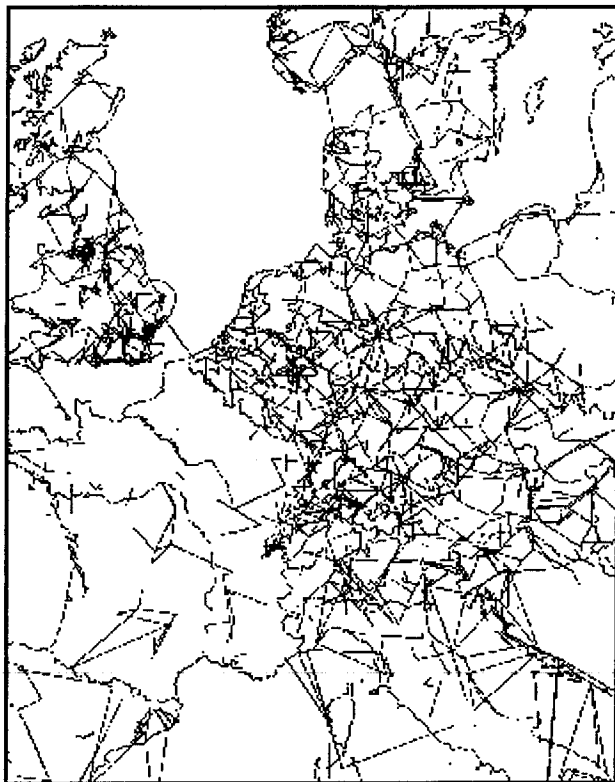


Fig. 6. Amatörradiolänkar i Europa

Ev. interferens från ATC-radar (air traffic control) diskuteras också. På några platser används frekvenser nära 1250 MHz. Radarpulserna repeteras med upp till 0.45 kHz och har en längd upp till 2 μ s med effekt om max 2.5 MW i topparna. Det är brukligt att GPS-mottagare har en inbyggd filtrerings- eller integrations-tid om i storleksordningen en databit (20 ms - kommer av navigations-meddelandets 50 bps) vilket gör att endast en liten andel av

C/A-kods eller P-kods chipen har påverkats. Därför kan effekten på signal/brus-förhållandet totalt försummas.

New Interference Rejection Technology from Leica

J.E. Maenpa, M. Balodis, G. Walter, J. Sandholzer; Leica GPS; ION-GPS 1997, Kansas City

Rapporten beskriver en ny teknik som skall förbättra förmågan att följa satelliter under svåra förhållanden avseende radio-interferens. En central del i förbättringen är ett nytt bandpassfilter som dämpar alla störande signaler utanför den 20 MHz bandvidd som behövs för att ta emot GPS P-kod, med åtminstone 50 dB.

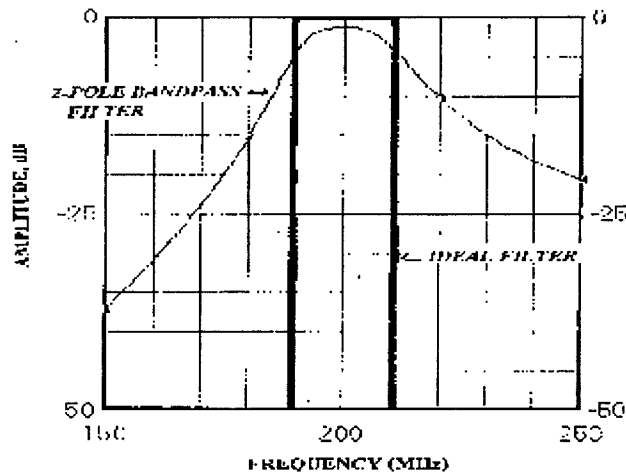


Fig. 7. Jämförelse mellan ett "2-pole bandpassfilter" som är vanliga i GPS-mottagare, och ett idealt filter.

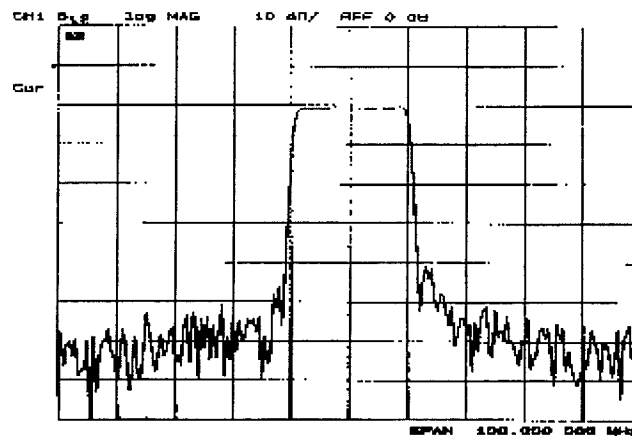


Fig. 8. Känslighet på L2 för Leicas nya filter.

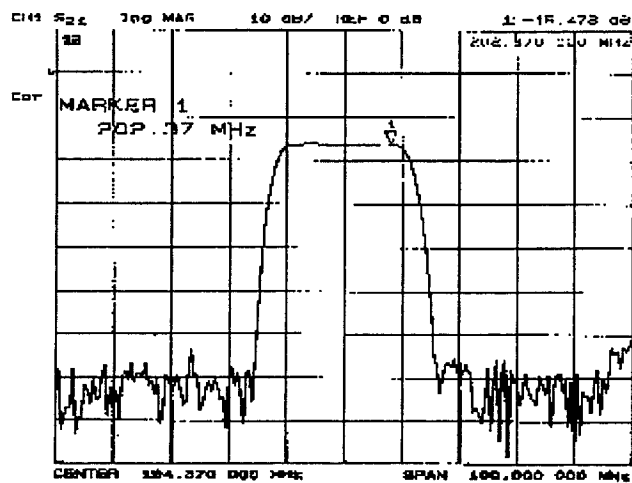


Fig. 9. Känslighet på L1 för Leicas nya filter.

Förbättringen tycks vara en mer eller mindre direkt reaktion på problemen med interferens från "digipeaters" i Tyskland.

4 Flera referensstationer

Det verkar som implementering av RTK mot flera referensstationer tenderar att göras utifrån ett nätverk av permanenta referensstationer, snarare än som att RTK-programvaran på rover-sidan själv skall hantera mätdata från flera referensstationer. Den första artikeln tycks vara ett undantag.

Dual Baseline Real-Time OTF Kinematic GPS

Dr. Dariusz Lapucha, Richard A. Baker; John E. Chance & Associates Inc.; ION-GPS 1996

I rapporten redovisas ett system för RTK med dubbla referensstationer. Systemet används i de två tillämpningarna FLI-MAP och Truck-MAP, där det första mäter digitala terrängmodeller och kraftledningarna med GPS och laser-scanner från helikopter, och det andra används för inmätning och inventering av vägar där bl.a. reflektorlös laseravståndsmätare och digital kamera används.

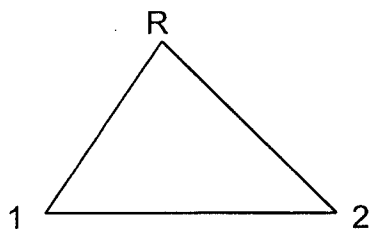


Fig. 10. RTK med dubbla referensstationer.

För överföring av data från referensstation till rover har en egen UHF telemetrielänk utvecklats där data från båda referensstationerna kan föras över på samma frekvens genom tidsdelnings multiplexing.

Från referensstationerna till rover skickas s.k. bärvågskorrekationer i stället för direkta observationsdata. Principen tycks vara densamma som för de bärvågskorrekationer som är specificerade i det standardiserade överföringsformatet för realtids GPS-data, RTCM. I artikeln beskrivs dessa bärvågskorrekationer och hur de används för att bilda dubbeldifferenser.

Konceptet med dubbla referensstationer ger möjlighet till kontroll genom att jämföra beräknade periodobekanta för RTK-lösning mellan 1 och rover (fig. 10), mellan 2 och rover, och mellan de två referensstationerna 1 och 2 för varje satellitpar. Positionen för rover beräknas som ett viktat medeltal mellan RTK-lösningarna $1 \rightarrow R$ och $2 \rightarrow R$, baserad på avståndet till referensstation, ålder på korrekationer och PDOP.

Resultat redovisas från ett test med rovern statisk under två timmar, och referensstationerna avstånden 14.8 resp. 17.1 km. Mätning har gjorts med elevationsmask 10° under en period med god satellittillgänglighet (6 - 8 satelliter). Ny oberoende OTF initialisering har gjorts varje 60 s. Medeltid för initialisering och andel rätt bestämda periodobekanta visas i tabell 2.

Tabell 2. Medeltid för initialisering och andel rätt bestämda periodobekanta.

	medeltid för initialisering (s)	andel riktiga initialiseringar (%)
14.8 km	78	91
17.1 km	83	87
DBOTF	92	96

Den längre initialiseringstiden med dubbla referensstationer (DBOTF) förklaras av att flera felkontroller görs så att en del felaktiga lösningar förkastas, vilket också leder till högre andel riktiga initialiseringar.

Fig 11 visar positionsfel för rovern jämfört med dess kända koordinater. Resultatet på nivån några cm anses vara mycket tillfredställande.

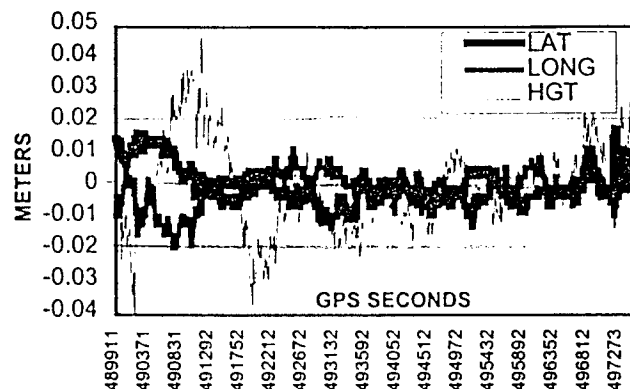


Fig. 11. Positionsfel från RTK med dubbla referensstationer.

Multiple User Network Carrier Phase Ambiguity Resolution

Capt. John Raquet; Department of Geomatics Engineering, University of Calgary; Proceedings KIS '97 (pg 45-55)

I artikeln redovisas tester där 4 st GPS-stationer på ett område om 150*100 km har använts som referens vid kinematisk bärvågsmätning. En metod som kallas "NetAdjust" konceptet har utvecklats och används vid utvärdering av de praktiska testerna. Stora förbättringar i tid för att hitta periodobekanta och andelen rätt bestämda periodobekanta kan påvisas jämfört med att bara använda den närmaste referensstationen. Med NetAdjust kon-

ceptet tar det ca 10 min att hitta periodobekanta vilket är ca 4 min mindre än utan. Periodobekanta på L1-frekvensen var rätt bestämda i 40% av fallen med NetAdjust jämfört med 30% om bara närmsta referensstation används, och för linjärkombinationen "wide laine" kunde 75 % av periodobekanta bestämmas rätt vilket är ca 5% mer än med bara närmsta referensstation.

Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks

Gerhard Wübbena, Andreas Bagge, Geo++; Günter Seeber, Universität Hannover; Peter Hankemeier, Vermessungsamt Hamburg; ION - GPS 1996

Artikeln beskriver ett koncept för hur RTK kan implementeras i ett nät av permanenta referensstationer, om avståndet mellan stationerna är upp till 70 km.

Konceptet bygger på att störningar på GPS-signalerna från framförallt banddata och jonosfär/troposfär varierar i tid och rum. Genom att bygga upp och använda ett nät av flera fasta referensstationer kan dessa variationer modelleras och påföras som korrektioner till GPS-observationerna. Korrektionerna är olika på olika platser men genom att användarens position är känt ungefär (100m från GPS-SPS) kan tillräckligt bra korrektioner beräknas.

För att kunna distribuera RTK-data från referensstationsnätet har ett eget dataformat tagits fram. Det är en packad version av RTCM-SC 104 version 2.1 typ 20 och 21 (kod och bärvågs **korrektioner**). Tillsammans med nätmodell parametrar skall 2400 bit/s räcka för att föra över RTK-data med 1s uppdateringsintervall.

I rapporten sägs en hel del i övrigt om GPS, och resultat från en kampanj där RTK-näts konceptet provats redovisas.

Den teoretiska brusnivån i RTK tillämpningar är under 1 mm. Avståndsberoende fel som refraktion i atmosfären och banfel begränsar noggrannheten till mellan 1 och 10 ppm. Dessa fel kan tas om hand i en nätverkskonfiguration. Däremot kan fel som variation i antennernas elektriska centrum (på mm-nivån enl. rapporten) och flervägsfel inte lösas av ett nätverk. De är olika för olika referensstationer, men kan kalibreras och delvis korrigeras för. (Liknande fel vid rovern nämns inte - referentens anm.)

Test kampanjen är gjord med en referensstation i mitten och tre st runt om på ett område ca 40 *40 km. Inmätning har sedan gjorts på kända punkter på 0.5 till 23 km avstånd från den mittersta referensstationen. Huruvida de redovisade resultaten kommer från enskilda mätepoker eller från någon sorts medeltalsbildning är lite otydligt.

Tiden för att lösa periodobekanta (TTFA - time to fix ambiguities) varierar från några få sekunder till 5 á 10 minuter. En regressionslinje för TTFA visar ungefär $1 \text{ min} + 100\text{s}/10\text{km}$.

Noggrannheten för RTK mot en referensstation sägs vara generellt bättre än 4 cm och för det mesta bättre än 2 cm. En beräknad regressionslinje för 3D standardavvikelse ger ett resultat om ungefär $1 \text{ cm} + 0.6 \text{ ppm}$. Efterberäkning av samma data visar på ett avståndsberoende om ca 1.4 ppm. Beräkning i efterhand, där data från alla fyra referenstationer använts för att simulera realtids RTK-nät, visar som förut på en 3D noggrannhet generellt bättre än 4 cm och för det mesta bättre än 2 cm, men där standardavvikelsen om 1 cm saknar avståndsberoende.

5 Solaktivitet

Inledande kapitel om jonosfär

Från kurspärm "GPS THEORY AND APPLICATIONS"; Gérard Lachapelle, M. Elisabeth Cannon; The University of Calgary; Stockholm 19-21 April 1995.

Aktiviteter vid solen har inverkan på hur GPS-signalerna störs då de passerar jonosfären på väg från satellit till GPS-mottagare. En hög solaktivitet ökar mängden fria elektroner i jonosfären, och det är dessa som stör GPS-signalerna.

Kodmätning och fasmätning fördröjs med samma belopp, men med olika tecken. Det innebär att koden fördröjs medan bärvågen går fortare genom jonosfären.

Fördröjningen är störst i närheten av ekvatorn, och kl 2 på em (lokal tid). Vid låg solaktivitet är då fördröjningen ca 3.5 m och vid hög solaktivitet är den ca 13 m. På höga latituder är den totala effekten mindre, men variationerna är mycket större.

De största problemen för GPS-mätning tycks orsakas av gradienter eller oregelbundenheter i jonosfären som ändras fort (eng. Ionospheric Scintillation). Fenomenet uppträder på höga latituder (Sverige tillhör området) och inträffar vanligen mellan solnedgång och midnatt då solaktiviteten är hög. Oregelbundenheternas påverkan på GPS-signalen ändras över tiden och varierar beroende på vilken del av jonosfären den passerar.

GPS-mätningar påverkas bl.a. gm. att mätningarna blir av lägre kvalitet, GPS-mottagaren kan tappa faslösning p.g.a. för mycket brus i mätdata (SNR-värdet (signal-to-noise ratio) blir för lågt), eller att signalfördröjningen ändras så mycket att fasens doppler-frekvens hamnar utanför mottagarens bandbredd (det frekvensområde där mottagaren klarar av att följa GPS-signalen).

GPS-signalens fördröjning i jonosfären beror av signalens frekvens. Genom att använda både L1 och L2 frekvensen kan effekten från jonosfär till stor del elimineras vid statisk mätning och beräkning av långa GPS-baslinjer.

Now it gets interesting: GPS and the Onset of Solar Cycle 23

Joseph M. Kuches; Space Environment Center, NOAA; ION-GPS 1997, Kansas City

Tillförlitliga noteringar om solaktivitet och solfläckar finns tillgängliga för de senaste nästan 300 åren. Data visar en klar periodicitet om ungefär 11 år, men också en stor variation i styrkan av varje enskild cykel.

Kedjan av omständigheter som i slutändan har en effekt på GPS börjar vid solen. Ett större antal solfläckar kan relateras till bl.a. "extreme ultraviolet (EUV) flux" och "Coronal Mass Ejections" (CMEs).

Nivån av EUV flux är orsaken till antalet fria elektroner i jonosfären. Antalet fria elektroner brukar uttryckas i "TEC-units" eller TECU (TEC = Total Electron Contents). En TEC unit är 1.0×10^{16} elektroner per m^2 . En meter fel i L1 frekvensen (1575.42 MHz) motsvaras av 6 TEC units. Den dagliga variationen vid solaktivitetsminimum är i storleksordningen 10 TEC units, medan den vid maximum kan närma sig 100 TEC units.

Coronal Mass Ejections orsakar instabilitet i jonosfären. Ibland ger CME upphov till stora s.k. geomagnetiska stormar som i sin tur orsakar konvektions-rörelser i jonosfären. Följden kan bl.a. bli stora gradienter i TEC, vilket gör det svårt att hantera störningarna på GPS-signalerna från jonosfären på ett bra sätt.

Under 1998 befinner vi oss mellan solfläckscykel 22 och 23 i en period med låg solaktivitet. Minimum i solfläcksaktivitet har uppskattats till någon gång mellan mars och maj 1996. Med data från de senaste fyra sol cyklerna (april 1954 till maj 1996) har aktiviteten under den kommande solcykel 23 predikterats.

Solfläckscykel 23 förväntas bli jämförbar eller något kraftigare än cykel 22, som var den 3:e största som noterats. Antalet stora geomagnetiska stormar antas ha ökat redan år 1999 för att nå maximum under 2002. Maximum för totala antalet geomagnetiska stormdagar antas inträffa under 2005. Medan de stora stormarna orsakas av CME, beror de mindre stormarna under solcykelns senare del snarare på hål i koronan. Här uppvisar stormfrekvensen en periodicitet om ca 27 dygn (solens rotationshastighet vid ekvatorn).

Artikeln kan tolkas som att solaktiviteten kan bli besvärande under perioden 1999-2005. Solaktiviteten gör att GPS-signalerna störs då de passerar jonosfären. De största störningarna kommer inträffa i början av perioden, medan det i slutet av perioden blir fler dagar med störningar men att dessa är mindre och inträffar regelbundet.

Huruvida den förhöjda solaktiviteten bara kommer att försämra prestanda i GPS-mätningarna eller om det kommer inträffa dagar då det inte går att mäta alls går inte att uttolka från artikeln.

Ionospheric Limitations and Specifications in the Auroral Zone

S. Skone, M.E. Cannon; Dep. of Geomatics Engineering, the University of Calgary; ION-GPS 1997, Kansas City

Författarna har studerat hur GPS-signalerna fördröjs i jonosfären genom att använda GPS-data från permanenta GPS-stationer och magnetfältsmätningar från magnetometerstationer i Kanada, och hur denna störning kan modelleras och korrigeras. I arbetet hänvisas mycket till WAAS (Wide Area Augmentation System) och de förutsättningar och krav som kommer däriifrån. Inriktning är främst mot kodmätning och långt mellan referensstationerna. Testdata är insamlade under "solar minimum conditions" under perioden april till oktober 1996.

Vid förhöjd jonosfärsaktivitet finns liten korrelation i mätfehlen mellan stationer på 600 km avstånd (de föreslagna 6³ avstånd mellan referensstationerna i WAAS). Det innebär att i åtminstone den s.k. "Auroral zone", i området mellan 65 och 72 graders magnetisk latitud, behöver referensstationerna vara tätare - 200 km nämns.

I artikeln berörs inte så mycket om det absoluta värdet för fördröjning i jonosfären, utan skillnaden mellan olika stationer studeras. Variationerna i fördröjningen mot en enskild satellit uppvisar ett RMS-värde om ca 2 dm + 0.2 ppm för snälla data och ca 2 dm större för "aktiva" data.

Den största skillnaden i TECU som beräknats ur datasetet är 0.058 TECU/km. Elektroninnehållet påverkar direkt GPS-signalens fördröjning. I det här fallet innebär det att fördröjningen skiljer ca 1m mellan två punkter 10 mil från varandra eller 1 dm om de ligger 10km från varandra.

Skillnaden i fel från jonosfären kommer att orsaka fel i en beräknad baslinje mellan stationerna av motsvarande storleksordning (såvida inte tvåfrekvensdata används för att ta hand om detta). En annan effekt kan bli att restfehlen till observation mot varje satellit, efter koordinatberäkning, blir större. Detta kan göra det svårare att bestämma periodobekanta vid RTK-mätning (referentens anmärkning).

Den största variationen över tiden är ungefär 0.09 TECU/*s, vilket motsvarar en förändring om ca 3 dm på 10 min, eller ≈ 0.8 m på 1 timma.

Uppskattningarna inför nästa solaktivitetsmaximum är mindre pessimistiska än i föregående rapport.

Uppmätta värden på variationerna i magnetisk fältstyrka från 1989 och 1996 har använts för att jämföra förhållandena vid max resp. min solaktivitet. En ökning med en faktor ≈ 1.5 vid max konstateras. Noggrannhetsnivåerna som redovisas antas öka i motsvarande grad. En ytterligare försämring med en faktor 2-3 (totalt 3 - 5) förväntas under perioder med starka geomagnetiska stormar.

Combined GPS and GLONASS Carrier Phase Positioning

David Walsh & Peter Daily; CAA Institute of Satellite Navigation, Departement of Electronic and Electrical Engineering, the Universitu of Leeds; KIS '97 Banff, Canada (pg 205-212)

Artikeln beskriver beräkning av bärvågsmätning med kombinerad GPS/GLONASS mottagare, och vilka speciella svårigheter som måste hanteras då GPS och GLONASS data blandas i beräkningen. Bl.a. berörs skillnader i koordinatsystem (WGS84 kontra PZ90), skillnader i tidsreferens mellan GPS och GLONASS (ett antal μ s), och hantering av fasmätning p.g.a. att varje GLONASS-sateliterna sänder på sin egen frekvens.

“Institute of Satellite Navigation” har utvecklat en egen enfrekvens (L1) 20-kanalig GPS/GLONASS mottagare som mäter på kod och bärvåg. Data från denna mottagare har använts i det arbete som redovisas i artikeln. Arbetet tar sikte på RTK för ingenjörsmätning där satellittillgängligheten ofta är begränsad.

Det påpekas att hastigheten med vilken periodobekanta kan bestämmas, och med vilken tillförlitlighet en korrekt lösning kan erhållas, är avgörande för om bärvågsmätning kan användas för ett speciellt ändamål.

Det redovisade arbetet bygger på singeldifferenser mellan mottagare, eftersom singeldifferenser erbjuder en mindre komplex metod för att kombinera observationer med olika frekvenser jämfört med dubbeldifferenser. Metoden innebär att skillnaden i klockfel mellan de båda mottagarna måste skattas för varje mätepok.

Praktiska resultat redovisas från mätning på noll-baslinje. Positionsfelet ligger hela tiden inom ± 4 mm, med de allra flesta fel mellan 0 och 2 mm. Detta ger en uppfattning om metodens möjligheten att bestämma periodobekanta, och om den högsta uppnåbara noggrannheten då alla yttre felkällor så som flervägsfel, antennfel, fel i bandata och störningar i atmosfären, har eliminerats.

Comparison of GPS and GPS+GLONASS Position Performance

T. Hall, B. Burke, M. Pratt, and P. Misra; Lincoln Laboratory, Massachusetts Institut of Technology; ION 1997 Kansas City

I rapporten redogörs för hur prestanda ökar vid kombinerad användning av GPS+GLONASS jämfört med bara GPS.

Speciellt intressant är förbättringen vid s.k. "Instantaneous Integer Ambiguity Resolution" eller bestämning av periodobekanta med bara en epoks mätning, där bara GPS L1 har 25% riktig lösning och GPS+GLONASS har träffsäkerhet på 99%.

GPS+GLONASS RTK - A Quantum Leap In RTK Performance

Dr.Frank van Diggelen, William Martin; Ashtech Inc.; Geomatics Info Magazine; November 1997

GPS and GPS+GLONASS RTK

Dr.Frank van Diggelen; Ashtech Inc.; ION-GPS 1997, Kansas City

RTK with GPS and GPS+GLONASS

Dr.Frank van Diggelen; Ashtech Inc.; Ashtech RTK seminarium i Gävle 1997-10-09

GPS+GLONASS surveying

William Martin, Jonathan Ladd; Ashtech Inc.; ION-GPS 1997, Kansas City

Alla fyra artiklarna beskriver RTK med Ashtechs kombinerade GPS+GLONASS mottagare GG24.

Det finns alltid en sannolikhet, skild från noll, att periodobekanta har blivit fel bestämda. I RTK-programvaran hanteras detta med en parameter för formell sannolikhet för att periodobekanta skall vara rätt bestämda. Här kan användaren välja mellan 95%, 99% och 99.9%. Vid högre sannolikhet (säkrare bestämning) tar initialiseringen längre tid.

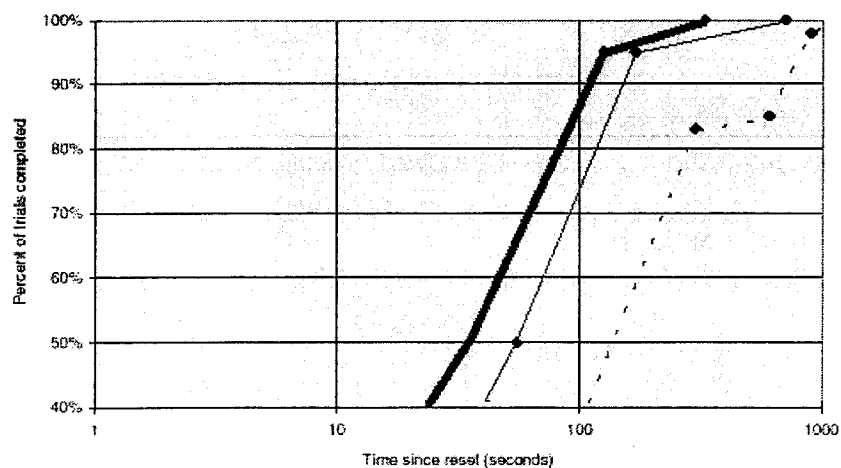


Fig. 12. Tvåfrekvens GPS RTK, tid för initialisering (bestämning av periodobekanta) på kort (<1km), medel (3-7km) och lång (19km) baslinje.

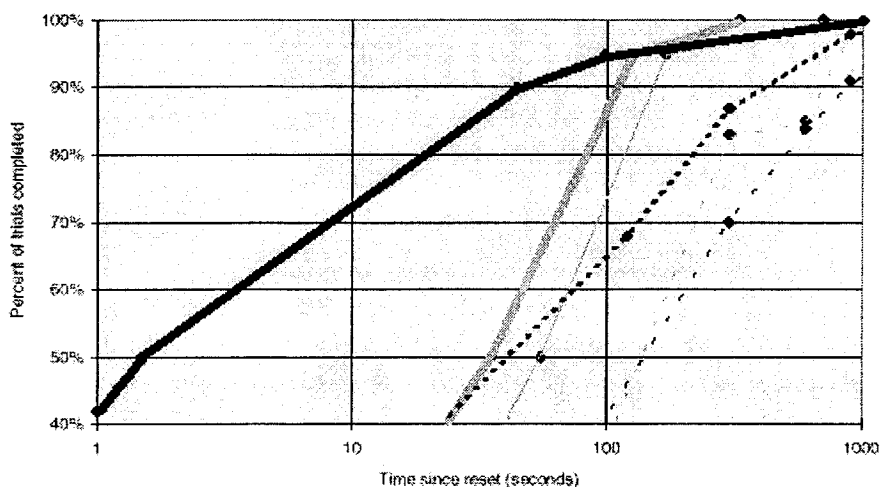


Fig. 13. GPS+GLONASS RTK, tid för initialisering (bestämning av periodobekanta) på kort (<1km), medel (3-7km) och lång (19km) baslinje. Resultat från enbart GPS är inlagda som jämförelse.

Figur 12 och 13 visar att vid korta avstånd mellan rörlig mottagare och referensstation går det alltså fortare att bestämma periodobekanta med en enfrekvens GPS+GLONASS utrustning, medan det på längre avstånd går fortast med tvåfrekvens GPS. Formell tillförlitlighet i fig 12 och 13 är 99%.

Tabell 3. Antal satelliter som behövs för RTK

	GPS+GLONASS-RTK	GPS-RTK
för att bestämma periodobekanta	7 (godtycklig kombination av GPS och GLONASS satelliter)	5
för att bibehålla fixlösning	4 (godtycklig kombination av GPS och GLONASS satelliter)	4

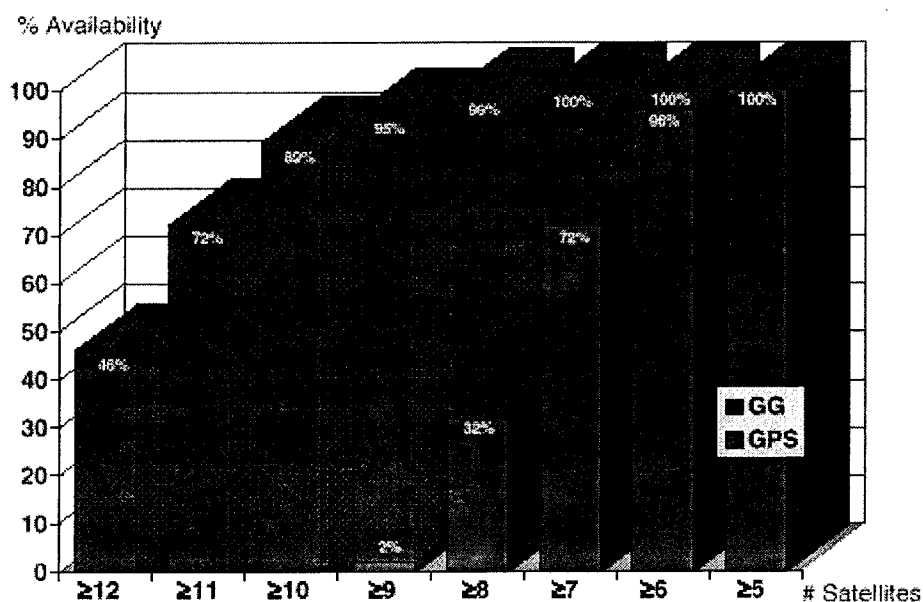


Fig. 14. Satellittillgänglighet i Kansas City, September 1997.

Noggrannheten för RTK med GPS+GLONASS är lika eller något högre jämfört med tvåfrekvens GPS-RTK. Martin/Ladd redovisar medelfel i plan och höjd på 3.5 resp. 19 km för GPS och GPS+GLONASS RTK.

Tabell 4. Jämförelse av noggrannhet mellan GPS och GPS+GLONASS RTK.

avstånd (km)	GPS plan / höjd (cm)	GPS+GLONASS plan /höjd (cm)
3.5	0.7 / 1.1	0.7 / 1.0
19	1.4 / 2.6	1.4 / 1.8

Den något bättre noggrannheten för GPS+GLONASS uppges bero på bättre geometri p.g.a flera satelliter.

7 Tillämpningar

Kinematic GPS tests on rail-tracks

Margherita Fiani, Salvatore Troisi; Istituto di Geodesia, Topografia e Idrografia Istituto Universitario Navale, Napoli.

I artikeln säger man sig vara intresserade av att kunna monitorera "rail-car" som positionsbestäms med kinematisk GPS. Två testkampanjer redovisas från juli 1995 resp. januari 1996. Den första under för GPS gynnsamma förhållanden och den andra med mycket skymd sikt mot satelliterna.

Testerna är genomförda med två-frekvens GPS utrustning och bärvågsmätning. Ingen realtidsmätning tycks ha använts, utan all beräkning är gjord som efterbearbetning.

Det första försöket genomfördes under gynnsamma GPS-förhållanden på en 240 m lång sträcka, där fordonet stannades vid 13 st markerade punkter. Mätningar har gjorts med semi-kinematisk GPS (tycks vara gjord med statisk initialisering och bibehållen faslåsning under förflyttning), kinematisk mätning med statisk initialisering, och med kinematisk mätning med flygande bestämning av periodobekanta. Jämförande mätning har också gjorts med totalstation.

Syftet med försöken var att studera noggrannhet och ev. andra egenskaper i kinematisk GPS-mätning. Som referens för noggrannhetsstudierna skulle den semi-kinematiska metoden användas, eftersom denna ansågs ge högre noggrannhet än kinematisk GPS-mätning. Resultaten från de semi-kinematiska mätningarna gav dock anledning till att tvivla på dess kvalite, eftersom erhållna höjder varierade upp till 40 cm, vilket är uppenbart omöjligt för GPS-utrustning monterad på en vagn som går på järnvägsspåret. Motsvarande fel uppträder inte i de kinematiska GPS positionerna. För att få en bättre referens gjordes en del nya tester där även totalstationsmätningar utförts.

Resultaten är lite svåra att tolka, men följande kan sägas:

- tillförlitligheten från de kinematiska mätningarna är god, medan tillförlitligheten för de semi-kinematiska mätningarna är dålig
- stora skillnader i resultaten beroende på hur olika parametrar sätts i beräkningsprogramvaran, ex. beräkning med alla satelliter resp. med en satellit med mycket signalavbrott bortflaggad gav positionskillnader på 1 dm nivå
- skillnaden mellan semi-kinematisk och totalstationsmätning rörde sig om 1 cm nivån till skillnader om ca 8 cm i plan och höjd.

I det andra försöket kördes en "rail-car" med hastighet från ca 10 km/h till 40 km/h, på en ca 4.5 km lång sträcka med GPS-mottagare på fordonet och referensstation upp till 6 km bort. Resultatet var att det bara gick att fixera periodobekanta under några enstaka tillfällen på denna realistiska/ ogynnsamma sträcka.

Monitoring the Movements of Bridges by GPS

V Ashkenazi, A H Dodson, T More and G W Roberts; Institut of Engineering Surveying and Space Geodesy, The University of Nottingham; ION-GPS 1997, Kansas City

Vid korta baslinjer och låg dynamik är det möjligt att bestämma den rörliga mottagaren med en ungefärlig noggrannhet av mindre än 5 mm inom några sekunder efter att sökning av periodobekanta startat.

Försök har genomförts på tre olika broar.

Realtidsmonitoreringen av broar med kinematisk GPS genomfördes genom att placera enskilda GPS-antennor på strategiska punkter på brospann och pyloner. Referensstationen var placerad 1.5 km från bron.

Högsta uppnåbara noggrannhet testades genom att mäta en nollbaslinje kinematiskt, och sedan beräkna i programmet PNAV från Ashtech. Resultatet visar på en upplösning (i det här fallet hur mycket positionen varierar kring rätt värde) om ± 1 mm i plan och ± 3 mm i höjd.

Humber Bridge

Rörelser över 15 min redovisas.

I bronns längdriktning varierar uppmätta positioner ca ± 2 mm. Detta betraktas som mätbrus, och tas sedan som intäkt för att mätfelet i övriga komponenter är av samma storlek. I höjd är uppmätta rörelser av storleksordningen 15 cm, med en maximal rörelse om 40 cm. I tvärs-led är rörelsen ca 14 cm.

Ett försök gjordes också med två GPS-antennor fastsatta på bron ungefär 2 m från varandra. Vektorn mellan dessa antenner skall vara konstant även då bron rör sig. Vektorn tycks variera ca ± 5 mm i bronns längdriktning. Detta är ett resultat av det kombinerade bruset från de två GPS-antennerna medan positionsbruset i en antenn kan antas vara mindre.

Clifton Bridge

Här har bl.a ett liknande noggrannhetstest som ovan utförts med två choke ring antenner placerade på bron ca 2 m från varandra. Avvikelser i bronns

längdriktning är ± 2 mm, i tvärsled $\pm 2-5$ mm, medan vektorns höjdkomponent har en variation om ± 20 mm.

Centimetric GPS Navigation to the North Pole

T. Moore, G.W. Roberts; Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, the University of Nottingham, University Park, Nottingham, United Kingdom; ION-GPS 1997, Kansas City

Rapporten visar att forskning pågår för att kunna använda kinematisk bärvågsräkning med flygande bestämning av periodobekanta (OTF) över mycket stora avstånd.

Ett eget beräkningsprogram har utvecklats - Nottingham OTF software (NOTF) som tillåter användning av multipla referensstationer (MRS) vilket snabbar på sökning av periodobekanta och tillåter längre avstånd mellan referensstation och den rörliga GPS-mottagaren (rovern).

Test i England

Ett kinematiskt test utfördes med en GPS-mottagare placerad på en Van, en mottagare placerad på en punkt i Nottingham ca 9 km från rovern och 4 mottagare placerade i närheten av Oxford ungefär 134 km från den rörliga mottagaren. Alla mottagare var av tvåfrekvenstyp. Testet tycks vara utfört på ett flygfält och med hastigheter upp till 110 km/h.

Vid tre tillfällen har den rörliga GPS-antennen tagits bort från bilen och placerats statiskt på ett stativ. Stativ-punkten har bestämts genom snabbstatisk beräkning från punkten i Nottingham. Denna lösning användes sedan som referens för att bedöma noggrannheten i den kinematiska positionsberäkningen av rovern från stationen i Nottingham. Radiellt RMS värde för skillnaden mellan snabbstatisk bestämning och OTF-lösningen på kort håll beräknades till 0.025 m.

Kinematisk beräkning av rovern från stationerna vid Oxford jämfördes med beräkningen från Nottingham. Radiellt RMS för L1-lösning var 12 cm, medan den för wide lane lösning var 38 cm (anm: med L1-lösning menas antagligen att L1 och L2 används för att hitta periodobekanta, medan de färdiga koordinaterna sedan beräknas som L1 fixlösning). Båda lösningarna tycks ha ett systematiskt fel, vilket man visar beror på jonosfärsaktivitet och troposfärsfördröjning (det kinematiska beräkningsprogrammet tycks inte ta hand om dessa parametrar ännu). Arbete pågår vid institutionen om hur jonosfär och troposfär påverkar OTF.

Flygning till Nordpolen

Författaren har deltagit i en flygning från Thule på Grönland till Nordpolen, under vilken en GPS-mottagare varit monterad på flygplanet, och tre referens-mottagare placerade vid Thule flygbas. Med NOTF programmet har man sedan kunnat beräkna flygplanets position som en L1 fixlösning hela vägen till Nordpolen - ett avstånd om 1500 km. Noggrannheten kunde dock inte bedömas då det inte fanns något positioneringssystem med på flygplanet som gav motsvarande noggrannhet.

Using semi-kinematic GPS Techniques for establishing and densifying horizontal control networks in Egypt

Dr. Ahmed El-Mowafy, Dr. Mohamed El-Maghraby, Mohamed Issa; Dept. Of Public works, Faculty of engineering, Ain Shams University Cairo, Egypt; KIS '97 Banff, Canada (pg 65-76)

I artikeln beskrivs hur man provat semi-kinematisk mätning (stop-and-go) för att bestämma punkter i lägre ordningens stornät. Flygande bestämning av periodobekanta och realtidsmätning har inte använts, utan mätningarna har beräknats i efterhand. Mätningarna har utförts med två st 9 kanaliga en-frekvens Trimble 4000 SE GPS-mottagare. Avstånd 1-15 km från ref. stn.

Medelfel i plan för de semi-kinematiska mätningarna är ca 5 cm (jämfört med statisk GPS-mätning). Ingen skillnad i noggrannhet kunde konstateras mellan 2, 4, 6 och 10 min observationstid på punkten, men 4 min rekommenderas då det inte påverkar produktiviteten negativt. Den tid det tar att flytta mellan och ställa upp på de punkter som skall mätas in tycks vara så stor att 2 min extra mättid per punkt inte har någon betydelse för produktiviteten.

8 Maskinstyrning

Maskinstyrning och monitorering kan sägas vara en speciell typ av tillämpning, men har här fått en egen rubrik p.g.a. att det finns speciellt intresse för ämnet.

Antalet tillgängliga artiklar i ämnet har visat sig vara begränsat. En förklaring kan vara att maskinstyrning med GPS fortfarande befinner sig i sin linda, samtidigt som ämnet är kommersiellt mycket intressant. De som har gjort viktiga framsteg och är på väg att nå fram till färdiga produkter undviker att avslöja något för ev. konkurrenter.

High-Precision Application of GPS in the field of Real Time Equipment Positioning

Fran Zois Peyret, David Bétaille, Gaëtan Hintzy; Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Nantes - France; International Symposium on Automation & Robotics in Construction (ISARC); Pittsburg, 8-11 juni 1997

Författarna inriktar sig på att använda GPS-RTK för att bestämma höjden för en asfaltläggare. Typiska värden på noggrannhetskravet på höjdnivån sägs vara från \hat{u} 1 cm för det översta skiktet, till \hat{u} 3 cm för lägre skikt i väggkroppen.

En vägs ojämnheter i höjd definieras efter deras våglängd och amplitud. I Frankrike klassificeras våglängderna i:

- korta våglängder (0.7 - 2.8 m)
- medellånga våglängder (2.8 - 11.2 m)
- långa våglängder (11.2 - 44.8 m).

Vägens jämnhet kvantifieras med ett värde för varje våglängdsområde.

Till sitt förfogande har man en 160 m lång testbana formad som en ishockeyrink av betong med en I-balk överst, varpå det går en robotvagn, Sessyl, med en speciell plattform där den mätutrustning som skall provas kan placeras. Användbart hastighetsområde för Sessyl är 0.05 - 3.0 m/s, och då anses felen i den referensposition som fås för Sessyl vara inom ca 1 mm i höjd och 1 cm i plan.

Resultaten från ett antal tester för att studera kapaciteten i GPS-RTK avseende höjdkomponenten kan sammanfattas enligt nedan (Trimble 7400 MSi har använts):

- medelfel om ca 15 mm
- vertikala rörelser av plattformen på Sessyl har ingen påverkan på noggrannheten
- ingen signifikant skillnad i noggrannhet kan påvisas om avståndet till referensstationen är 100 m eller 4 km
- försök med att skymma satelliter visar att full noggrannhet erhålls omedelbart då mottagaren lyckats bestämma periodobekanta så att fixlösning erhålls
- initialiseringstiderna är mycket varierande men är i medeltal något längre på 4 km (90s) än på 120 m (64s) avstånd till referensstationen.

Fig 15 visar två typiska dataset insamlade under två 12 timmars perioder, vid samma klockslag, men med tre dagar emellan.

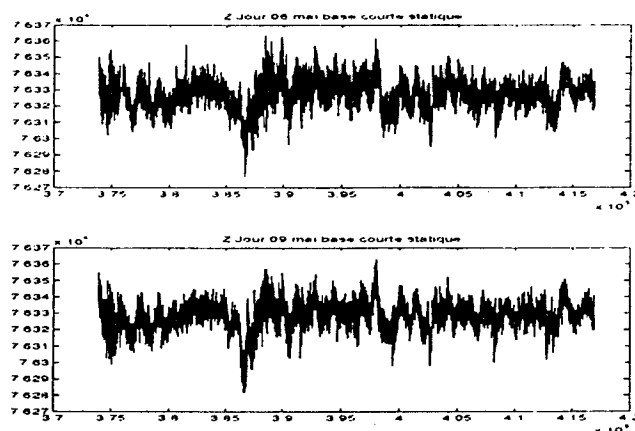


Fig. 15. Typiska RTK-data.

GPS-data visar variationer med våglängder och amplituder (\uparrow 25mm aktuell GPS-utrustning) som är exakt de samma som en vägs ojämnheter. Felen tycks vara grupperade med varaktighet om 30s till 10 min. Detta sägs motsvara våglängder om 1.5 till 50 m vid normal hastighet för asfältläggare.

Man har studerat hur stora felen är i olika frekvensområden genom spektralanalys. För frekvenser över 0.05 Hz (motsvarar period under 20s eller 1m för asfältläggaren) uppträder felen som osystematiskt brus med storlek under 5 mm, medan för frekvenser under 0.05 Hz (period längre än 20 s) uppvisar felen systematik eller drifter av storleksordning upp till några cm. Som förklaring till dessa fel nämns bl.a. flervägsfel. (Resultaten tyder på att felen på cm-nivå inte elimineras genom att medeltalsbilda RTK-positioner under en tidsperiod av storleken 20s.)

För att minska de långvågiga felen har författarna vid tester provat en metod, baserad på dubbla referensstationer, som i vissa gynnsamma fall kan halvera medelfelen i höjd.

Studiens syfte var att försöka svara på frågan "kan GPS användas för att reglera höjden på t.ex. en asfaltläggare". Trots de imponerande resultaten anses de råa positionerna från RTK-systemet inte räcka till. Försöken med att reducera de systematiska felen pekar mot att GPS-leverantörerna i en nära framtid bör kunna erbjuda utrustning som uppfyller noggrannhetskraven.

Practical use of the RTK Reference Chain System at Revetment Construction

Bo Værns Tomsen, Construction Department Per Aarsleff a/s; Surveying of Large Bridge and Tunnel Projects; FIG-Symposium, Copenhagen, Denmark; 2-5 juni 1997

Artikeln beskriver hur de permanenta RTK-stationerna vid Öresundsbro- (och tunnel-) bygget har använts vid arbetet med att bygga strandlinjer vid en nyanlaggd halvö vid Kastrup och runt den konstgjorda ön Pepparholm.

Arbetet har utförts med grävmaskin placerad på en stor flotte. För att maskinisten skall kunna se hur arbetet tar sig ut under vattnet, har ett positioneringssystem som ger koordinater på skopan, och visualiserings-system som på två bildskärmar visar skopans position i plan och höjd relativt färdig konstruktion enligt plan, tagits fram.

På grävmaskinen var placerade två st GPS-utrustningar som gav position och riktning. Dessutom användes ett rörelse-sensor system, kallat "XPM", som var specialiserat på att monitorera en skopa i änden av en grävmaskinsarm. XPM är baserat på 4 st vinkelgivare, en för varje led på armen och en för grävmaskinens vridning, samt en inclinometer (lutningsmätare) som mäter lutningen i maskinens längsled. Systemet ger en intern noggrannhet bättre än 0.1 m i tre dimensioner.

För att bestämma riktningen på grävmaskinsarmen hade man från början tänkt använda en digital gyrokompass. Denna fungerade dock inte p.g.a. för stora variationer i omgivningens magnetfält. I stället valdes alternativet med två GPS-mottagare, vilket blev betydligt dyrare, men som bedömdes som det mest säkra alternativet.

De interna koordinatdifferenserna på grävmaskinen kalibrerades genom att mäta in de fyra rörelse-sensorerna och GPS-antennerna med totalstation från tre oberoende uppställningar. En sådan kalibrering varade sedan i 3 - 4 månader innan den behövde göras om.

Systemet har fungerat mycket bra. Under någon begränsad period har dock systemet inte kunnat användas p.g.a. radiointerferens från landningsradar på Köpenhamns flygplats.

9 Sammanfattning

I arbetet har ca 30 artiklar studerats. Som sammanfattning görs ett försök att svara på de frågor som ställdes i inledningen.

Faktorer som påverkar noggrannheten

De i inledningen nämnda felkällorna som påverkar noggrannheten i RTK-mätning var antennval, flervägsfel och elektriska fält. Andra viktiga faktorer är variation i jonosfär och troposfär, vilkas påverkan också beror av avståndet till referensstationen. I studien har också framkommit att känsligheten för flervägsfel och interferens påverkas i hög grad av hur signalbehandlingen inuti GPS-mottagaren är konstruerad. På detta område bedrivs ett stort utvecklingsarbete av instrumentfabrikanterna.

Flervägsfel

Flera av artiklarna påpekar att flervägsfel är en av de viktigaste felkällorna för RTK-mätning. Sätten att reducera effekten av flervägsfel kan delas in i tre grupper:

- reduktion före signalmottagning, t.ex. choke-ring antenner
- signalbehandling i mottagaren
- databehandling efter signalmottagning, t.ex. flera referensantenner och tekniker baserade på signal/brus-förhållanden.

Då choke-ring antenner är otympliga vid RTK-mätning tycks det mesta arbetet i nuläget vara inriktat mot att ta bort flervägsfel genom signalbehandling.

Interferens

Interferens innebär att främmande signaler från någon sorts radiosändare blandas med GPS-signalen från satelliterna, vilket försämrar eller helt förhindrar mätning i GPS-mottagaren.

Satellitbaserade mobiltelefonsystem har noterats som ett möjligt interferencesproblem inom något/några år. I dagsläget tycks vissa markbaserade radiosändare, landningsradar på flygplatser, kraftledningar, ställverk och andra installationer som kan avge elektromagnetiska fält, vara de största källorna till interferens. Inverkan från interferens tycks bero mycket på lokala och tillfälliga omständigheter. Detta har gjort det svårt att hitta artiklar som entydigt beskriver var och när det går, resp. inte går att mäta.

Flera referensstationer

Det verkar som implementering av RTK mot flera referensstationer tenderar att göras utifrån ett nätverk av permanenta referensstationer, snarare än som att RTK-programvaran på rover-sidan själv skall hantera mätdata från flera referensstationer. Några undantag tycks dock finnas.

De studerade artiklar som behandlar flera referensstationer (3 st) tycks i huvudsak vara inriktade på tillförlitlig bestämning av periodobekanta på rimlig tid då det är glest mellan referensstationerna (50 - 100 km). Under dessa förutsättningar tycks angreppssättet vara framgångsrikt.

Solaktivitet

Två av de studerade artiklarna behandlar den förväntade förhöjningen av solaktivitet från ca år 2000 till år 2005. Artiklarna tycks vara olika pessimistiska om hur stor försämringen för GPS-mätning kommer att bli, men värdena 2 till 10 ggr större störning från jonosfären nämns.

En (förhoppningsvis rimlig) tolkning är att RTK-prestandan kommer att försämrats något under perioden. Det kan ta något längre tid att bestämma periodobekanta, och noggrannheten kan försämrats något. Praktiskt kan det innebära att avståndet till referensstation måste minskas något. Under enskilda dagar, med svåra geomagnetiska stormar som är vanligast i början av perioden, kan det ev. visa sig vara svårt att genomföra RTK-mätning över huvud taget.

Förbättrad noggrannhet

De flesta artiklar är inte inriktade på att redovisa speciellt hög noggrannhet i RTK-mätningarna. Resultat av i storleksordningen några cm (1σ ?) är vanligt. Ett undantag är artikeln "Monitoring of Movements of Bridges by GPS" där det hävdas att bronns rörelser kan monitoreras på några mm när.

I en artikel, inriktad mot maskinstyrning, har det analyserats hur felen i RTK-mätning varierar över tiden. Fel som förändras snabbt ($<20s$) är upp till 5 mm stora, medan de som förändras långsammare (periodtid $>20s$) kan uppgå till någon eller några cm. De snabba felen kan filtreras bort, medan de långsammare kan uppfattas som systematiska och är svårare att åtgärda.

Några artiklar beskriver förbättrade metoder för att detektera, lokalisera och korrigera för grova fel i bärvågsobservationer vid RTK-mätning. Detta torde vara av stor vikt för att i framtiden kunna få tillförlitliga kvalitetsmått för RTK-positionerna, samtidigt som noggrannheten höjs. Metoderna liknar i stort sett den "data snooping" som brukar användas vid beräkning av traditionellt mätta stomnät.

Slutord

I artikeln av David Walsh & Peter Daily påpekas att hastigheten med vilken periodobekanta kan bestämmas, och med vilken tillförlitlighet en korrekt lösning kan erhållas, är avgörande för om bärvågsmätning kan användas för ett speciellt ändamål.

Paul A. Cross ser ljusst på möjligheten att på ett bra sätt bedöma detta inom en nära framtid:

“Att beräkna kvalitén av GPS-resultat fordrar en riktig beskrivning av datakvalitén i realtid av alla de viktiga felkällorna - flervägsfel, atmosfär, banddata - vilket inte låter sig göras på ett tillfredsställande sätt idag (1998). Problemet är konstaterat och betydelsefulla framsteg kan förväntas de närmaste åren, så vi kan snart räkna med GPS produkter med kvalitetstal som vi verkligen kan lita på.”