

Från radioastronomi och kvasarar till geodynamik och meteorologi

Onsala rymdobservatorium började som ett vågutbredningslaboratorium för att senare fokusera verksamheten på radioastronomiska observationer. Idag är Onsala rymdobservatorium den svenska nationella anläggningen för radioastronomi och driver två teleskop på Råö, cirka 45 km söder om Göteborg. Forskare är också engagerade i att analysera data från den svenska Odin-satelliten, och observatoriet är "delägare" i APEX-teleskopet i Atacama-öknen i Chile, där observationer sker upp till frekvenser i terahertz-området.

Efter en generell inledning fokuserar vi i denna artikel på rymdgeodetiska tillämpningar, som uppstått ur den radioastronomiska grundforskningen, och som därefter producerat mätdata av intresse både för geofysikalisk och meteorologisk forskning.

Sedan den 1 januari 2005 är Onsala rymdobservatorium tillsammans med åtta forskargrupper organisatoriskt samlade på Chalmersinstitutionen Radio- och rymdvetenskap. Forskningen drivs av nyfikenheten av att lära sig mer om universum och vår egen jord. Genom att studera universums historia, och observera vad som händer på jorden idag, söker vi större förståelse för universums, jordens och livets uppkomst. Med hjälp av modeller försöker vi sedan att generalisera och identifiera möjliga scenarier som beskriver hur det kan komma att se ut i framtiden - både på jorden och i universum.

De mätningar vi utför sker med elektromagnetiska vågor i form av radio, infraröda eller optiska vågor. Mätningarna kan göras antingen från marken eller från satelliter i rymden. Passiva mätningar innebär att elektromagnetisk strålning från avlägsna galaxer, stjärnor eller från vår egen jord tas emot. Aktiva mätningar sker genom utsändning av elektromagnetiska vågor, t.ex. via radar i flygplan eller via navigations signaler från GPS-satelliter, där vi studerar vad som



Bild 1: Onsala rymdobservatorium. I mitten på bilden syns det radominneslutna 20-metersteleskopet, vilket huvudsakligen används för radioastronomisk forskning, där frekvenser upp till strax över 100 GHz tas emot med en god verkningsgrad. Teleskopet används också för geodetisk VLBI, då det samtidigt tar emot signaler från de mest avlägsna galaxerna vid frekvenser omkring 2,3 och 8,4 GHz (S- och X-band). I förgrunden till vänster står en mikrovågsradiometer, vars uppgift är att mäta den termiska strålningen från vår atmosfär, och utgående från dessa data kan mängden vattenånga och flytande vatten (moln) beräknas i mättriaktionen. GPS-antennen syns just till höger om radomen (se också Bild 3).

hänt med signalerna under färden, ibland efter reflektion mot olika objekt.

I flera projekt undersöker vi jordens hälsotillstånd genom mätningar av ämnen i atmosfären och rörelser i jordskorpan. Förändringar i atmosfärens sammansättning är fundamentala för att förstå vad som händer med den för vår överlevnad, så viktiga växthuseffekten.

Forskningsprojekten sker vanligtvis inom ramen för ett internationellt samarbete, och sedan tre år driver institutet också ett internationellt masterprogram, "Advanced Techniques in Radio Astronomy and Space Science", där all undervisning sker på engelska.

Rymdgeodesi med VLBI

Forskning inom rymdgeodesi startade vid observatoriet i slutet av 60-talet, med så kallade VLBI-mätningar. VLBI är en förkortning, som kommer från engelskans "Very-Long-Baseline Interferometry". På svenska skulle man kunna säga interferometri med användande av mycket långa avstånd (baslinjer). VLBI-tekniken bygger på samtidig mottagning av radiovågor från samma astronomiska källa med två eller flera radioteleskop. Tekniken kan användas dels för att bestämma strukturen hos astronomiska objekt med en mycket hög vinkelupplösning, dels för att bestämma geometrin mellan de i interferometern ingående antennerna. Man kan se det som att den fundamentala mätstorheten är skillnader i ankomsttid för signaler från avlägsna kvasarar med en mätosäkerhet av några pikosekunder (biljondels sekunder).

Den uppmätta skillnaden i ankomsttid bestäms naturligtvis av i vilken riktning teleskopen observerar. Den varierar också kontinuerligt på grund av jordens rotation. För att kunna bestämma avstånden mellan antennerna så noggrant som möjligt, får de observerade kvasarernas inbördes vinkelavstånd ej förändras. Det är fördelaktigt att utföra så många observationer som möjligt under cirka ett dygn. Man måste dock observera så pass länge mot varje kvasar, att dess signal framträder tydligt över allt det bakgrundsbrus från elektronik och atmosfär, som ej går att undvika. Den ideala kvasaren är därför stark inom det aktuella radioområdet, är punktformig och ändrar ej sitt inbördes läge i förhållande till de andra observerade kvasarerna. Det visar sig emellertid, att de allra starkaste kvasarerna ej är lämpliga observationsobjekt, eftersom de uppvisar strukturer, som

ger felbidrag till den uppmätta skillnaden i ankomsttid. Samtidigt är många av de mest punktformiga objekten alltför svaga för att ge noggranna mätningar. Det pågår en ständigt kartläggning av kvasarerna, eftersom deras struktur kan förändras över tidsskalor av månader och plötsligt göra dem olämpliga att använda som fixpunkter. Genom att observera ett antal kvasarer under flera tillfällen under ett 24 timmar långt experiment kommer 200-300 observationer totalt att utföras.

Förutom tidsfelen från atomklockan och eventuella strukturer hos kvasarerna, måste man ta hänsyn till en annan viktig effekt, nämligen att signalen från kvasaren passerar genom jordens atmosfär på olika ställen. Signalens hastighet genom atmosfären beror på luftens sammansättning. Skillnader i atmosfären ovanför respektive teleskop medför, att ett fel introduceras i den uppmätta skillnaden i ankomsttid. Detta fel kan emellertid reduceras, om man kan bestämma atmosfärens inverkan för varje teleskop.

Bild 2: Mätningar av baslinjen mellan Onsala och Westford i Massachusetts i USA. Grafiskt visas skillnaderna mellan de uppmätta avstånden och medelvärdet på 5.600.741.572 mm. Vid anpassning av en rät linje till dessa mätningar erhåller man en uppskattning av längdökningen lika med 16,3 mm/år. Osäkerheten (en standardavvikelse) i denna trend är av storleksordningen +/- 0,1 mm/år. Sedan de första mätningarna utfördes i början av 80-talet, har noggrannheten på de beräknade baslinjelängderna långsamt förbättrats. Detta syns tydligt på de vertikala strecken tillhörande varje uppmätt avstånd, vilka är ett mått på mätosäkerheten (en standardavvikelse).

Jonosfären är belägen mellan 100 och 1000 kilometers höjd. Antalet fria elektroner, som signalen passerar i jonosfären, bestämmer storleken på ett av bidragen till den totala signalfördröjningen i atmosfären. Storleken på jonosfärsbidraget varierar emellertid beroende på signalens frekvens, vilket kan utnyttjas genom att mäta upp skillnaden i ankomsttid för två olika signalfrekvenser samtidigt. Dessa två olika skillnader i ankomsttid används därefter för att nästan helt eliminera inverkan av de fria elektronerna i jonosfären. VLBI-mätningar vid två frekvenser började genomföras 1980, först med både 20m- och 25-m-teleskopen, men sedan 1987 observeras båda frekvensbanden med 20m-teleskopet (se Bild 1). Tack vare mätningar vid två skilda frekvensband övergick det geodetiska VLBI-projektet från att ha varit mest teknikutveckling, till att producera geodetiska resultat av intresse för geofysikalisk forskning, relaterad till rörelser i jordskorpan och variationer hos jordens rotationsparametrar.

Ett exempel på mätresultat av avståndet mellan Onsala och Westford (Massachusetts, USA) visas i Bild 2.

Även den undre neutrala delen av atmosfären uppvisar variationer över både korta och långa tidsskalor. Dessa variationer orsakas främst av vattenånga. Den vanligaste metoden är att genom observationer vid många olika horisontvinklar, kombinerat med ett antagande om en horisontellt skiktad homogen atmosfär, uppskatta atmosfärens vattenångeinnehåll från själva VLBI-observationerna. Resultatet kan verifieras med hjälp av en oberoende mätmetod, som t.ex. mikrovågsradiometri.

Den geodetiska VLBI-tekniken är överlägsen alla andra nu kända mätmetoder, när det gäller noggrannheten i uppmät-

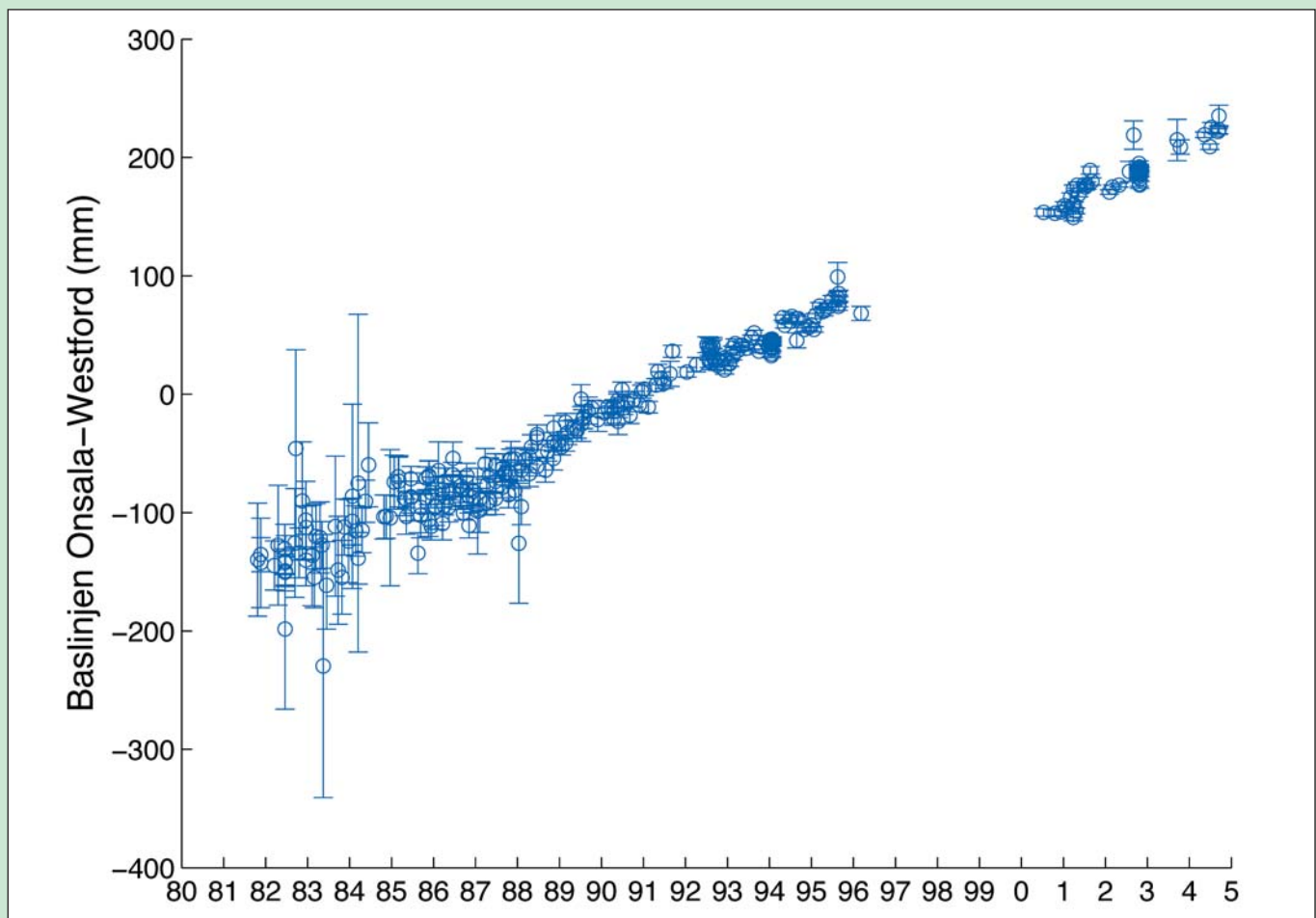


Bild 3: GPS-monumentet vid Onsala rymdobservatorium. Tack vare Onsalas tidiga engagemang i geodetisk VLBI-forskning var observatoriets position välkänd (cm-nivå) i ett globalt referenssystem. Detta har utnyttjats genom att placera spårstationer för GPS-satelliter vid observatoriet från mitten av 80-talet. En permanent station som kontinuerligt samlar in GPS-data har existerat sedan december 1987

ningen av variationer hos jordens rotationsparametrar. Variationer i rotationsaxelns riktning i förhållande till stjärnorna (eller i detta fall kvasarerna) kallas för precession och nutation. VLBI-mätningar av nutationen har medfört en ökad kunskap om jordens inre, bland annat den flytande yttre delen av jordens kärna, och kopplingen mellan denna och manteln. En annan rörelse hos jordens rotationsaxel sker i förhållande till jordskorpan och kallas polvandring. Polvandringen är egentligen sammansatt av flera rörelser,

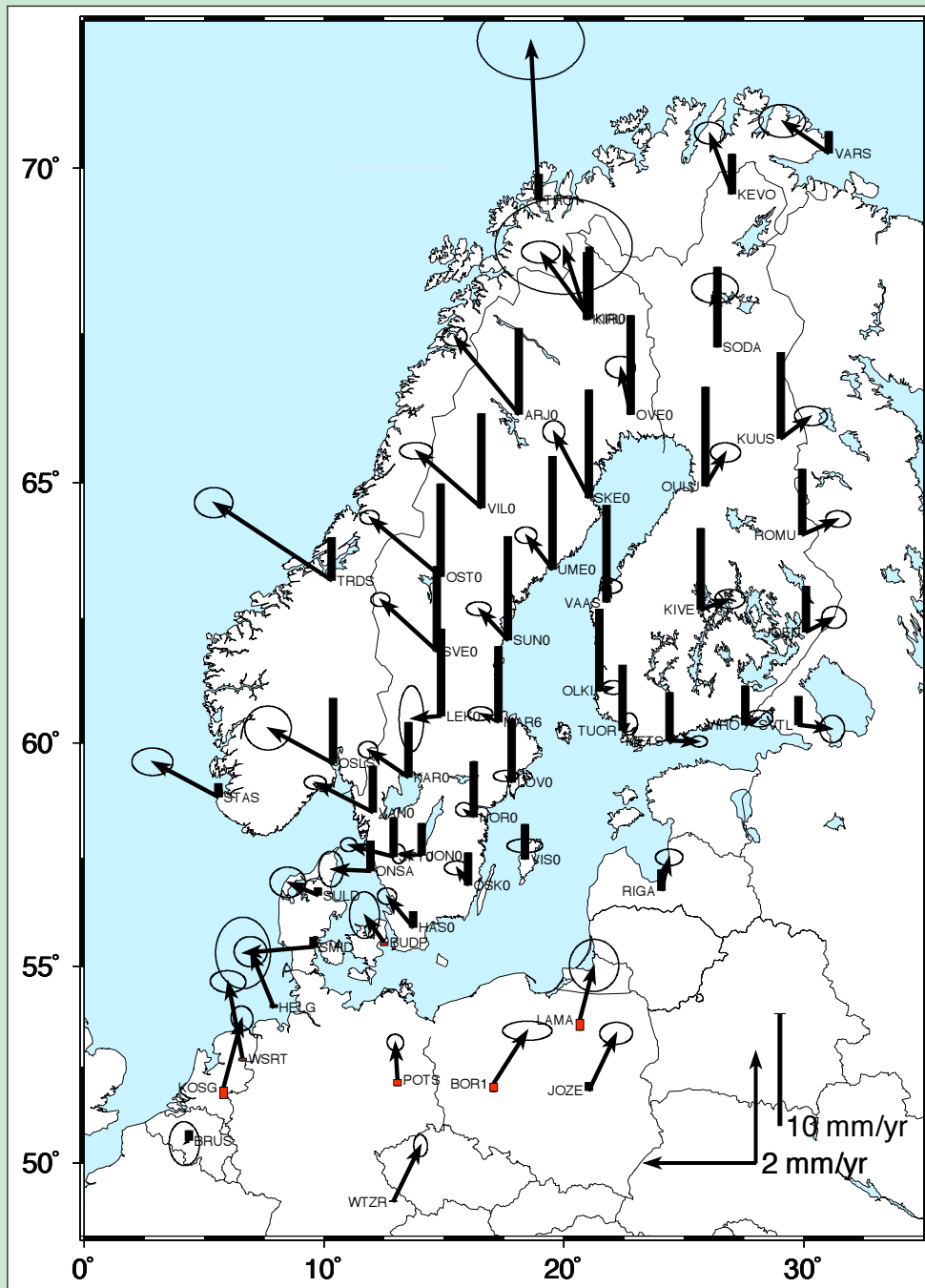


Bild 4: Resultat av rörelser i jordskorpan uppmätt med GPS. Vid varje GPS-station visas en vertikal stapel som beskriver landhöjningen. En röd stapel betyder landsänkning. Pilen beskriver horisontalrörelsens riktning och storlek i enlighet med definitionen nertill i bildens högerkant. Dessa resultat härrör från en analys som redovisas i licentiatavhandlingen av Martin Lidberg, vilken publicerades i december 2004.

som sker över olika tidsperioder. Förutom rotationsaxelns riktning definieras jordens orientering i rymden av rotationshastigheten. Med VLBI-mätningar kan man alltså studera variationer i dygnets längd.

På samma sätt som havsnivån ändras på grund av månens och solens dragningskrafter, uppvisar också jordskorpan tidsvatteneffekter. Dessa har man observerat genom noggranna mätningar av variationer i gravitationen, långt innan rymdgeodetiska mätningar började utföras. Dessa kan dock förhoppningsvis användas för att förfina modellerna, som beskriver jordskorpan deformation orsakad av dragningskrafterna.

Mindre variationer i vertikalled, i storleksordningen ett par centimeter, orsakas av haven och luftmängden i atmosfären ovanför jordskorpan. Nedlastningen av jordskorpan ändras på grund av variationer i havsnivån. Effekten är naturligtvis mycket platsberoende. Lufttrycksvariationer medför också ett indirekt platsberoende genom att ett ökande lufttryck ofta tränger undan havsvattnet. Detta kompenserar till en del nedlastningseffekten för platser, som ligger i närheten av ett hav.

Som synes är det ett stort antal effekter som kan studeras med hjälp av geodetiska VLBI-experiment, och detta görs fortfarande framgångsrikt i en global skala. Ekonomin sätter dock begränsningar när det gäller upplösningen av mätningarna i tid och rum. Det är relativt kostsamt både att bygga och att använda radioteleskop. Denna frågeställning aktualiserades tidigt, redan i början av 80-talet, då de första experimentsatelliterna i GPS (Global Positioning System) konstellationen kunde användas.

Signalerna från GPS-satelliterna är mycket starkare än de från de avlägsna kvasarerna, vilket gör att mindre antenner och enklare mottagare kan användas, och den totala kostnaden för en GPS-station är bara en bråkdel av en VLBI-antenn med tillhörande mottagarutrustning.

Rymdgeodetiska tillämpningar av GPS-tekniken

Det finns olika typer av GPS-mottagare. Den som är intressant för geodetiska tillämpningar låser på, och följer, den mottagna bärvågens fas, vilket medför en relativ mätosäkerhet på millimeternivå vid uppmätning av avståndet mellan satellit och mottagare.

På grund av VLBI-verksamheten etablerades en GPS-station vid Onsala rymdobservatorium redan på 80-talet (se Bild 3). I samarbete med Lantmäteriet söktes och erhöles medel för etablera ett kontinuerligt arbetande referensnät av GPS-mottagare i Sverige i början av 90-talet. De första stationerna kom igång 1993 och utgjorde ett av de första nationellt täckande GPS-nätverken i världen. I norra Europa (huvudsakligen Skandinavien och Finland) förekommer rörelser i jordskorpan av i storleksordning flera millimeter per år. Denna sker på grund av att jordskorpan fortfarande återhämtar sig från den nedlastning, som den utsattes för under senaste istiden. Idag har alltså mer än tio års data analyserats och resulterar i en bestämning av rörelser i jordskorpan vid de olika GPS-mottagarna. Rörelserna bestäms i ett koordinatsystem relativt jordens masscentrum och kan visas som vertikala och horisontella komponenter vid varje GPS-station (se Bild 4). Dessa resultat visar att det existerar horisontella rörelser bort från det antagna läget där nedlastningen på grund av isen var som störst. Dessa rörelser

har endast kunnat mätas med hjälp av GPS. Även om den vertikala rörelsen tidigare var känd, ger GPS-tekniken rörelser som kan relateras direkt till jordens masscentrum. När landhöjningsmätningar med GPS kombineras med närliggande havsnivåmätningar från mareografer, möjliggörs också en bestämning av den absoluta havsnivån. En stigande havsnivå är en indikation på glaciärernas avsmältning och/eller en stigande medeltemperatur hos havsvattnet, och därmed också en indikation på en existerande växthuseffekt. Med användande av en liknande metodik som beskrevs för VLBI-tekniken ovan är det möjligt att bestämma mängden vattenånga i atmosfären ovanför varje GPS-mottagare.

Då vattenånga är en viktig parameter att känna till vid framställande av lokala väderprognoser och prognoser för kortare tidsrymder, har flera forskningsprojekt utförts både på nationell och på Europeisk nivå, för att vädertjänster skall kunna dra nytta av dessa resultat. I den pågående aktiviteten finns cirka 500 stationer i Europa, varav cirka 80 i Sverige. En annan intressant aspekt på att få kunskap om mängden vattenånga är att den är den viktigaste av de så kallade växthusgaserna. För klimatövervakning krävs stabila mätssystem över flera decennier. Eftersom de fundamentala mätningarna med GPS- och VLBI-teknikerna är tidsmätningar, kan det visa sig att dessa är överlägsna andra typer av mätningar som kräver kalibrering av sensorer för effekt och strålningsintensitet.

Tillämpningar för rymdgeodetiska mätmetoder har alltså vuxit fram under de senaste 20 åren, som knappast kunde förutsägas när dagens system projekterades. Man frågar sig vilka tillämpningar som kommer att vara intressanta omkring år 2025 och vi ser fram emot ytterligare intressanta forskningsuppgifter.



Gunnar Elgered
Radio- och rymdvetenskap
Chalmers tekniska högskola