



Lantmäteriet
Lantmäteriverket - National Land Survey
S - 801 12 GÄVLE · SWEDEN

Tekniska skrifter - Professional Papers

1981:6

GEODETISKA SATELLITMETODER - EN ÖVERSIKT

av Lars Sjöberg

Gävle 1981

<u>Innehållsförteckning</u>		Sida
1	Inledning	1
2	Allmänna principer för geodetiska satellitmetoder	1
	2.1 Geometriska metoder	1
	2.2 Dynamiska metoder	5
	2.3 Kombinerade metoder	7
	2.4 Kontroll av störeffekter	10
3	Aktuella satellitobservationsmetoder	11
	3.1 Satellitaltimetri	12
	3.2 Lasermetoder	13
	3.3 Dopplermetoder	15
4	Andra aktuella rymdmetoder	16
	4.1 Stellartriangulering mot ballong	16
	4.2 Radio-interferometrisk metod	17
5	Satellitmetoder under utveckling	19
	5.1 GPS	19
	5.2 Satellitburen laser	20
	5.3 Hastighetsmätning satellit-satellit	21
	5.4 Satellitgradiometri	22
6	Några tillämpningar	22
	Referenser	28

1 Inledning

Uppsändandet av den första artificiella jordsatelliten 1957 öppnade enorma möjligheter att lösa geodesins huvuduppgifter, dvs (a) att bestämma lägesrelationer mellan punkter på jordytan (i ett enhetligt koordinatsystem) och (b) att bestämma jordens storlek, form, massa samt yttre tyngdkraftsfält. Således kan man med dessa metoder bl a sammanbinda olika länders och kontinenters triangelnät i ett enhetligt koordinatsystem och bestämma tyngdkraftsfältets globala struktur.

Satellitmetoderna har fortlöpande utvecklats och idag är det fullt möjligt att också bestämma parametrarna i (a) och (b) som funktioner av tiden. Detta leder till nya tillämpningar inom exempelvis deformationsanalys och geodynamik. I detta sammanhang är även VLBI (Very Long Baseline Interferometry) genom registrering av signaler från avlägsna radiostjärnor av stort intresse.

Denna rapport ger en kortfattad översikt av dagens och den närmaste framtidens rymdgeodetiska metoder och deras tillämpningar.

2 Allmänna principer för geodetiska satellitmetoder

De geodetiska tillämpningarna av artificiella satelliter brukar indelas i geometriska och dynamiska metoder. Man talar också om kombinerade metoder.

2.1 Geometriska metoder

De geometriska metoderna avser punktbestämning, dvs bestämning av enskilda markpunkters koordinater i ett entydigt definierat koordinatsystem. Den principiellt enklaste metoden att beräkna koordinaterna (x,y,z) för en nypunkt (Q) från en känd punkt (P) kan beskrivas som en tredimensionell polärmetod. Då direkt sikt saknas mellan punkterna P och Q kan

satelliten (S) användas som referensobjekt för bestämning av den relativa positionsvektorn \vec{PQ} ur sambandet (se fig 1)

$$\vec{PQ} = \vec{PS} + \vec{SQ}$$

varur koordinaterna för Q ges av

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_Q = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_P + \vec{PQ}$$

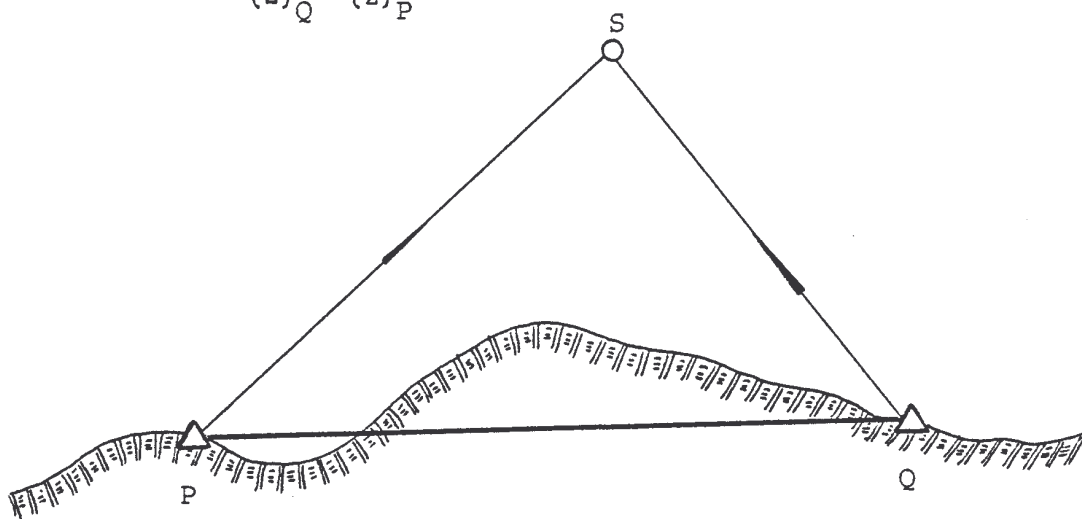


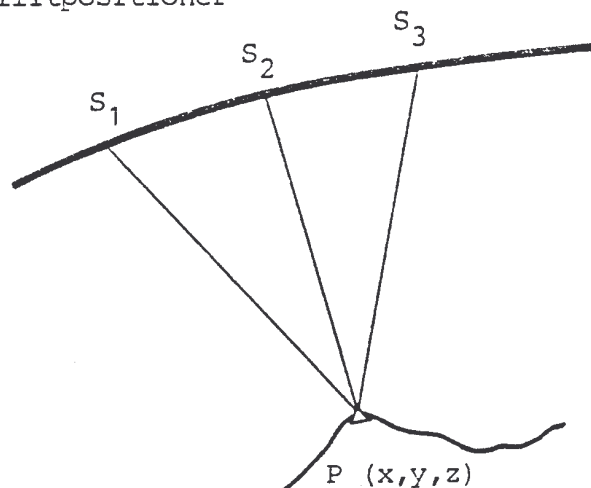
Fig 1. Bestämning av vektorn \vec{PQ} genom mätning av vektorerna \vec{PS} och \vec{SQ}

Metoden kräver emellertid att både riktning och avstånd till satellit mäts samtidigt från P och Q, krav som i praktiken är omöjliga att uppfylla. Andra, mer fruktsamma vägar står till buds.

I fig 2 illustreras metoden för enkel-punktinskärning (avskärning) i rymden av punkten P. Härvid antas att satellitens bankurva är helt känd, varför markpunktens koordinater kan bestämmas ur minst tre observationer mot (eller från) satellit i olika positioner. Fastän ett ökat antal observationer förbättrar punktbestämningen, sätter osäkerheten i banparametrarna en praktisk gräns för denna punktbestämning. En ökad kännedom om det yttre tyngdkraftsfältet ökar möjlig-

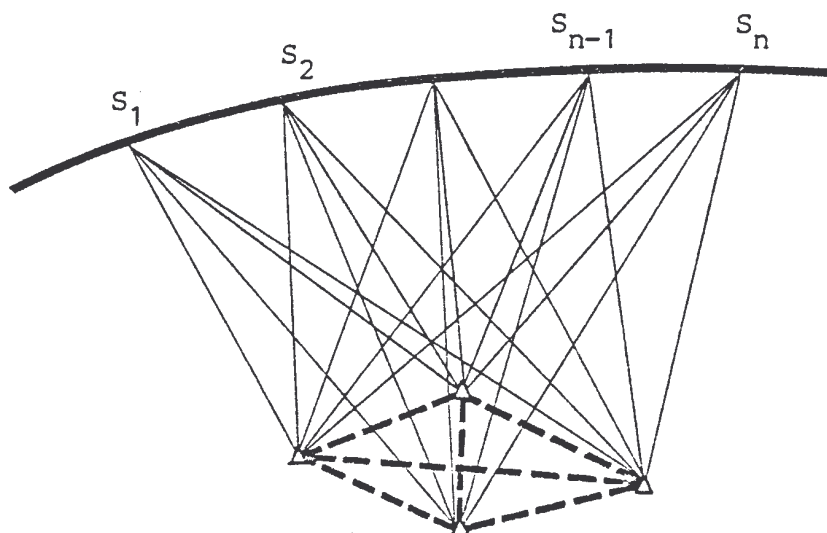
heterna att beräkna noggranna satellitpositioner. Känner vi koefficienterna i formel (4) upp till gradtal 10 (20) kan vi således beräkna satellitens position med ett fel av storleksordningen 50 (5) meter (jfr avsnitt 2.2).

Fig 2. Inskärning i rymden av punkten P mot kända satellitpositioner (S_1, S_2, S_3).



Noggrannheten i punktbestämningen kan ökas genom sk satellittriangulering (fig 3), varvid ett flertal markstationer använder satelliten som referensobjekt för överföring av riktningar och/eller avstånd mellan stationerna. Osäkerheten i satellitbanan påverkar ej noggrannheten i punktbestämningen. Denna methods användbarhet begränsas av kravet på simultanitet i mätningarna från samtliga stationer.

Fig 3. Satellittriangulering

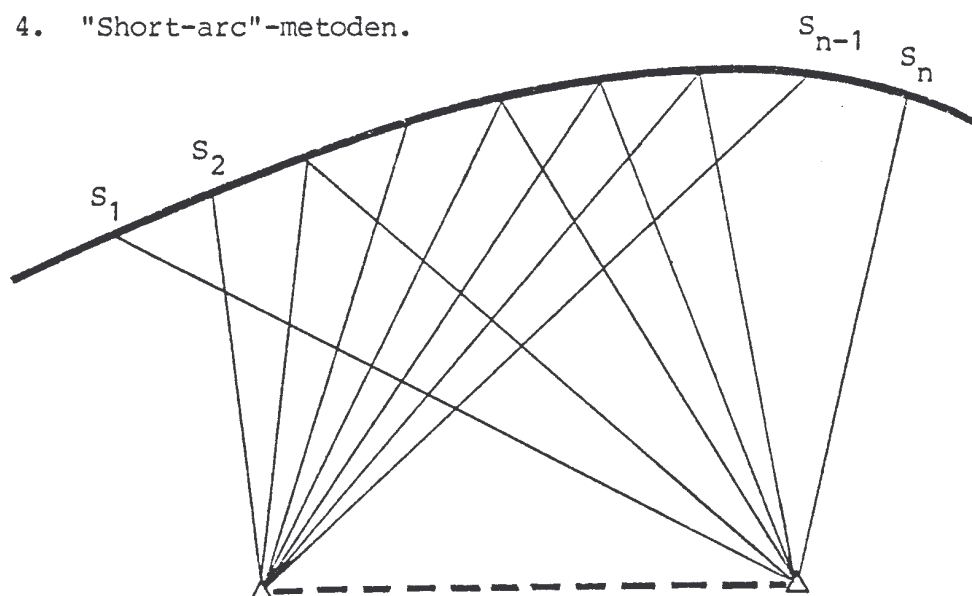


Hög noggrannhet kan förenas med en praktisk användbar teknik i den så kallade "short-arc"-metoden (fig 4). Härvid antas att ban kurvans form är delvis känd över ett kortare bansegment, exempelvis en passage. Banparametrar och stationskoordinater utjämnas ur observationer, som ej behöver utföras simultant från två stationer. Exempelvis kan följande modell användas för satellitens koordinater $x(t), y(t), z(t)$ vid tidpunkten t :

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + x_1(t-t_0) + x_2(t-t_0)^2 + \dots + x_m(t-t_0)^m \\ y(t) &= y_0 + y_1(t-t_0) + y_2(t-t_0)^2 + \dots + y_m(t-t_0)^m \quad (1) \\ z(t) &= z_0 + z_1(t-t_0) + z_2(t-t_0)^2 + \dots + z_m(t-t_0)^m \end{aligned}$$

där x_i, y_i, z_i ; $i = 0, 1, \dots, m$ är obekanta parametrar som bestäms genom utjämnning av samtliga observationsekvationer från en satellitpassage och t_0 är en vald utgångstid. I mer förfinade short-arc-modeller inkluderas de variationer i satellitens rörelse som beror av (och kan bestämmas ur) kända komponenter i tyngdkraftsfältet (se nästa avsnitt). Formel (1) ersätts då ofta med en motsvarande modell för de keplerska banparametrarna. För ytterligare detaljer angående "short-arc"-metoder hänvisas till Schwarz (1969) och Brown (1976 a).

Fig 4. "Short-arc"-metoden.



2.2 Dynamiska metoder

Vid de dynamiska metoderna studeras störningarna i satellitbanan som en funktion av tyngdkraftsfältets komponenter. Om jorden vore en homogen sfär skulle varje satellit röra sig i en perfekt elliptisk bana. (Vi bortser från störeffekter orsakade av sol, måne och planeter samt luftmotstånd och strålningstryck från solen.) I detta ideala fall gäller Keplers lagar som säger att (1) varje satellit rör sig längs en ellips med jorden i ena brännpunkten och (2) den yta som per tidsenhet översveps av satellitens radius vektor är konstant och slutligen (3) kvadraten på omloppstiden (T) för en satellit är proportionell mot tredje potensen av halva storaxeln (a) för banellipsen, dvs

$$T = \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{GM}} \quad (2)$$

där G är Newtons gravitationskonstant och M är jordens massa. Om GM är känd kan alltså a uppskattas ur satellitens omloppstid. Vidare erhålles ur (2)

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^3 \quad (3)$$

dvs tredje potensen av kvoten mellan två bankurvors halva storaxlar är lika med kvadraten av omloppstidskvoten.

De perturbationer som studeras är alltså betingade av att massfördelningen i jorden avviker från den homogena sfärens. Den newtonska gravitationspotentialen (V) för jorden brukar i detta sammanhang utvecklas i en serie av klotytefunktioner $\{Y_{nm}(P)\}$:

$$V(P) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} J_{nm} Y_{nm}(P) \right\} \quad (4)$$

där

a = referensellipsoidens ekvatorsradie

r = geocentriskt avstånd till satellit (i position P)

J_{nm} = klotyfefunktionskoefficienter

n_{\max} = maximalt gradtal för serieutvecklingen

Formel (4) kan ses som ett sätt att representera potentialen V . Ur observerade satellitdata kan koefficienter J_{nm} bestämmas. I formeln har vi antagit att vårt koordinatsystem har origo beläget i jordens tyngdkraftscentrum, vilket medför att

$$J_{10} = J_{1-1} = J_{11} = 0$$

Teoretiskt är serien oändlig. I praktiken kan man bara bestämma ett ändligt antal koefficienter. I dagens bästa geopotentialmodeller är n_{\max} ungefär 30. En ökning av n_{\max} ger en ökning i detaljupplösningen för potentialrepresentationen. Som en tumregel brukar man räkna med att $n_{\max} = N$ ger upplösningen $180^\circ/N$. Detta medför att om exempelvis n_{\max} är 36 kan ej detaljer i geopotentialfältet med en utsträckning mindre än 5° bestämmas.

Vid de allra första enkla satellitobservationerna kunde man snabbt bestämma koefficienten J_{20} , som hänger samman med jordens avplattning. Pga J_{20} -termen vrider sig nämligen satellitens banplan kring jordens rotationsaxel enligt formeln (jfr fig 5)

$$\frac{d\Omega}{dt} = - \frac{3\pi}{T} \left(\frac{a}{r}\right)^2 J_{20} \cos i \quad (5)$$

där T är omloppstiden och i banplanets inklinationsvinkel.

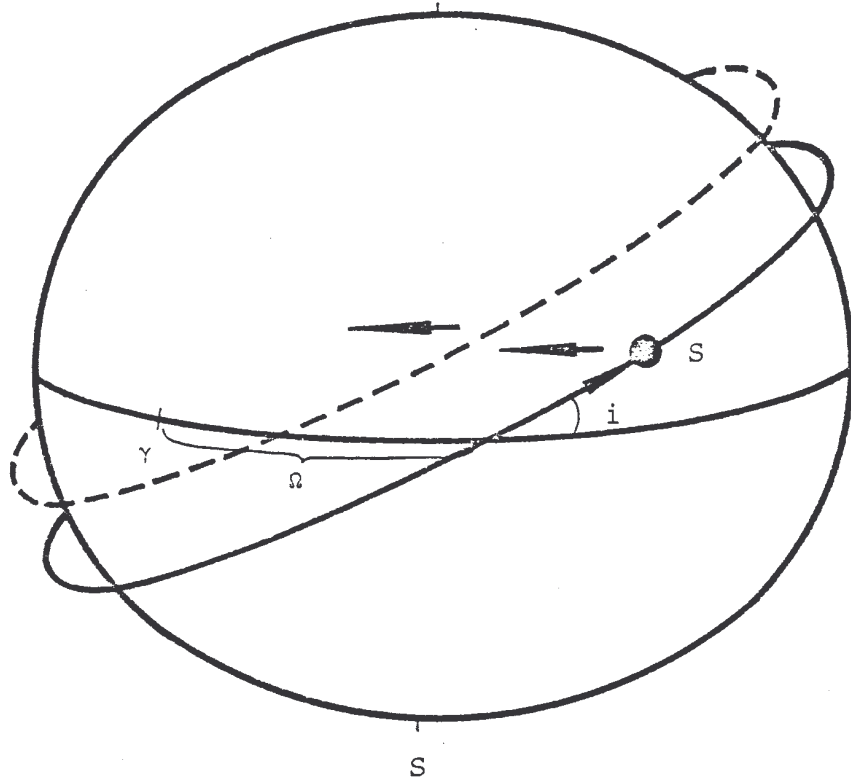


Fig 5.
Satellitbanan vrider sig västerut till följd av jordens avplattning (jfr formel (5)). γ = vårdagjämningsspunkt, Ω = banellipsens rektascension, i = banellipsens inklinationsvinkel.

För att tyngdkraftsfältets komponenter (J_{nm}) skall kunna extraheras i detalj krävs att ovan nämnda störeffekter kan bestämmas och/eller elimineras i mätproceduren. Då satellitens känslighet för högre grads komponenter i tyngdkraftsfältet minskar med satellitens avstånd till jordens centrum, (jfr formel (4)), bör satellitbanan vid dynamiska tillämpningar ha så liten radie som möjligt. Vid små banradier utgör luftmotståndet det dominerande störproblemet. Ett speciellt "drag-free"-system har utvecklats, vilket möjliggör så låga satellitbanor som 125 km utan någon som helst inverkan av icke-gravitationella krafter. (Se nedan under punkt 2.4.)

2.3 Kombinerade metoder

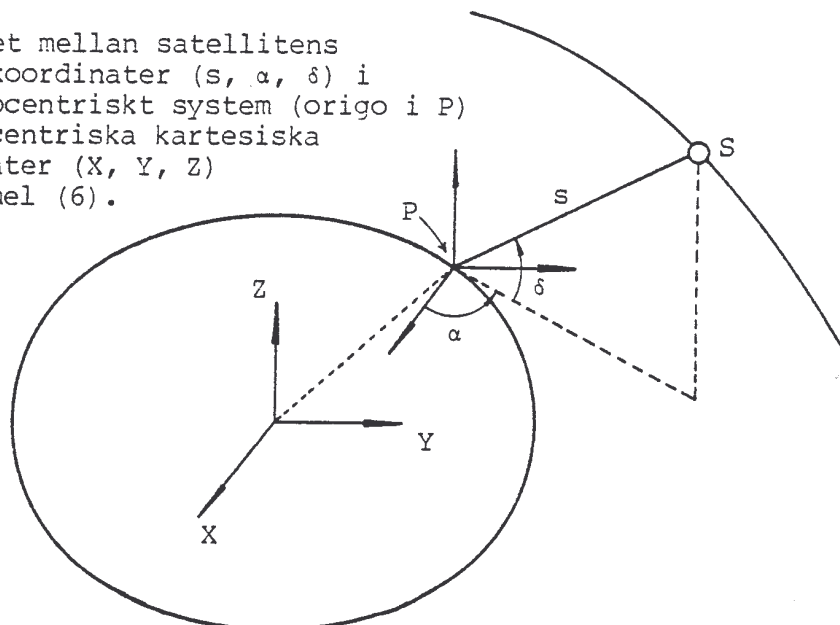
Vid de kombinerade metoderna bestäms koordinaterna för markstationerna i ett globalt triangelnät samtidigt med utjämnningen av tyngdkraftsfältets komponenter (J_{nm}). Observationerna utgörs av de rymdpolära koordinaterna för satelliten i observationsögonblicket, dvs avståndet (s) samt riktningen som definieras av två vinklar. Om vi definierar ett geocen-

triskt koordinatsystem XYZ i vila relativt fixstjärnorna har vi följande samband mellan det rätvinkliga systemet (X, Y, Z) och det polära systemet (s, α, δ)

$$\begin{aligned} X_S - X_P &= s \cos \delta \cos \alpha \\ Y_S - Y_P &= s \cos \delta \sin \alpha \\ Z_S - Z_P &= s \sin \delta \end{aligned} \quad (6)$$

där vinklarna α och δ är satellitens rektascension respektive deklination i punkten P på jordytan (se fig 6).

Fig 6. Sambandet mellan satellitens polära koordinater (s, α, δ) i ett topocentriskt system (origo i P) och geocentriska kartesiska koordinater (X, Y, Z) Jfr formel (6).



Ur formelsambandet (6) erhålles de olinjära observations-ekvationerna

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctan (Y_S - Y_P) / (X_S - X_P) \\ \delta &= \arctan (Z_S - Z_P) / \sqrt{(X_S - X_P)^2 + (Y_S - Y_P)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

och

$$s = \sqrt{(X_S - X_P)^2 + (Y_S - Y_P)^2 + (Z_S - Z_P)^2}$$

Låt nu (x_p, y_p, z_p) definiera punkten P:s koordinater i ett jordfixt geometriskt koordinatsystem, relaterat till (X, Y, Z) enligt

$$\begin{aligned}
 X_P &= x_P \cos \omega t - y_P \sin \omega t \\
 Y_P &= x_P \sin \omega t + y_P \cos \omega t \\
 Z_P &= z_P
 \end{aligned} \tag{8}$$

där ω är jordens rotationshastighet och t är tiden. Vidare kan satellitkoordinaterna X_S, Y_S, Z_S uttryckas som funktioner av tiden, elementen för en referensellips [(den osculerande)

banellipsens banparametrar $a_0, e_0, i_0, \Omega_0, \omega_0$ vid en godtyckligt definierad tidpunkt T_0] samt potentialkoefficienterna J_{nm} ; $n = 2, 3, \dots$; $m = 0, \pm 1, \dots, \pm n$:

$$\begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} (t, a_0, e_0, i_0, \Omega_0, \omega_0, T_0, J_{nm}) \tag{9}$$

Ur (7) - (9) erhålles ett funktionssamband

$$\begin{pmatrix} s \\ \alpha \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s \\ \alpha \\ \delta \end{pmatrix} (x_P, y_P, z_P, t, a_0, e_0, i_0, \Omega_0, \omega_0, T_0, J_{nm}) \tag{10}$$

Dessa komplicerade observationsekvationer differentieras för bestämning av korrektioner till approximativa storheter enligt minsta kvadrat-metoden. De obekanta utgörs av stationskoordinater (x_P, y_P, z_P) , banelement samt J_{nm} -parametrar. För fler detaljer hänvisas till Kaula (1963) och Heiskanen och Moritz (1967, s 350-356).

De praktiska svårigheterna med denna metod är stora. Först och främst måste den oändliga serien koefficienter J_{nm} trun-keras. Om vi antar att n_{\max} sätts till 36 får vi 1365 obekanta koefficienter att bestämma. Till detta kommer alla stationskoordinater och banellipsens parametrar. Dessutom måste även andra obekanta parametrar inkluderas för att reducera inverkan från diverse icke-gravitationella störeffekter så-

som luftmotstånd. Under alla omständigheter tenderar ekvationerna att ge instabila lösningar (som en följd av korrelationen mellan J_{nm} -koefficienter av högre gradtal) och stor möda måste ägnas åt att sprida ut observationerna jämnt både i rymden och i tiden. Olika typer av observationer bidrar också till stabilare lösningar. Ett försök att systematiskt undersöka estimerbarheten av förekommande parametrar i den kombinerade metoden i olika fall har utförts av Grafarend och Livieratos (1978) samt Grafarend och Heinz (1978). Frågan huruvida man genom satellitobservationer verkligen kan bestämma absoluta geocentriska koordinater är dock ännu inte tillfredsställande besvarad.

En kombinerad metod som även inkluderar terrestra tyngdkraftsdata finns beskriven i Koch (1974).

2.4 Kontroll av störeffekter

Som tidigare nämnts bör satelliter som ingår i dynamiska undersökningar ha en så liten banradie som är praktiskt möjligt. Gränsen sätts av luftmotståndet. En metod att bestämma dessa problem har föreslagits av Bertotti (1978). Ett satellitpar bestående av två små, kompakta sfärer med samma radie och samma ytstruktur men med olika massor m_1 och m_2 placeras i en låg satellitbana (ungefär på höjden 300 km). Mot satellitparet med positionsvektorerna \bar{r}_1 och \bar{r}_2 svarar en ideal punkt

$$\bar{r} = \frac{m_1 \bar{r}_1 - m_2 \bar{r}_2}{m_1 - m_2}$$

som endast känner av gravitationen om störeffekterna är lika på båda satelliterna. Metoden kräver alltså att båda satelliterna observeras.

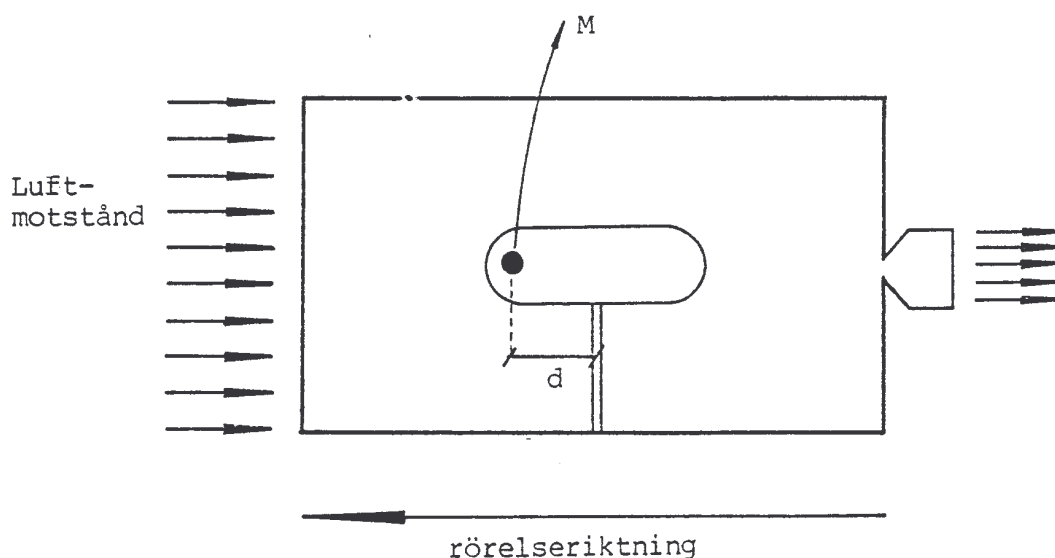
Ett mer lovande system kallat DISCOS (Disturbance Compensation System) för kontroll av störeffekter finns beskrivet av Fiscell och Pisacane (1978). Systemet framgår av fig 7. I satellitens inre finns en vakuumkanare med en kontroll-

massa, (M), som ej påverkas av icke-gravitationella krafter. M 's rörelse relativt kammarens centrum kontrolleras och registreras. Pga luftmotståndet kommer M småningom att närma sig kammarens främre vägg, varvid en liten raketmotor ger satelliten en något högre hastighet och M rör sig bakåt i kammaren, för att efter en tid ånyo röra sig framåt. På detta sätt kan satelliten placeras i en mycket låg bana (ner mot 150 km) utan att kontrollmassans rörelse påverkas av andra krafter än de rent gravitationella. Systemet har redan med framgång testats i satellit.

Fig 7.

DISCOS (Disturbance Compensation System)

M 's rörelse relativt vakuumkammarens centrum registreras.



3 Aktuella satellitobservationsmetoder

Under 1960- och 1970-talet användes kamera-metoder för observation av riktningar mot satelliter. Många av dessa

kameror är fortfarande i bruk. Punktbestämningsnoggrannheten ligger i storleksordningen 5-10 meter mellan markstationer. För en utförlig beskrivning hänvisar vi till Schmid (1974). En av de största svagheterna vid satellittriangulering med satellitkameror är tidssynkroniseringen mellan nätstationerna och samtidigtheten i observationerna. Riktningmätningen kan eventuellt förbättras avsevärt med hjälp av ett fotoelektriskt slutarsystem beskrivet i Kakkuri och Kalliomäki (1972). Riktningmätning i ett absolut system (mot fixstjärnor) torde i framtiden vara av visst intresse.

I dag finns ett flertal noggrannare metoder, av vilka vi skall beskriva de viktigaste.

3.1 Satellitaltimetri

Från satelliterna Skylab, GEOS-3 och SEASAT-1 har det vertikala avståndet (a) från satellit till momentan havsyta uppmätts med sk radarhöjdmätare (radaraltimeter). Med kännedom om satellitens höjd (h) över en vald referensellipsoid kan den momentana havsytans höjd över ellipsoiden bestämmas som

$$s = h - a. \quad (11)$$

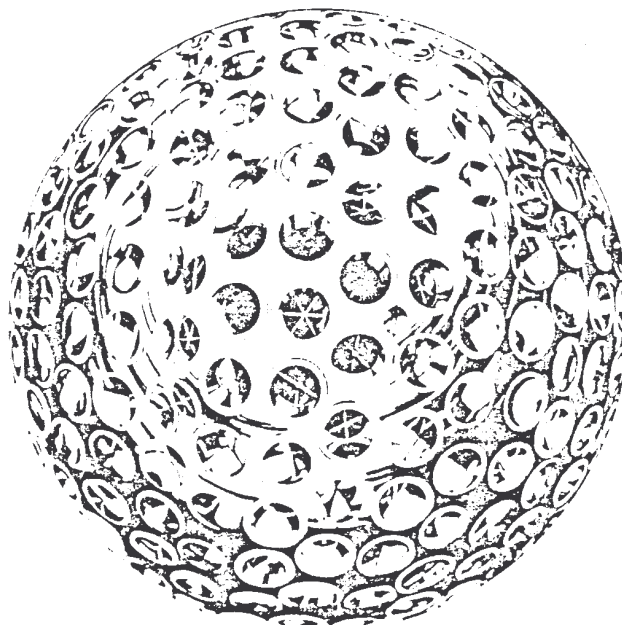
s skiljer sig från N (geoidhöjden, medelhavsytans nivå) pga vågor, strömmar, tidvatten m m. Reduceras mätningarna för dessa störfenomen kan N bestämmas direkt geometriskt via (11). Satellitradarhöjdmätningen har på en mycket kort tid gett detaljerade geoidbestämningar över samtliga världshav, områden där geoiden varit praktiskt taget okänd tidigare. Denna fjärranalysteknik har fått en hel rad geodetiska och oceanografiska tillämpningar. Se exempelvis vol 84, nr B8, 1979 av Journal of Geophysical Research, som helt ägnas åt altimetri. Olika metoder för uppskattning av gravitationsanomalier ur altimeterdata finns beskrivna i Rummel-Sjöberg-Rapp (1978). Anderson och Scherneck har (1981) beräknat en altimetergeoid för Östersjön och Bottenhavet ur SEASAT-data.

3.2 Lasermetoder

Vid satellit-lasermetoden mäts gångtiden för en koncentrerad laserpuls från laserstationens sändardel via reflektor på satellit och åter till laserinstrumentets mottagarenhet. Ur gångtid och pulshastighet kan avståndet till satelliten bestämmas, så när som på en instrumentkonstant, som i sin tur beräknas genom mätning av en känd teststräcka på marken. Precisionen i en mätning är ca 10 cm och det relativa punktmedelfelet ur upprepade mätningar (satellittriangulering eller "short-arc") är i storleksordningen 3 cm och endast i ringa mån beroende av punktavståndet. LMV har subventionerat byggandet av ett laserinstrument vid Metsähovi, Finland. För närvarande byggs ett mobilt instrument i Finland, som tidvis kommer att användas för mätningar från LMVs observatorium i Mårtsbo, Gävle. Flera mobila lasersystem har på senare tid konstruerats. Puls-lasrar används även för mätning mot reflektorer placerade på månen.

För noggranna geodynamiska projekt med användning av lasermetoden har speciella satelliter sänts upp enbart för detta syfte. I fig 8 illustreras den amerikanska satelliten Lageos (Laser Geodynamics Satellite) uppsänd i maj 1976 på en höjd av 5 900 km. Satelliten som väger 411 kg har en diameter av endast 60 cm och är utrustad med 426 retroreflektorer (hornprismor). Dess huvudanvändning ligger inom områdena plattetektonik, polvandring och jordrotation. Den liknande men mindre, franska satelliten Starlette skall användas speciellt för studier av jordens tyngdkraftsfält. Följdaktligen har den senare placerats i en mycket lägre bana (på höjden 800 km).

Fig 8. Satelliten Lageos (Laser GEODynamic Satellite)



Den europeiska rymdorganisationen (ESA) planerar under 1981 ett laserexperiment benämnt LASSO (Laser Synchronisation from Stationary Orbit). Huvudsyftet är att undersöka möjligheten att med hjälp av satellitlaser synkronisera klockor över stora avstånd med en noggrannhet av förhoppningsvis $1 \mu\text{s}$. Metoden finns beskriven i Gaignebet (1981). För experimentet har en satellit SIRIO-2 placerats i en geostationär bana över Mellaneuropa. Satelliten är utrustad med laserreflektorer och laserdetektor kopplad till atomur ombord. Härigenom kan man från marken beräkna gångtiden (τ) för en laserpuls från markstation till satellit medan tidpunkten (t_s) för en puls'ankomst till satelliten kan registreras i den senare. Efter lasermätning mot satelliten från två stationer (A och B) kan tidshållningen vid båda stationerna jämföras. Låt laserpulserna sändas ut från A och B vid tidpunkterna t_A och t_B . Enligt klockan i A (respektive B) når satellitpuls från A (B) satelliten vid tidpunkten

$$t_A + \tau_A \quad \text{respektive} \quad t_B + \tau_B$$

Enligt satellitens klocka är tidsskillnaden mellan de mottagna pulserna från A och B $t_{S_B} - t_{S_A}$, varför tidsdifferensen mellan klockan i B och klockan i A ges av

$$t_B - t_A + \tau_B - \tau_A + t_{S_A} - t_{S_B}$$

I LASSO ingår även geofysiska undersökningar för bestämning av stationskoordinater, polvandring och geopotentialkoefficienter (resonans vid vissa koefficienter).

En nackdel med lasermetoden är dess väderberoende. I detta avseende är dopplermetoden överlägsen.

3.3 Dopplermetoder

Dopplermetoden, som ursprungligen utvecklats för navigeringsändamål, har under 70-talet rönt en närmast explosionsartad ökning i antalet användare. Således ökade utnyttjandet av Transit-systemet med 50 % det senaste året. I Sverige finns idag ca tio st geodetiska dopplermottagare. Fem amerikanska Transit-satelliter i polära omloppsbanor utsänder var och en stabila högfrekventa signaler vid 150 Mhz och 400 Mhz. Hos mottagarenheten på marken uppfattas signalerna som (doppler-) förskjutna mot högre respektive lägre frekvenser (f_r), beroende på om satelliten rör sig i riktning mot eller bort från mottagaren (M). Frekvensen f_r jämförs med en stabil referensfrekvens (f_g) i M, och antalet mottagna skillnadsfrekvenser $f_g - f_r$ över vissa bestämda tidsintervall (exempelvis 23 s) summeras. Varje sådan summa är direkt proportionell mot avståndsändringen till satelliten över tidsintervallet. Genom mätning av flera (indirekta) avståndsändringar kan M:s position (X, Y, Z) bestämmas genom inskränningsmetoden. Då mätning sker vid två frekvenser, kan atmosfärens inverkan på mätresultatet i hög grad elimineras. Hos de mest avancerade mottagarsystemen är beräkningsarbetet helt automatiserat;

signaler, tidsuppgifter och banparametrar för aktuell satellit överförs från satellit till mottagare och används för positionsbestämning. Resultatet från mätningar vid flera satellitpassager behandlas fortlöpande för förfining av koordinatbestämningen, vilka uppgifter (inklusive beräknade medelfel) när som helst kan kontrolleras på mottagarenhetens skärm. Inskärningsmetoden ger en noggrannhet av 1-3 m i vardera koordinaten efter några dagars mätning. Satellittriangulering ("translocation") och "short-arc"-metoden ökar den relativa punktbestämning-noggrannheten till i bästa fall någon decimeter. Utmärkta beskrivningar av dopplermetoden och dess möjligheter ges i Ashkenazi och Gough (1975), Brown (1976 a-b), Seeger (1976) och Stansell (1976).

4 Andra aktuella rymdmetoder

Förutom satellitmetoderna är idag ett par andra rymdmetoder av intresse, nämligen stellartriangulering mot ballong och VLBI. Båda metoderna har motsvarigheter i rena satellitmetoder: stellartrianguleringen mer eller mindre i det för-gånga, VLBI i framtiden.

4.1 Stellartriangulering mot ballong

Stellartriangulering genom fotografisk registrering av fotoblixtar från en ballong har med framgång prövats i Finland. Principen är densamma som vid stellartriangulering mot satellit. Det visar sig emellertid att för en nationell triangulering med punktavstånd mellan 150 och 250 km är den förra metoden väsentligt gynnsammare än den senare. Satelliterna befinner sig nämligen alldeles för högt för att medge en lämplig geometrisk konfiguration av de ingående trianglarna. På låga höjder ökar emellertid felet i riktningsmätningen pga refraktion och turbulens. Dessa synpunkter har beaktats i följande av Hirvonen (1968) härledda samband

mellan vikten p för mätning av riktningarna mot en fotoblixt i position F från två stationer (A och B):

$$p = \frac{s_{AB}^2}{m_A^2 s_{AF}^2 + m_B^2 s_{BF}^2}$$

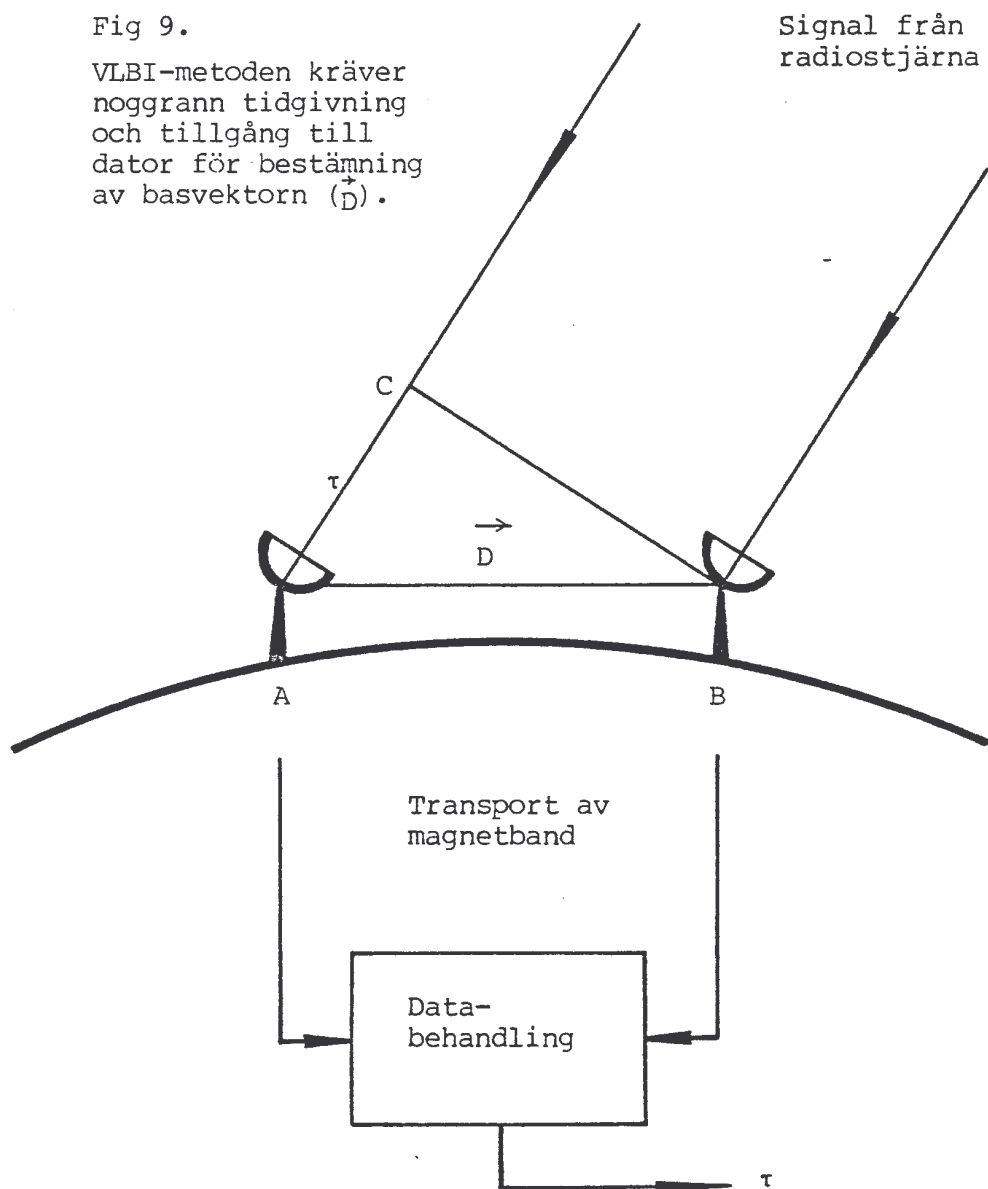
där s_{AB} , s_{AF} och s_{BF} är avstånd samt m_A och m_B är medelfel i riktningsmätningarna \overrightarrow{AF} och \overrightarrow{BF} .

I Finland används metoden för uppmätning av ett landsomfattande nät om 14 punkter (varav avstånden mellan fem stationer har slutförts). Noggrannheten uppges till omkring en meter eller bättre i koordinatbestämningen. För en ingående beskrivning av metoden hänvisas till Kakkuri (1973).

4.2 Radio-interferometrisk metod

VLBI (Very Long Baseline Interferometry) är en metod för relativ punktbestämning som utvecklats ur radioastronomin. Tekniken är i korthet följande. Från en avlägsen radiostjärna antas en signal infalla i form av en plan vågfront mot två radioteleskop A och B enligt fig 9. Vågfrontens ankomsttid till A och B mäts och skillnaden (τ) beräknas. Ur τ , signalens hastighet (c) och riktningen till radio-källan kan triangeln ABC lösas, dvs riktning och avstånd mellan A och B kan beräknas. Metoden ställer höga krav på tidsregistreringen (sker med atomur). Den inkommande signalen är i realiteten kontinuerlig, vilket medför en komplicerad korrelationsanalys i datamaskin för identifiering av en signal ur mätningarna vid de båda stationerna (A och B). Tekniken kan i första hand användas för mycket noggrann bestämning av stora avstånd, exempelvis mellan kontinenter. Mer eller mindre mobila system har konstruerats. I Sverige finns ett VLBI-system vid observatoriet på Råö (Onsala). Mer om VLBI kan inhämtas från Campbell (1978, 1979) Nes m fl (1979), Niell m fl (1978) och slutligen från NASA Conference Publication 2115.

Fig 9.
VLBI-metoden kräver
noggrann tidgivning
och tillgång till
dator för bestämning
av basvektorn (\vec{D}).



Till ESA har föreslagits att man bör sända upp en geostationär satellit för direkt tidsöverföring och -synkronisering mellan VLBI-stationer. Härigenom skulle noggrannheten i tekniken kunna ökas utan att (den kanske viktigaste begränsande faktorn) datamängden på magnetband behöver öka. I stället kan korrelationen utföras direkt vid mätningen. Viktigt är också att man härigenom får möjlighet att kontinuerligt jämföra klockornas gång. Se Campbell (1979).

Noggrannheten vid VLBI-mätning uppskattas till några centimeter i vardera koordinatriktingen. Avståndet mellan Onsala och tre amerikanska VLBI-stationer har således mätts med uppskattade medelfel av storleksordningen 3-4 cm (Herring m fl, 1981).

5 Satellitmetoder under utveckling

Ett flertal geodetiska metoder för observation mot eller från satellit är under utveckling. Här skall de viktigaste principerna i korthet beskrivas.

5.1 GPS

Ett nytt amerikanskt satellitnavigeringssystem (NAVSTAR GPS, Global Positioning System) beräknas fullt utbyggt 1987. {Se Parkinson (1979) och Bossler och Goad (1980)}. Systemet planeras innehålla 18 satelliter i tre cirkulära banor. Från varje punkt på jordytan skall ständigt minst fyra satelliter vara synliga. Varje satellit är utrustad med minst två noggranna atomur för frevenskontroll och tidgivning. I princip kan gångtiden för en stabil signal från satellit till GPS-mottagare på marken mätas samtidigt mot fyra satelliter. Mottagarens koordinater och klock-korrektion kan alltså beräknas genom inskränning mot flera satelliter. Olika metoder för noggrann geodetisk punktbestämning

är under utveckling. GPS-signalerna kan exempelvis användas som dopplersignaler (för avståndsdifferenser), för direkt avståndsbestämning till satellit eller för interferometrisk fasdifferensmätning mellan två mottagare (jfr VLBI). I de mest avancerade systemen kan man förvänta sig högre noggrannhet än vid Transit, men till en betydligt högre kostnad. Exempelvis uppskattar Anderle (1981) att en GPS-mottagare under konstruktion skall vara kapabel att bestämma relativa avstånd av 10-100 km med en noggrannhet av 1-2 cm efter 6 timmars observation. (Detta förutsätter att den troposfäriska refraktionen kan bemästras med sk radiometrar för luftfuktighet). Utan radiometer uppskattas noggrannheten till mellan 2 och 6 cm.

Enkla, bärbara mottagare för direkt punktbestämning med lägre noggrannhet torde även bli tillgängliga på marknaden.

5.2 Satellitburen laser

Flera satellitburna lasersystem är under utveckling. En stabiliserande plattform medger noggrann mer eller mindre samtidig mätning mot flera laserreflektorer på marken. Ett laser-radar-system i NASAs regi (Kumar och Mueller, 1978) skall förhoppningsvis testas i rymdskytteln 1982. Detta system mäter nästan samtidigt mot upp till 75 markstationer. Ett annat system föreslås av Smith (1978). Här mäter lasern 20-30 gånger under 2-3 sekunder mot var och en av upp till 50 på förhand positionsuppskattade reflektorer, varefter proceduren upprepas ytterligare två gånger under en satellitpassage. Noggrannheten ± 1 cm i relativ positionsbestämning synes möjlig, även i höjd. Ett liknande experiment pågår i ESAs regi benämnt SPALT (SPACE Laser Technology).

Ett motsvarande flygplansburet system finns beskrivet i korthet i Degnan (1980). Systemet har flera laserstrålar som medger simultan mätning mot sex markbaserade reflektorer. Noggrannheten uppges till ± 1 cm och systemet väntas kunna testas i fält 1984.

5.3 Hastighetsmätning satellit-satellit

Befintliga geodetiska satellitmetoder har kapacitet att bestämma de lägre gradtalen av koefficienterna i serieutvecklingen (4) av geopotentialfältet. För en mer detaljerad bestämning av jordens gravitationsfält pågår utvecklingen av satellitexperimentet GRAVSAT (GRAVity field measuring SATellite) understött av NASA. I GRAVSAT-A-experimentet är det tänkt att den relativa hastigheten mellan två lågtflygande satelliter i identiska banor skall mätas enligt dopplerprincipen. Avståndet mellan satelliterna skall vara ca 300 km. Eftersom satelliterna är försedda med DISCOS-system (se avsnitt 2.4) kommer den relativa hastigheten mellan kontrollmassorna att bero enbart av variationerna i det yttre tyngdkraftsfältet. Betecknas skillnaden i geopotential ΔW för de två satellitpositionerna blir sambandet

$$\Delta W = \bar{v} \Delta v$$

där \bar{v} är satelliternas medelhastighet i banan och Δv den relativa hastigheten mellan satelliterna. Uppmätning av Δv ger alltså direkt information om geopotentialdifferenser. Experimentet finns utförligt beskrivet i Fischell och Pisacane (1978).

Uppsändandet av GRAVSAT planeras till 1986. Den relativa rörelsen mellan satelliterna skall mätas med noggrannheten 1 $\mu\text{m/s}$ var fjärde sekund. Detta ger data varje 30 km i latitud och (för en livstid av 6 månader) data var 7 km på ekvatorn. Resultatet av denna mätkampanj skall bli en global bestämning av $1^\circ \times 1^\circ$ medel-gravitations-anomalier med noggrannheten 1-2 mGal samt en geoid noggrann till 5 cm i medeltal över 100 km. En metod för bestämning av J_{nm} -koefficienter ur GRAVSAT-data ges i Sjöberg (1981).

Även andra konfigurationer av satelliter är tänkbara för studium av tyngdkraftsfältet. Exempelvis har den geostationära satelliten ATS 6 använts i ett sådant experiment med

satelliten GEOS-3. Genom att den förra befinner sig på mycket högre höjd än den senare kan större delen av perturbationerna i avståndsdifferensen mellan satelliterna hänföras till tyngdkraftens varierande inverkan på GEOS-3.

Den europeiska rymdorganisationen (ESA) har föreslagit ett sofistikerat experiment benämnt SLALOM (Satellite LAsER Low Orbit Mission) med tre ingående satelliter för studium av tyngdkraftsfältet. Här används laserinterferometer för uppmätning av avståndsändringar av storleksordningen $10 \mu\text{m/s}$ (se Reigber, 1978).

5.4 Satellitgradiometri

Ett annat experiment aktualiserat för ESA består av två satelliter placerade 10-20 km rakt över varandra och förbundna med en ställlina. Detta system kommer att fungera som en jättelik gradiometer som via spänningen i linan känner av tyngdkraftens vertikala derivata.

Mot slutet av 80-talet kommer troligtvis särskilda gradiometrar som mäter tyngdkraftens derivata i tre vinkelräta riktningar att finnas ombord på satelliter. Den satellitburna gradiometern torde få stor betydelse för bestämning av tyngdkraftsfältets finstruktur. Många praktiska problem återstår dock innan ett sådant system kan fungera i en satellit.

6 Några tillämpningar

De rymdgeodetiska metoderna kan med fördel användas för upprättande av triangelpunkter och fotogrammetriska stöd-punkter vid kartframställningsprojekt i U-land. I länder med väl uppmätta triangelnät kan VLBI, laser- och dopplermetoder likväl användas för kontroll av nätens skala och orientering. Således skall rymdmetoderna inkluderas i den

nu förestående fas III av den europeiska triangelnätutjämnningen (RETrig).

De senaste framstegen i bestämningen av det globala tyngdkraftsfältet kan sammanfattas i följande tabell över aktuella geopotentialmodeller {jfr formel (4)}.

Tabell I. Aktuella geopotentialmodeller.

Ingående data: D = dynamiska bandata (perturbationer), Δg = terrestra tyngdkraftsdata, N = altimeterdata.

Organisation	Benämning	Fullständig till (n,m)	Ingående data	Referens
NOAA	P = 4	(15,15)	D, Δg ,N	Chovitz och Koch (1979)
SAO	SE6	(19,19)	D, Δg ,N	Gaposchkin (1979)
GRGS/SFB78	GRIM2	(30,30)	D, Δg	Balmino mfl (1976)
GSFC	GEM9	(20,20)	D	Lerch, m fl (1979)
GSFC	GEM10B	(36,36)	D, Δg ,N	Lerch, m fl (1978)

Ett av den vetenskapliga geodesins viktigaste mål är att bestämma jordens storlek och form. Mycken möda har därför lagts ned på att finna en lämplig modell (definierad genom både geometriska och fysikaliska parametrar) som kan tjäna som en lämplig referensyta för andra geodetiska och geofysiska undersökningar. Som en följd av allt noggrannare mätmetoder ställs också högre krav på referensmodellen. Modellen består vanligtvis av en rotationsellipsoid med halvaxlarna a och b och avplattningen $f = (a-b)/a$. För beräkning av tyngdkraften på modellen brukar man introducera en parameter som representerar massan (M) och dessutom en rotationsparameter (ω = vinkelhastigheten). Referensellipsoiden definieras entydigt av fyra parametrar, exempelvis (a,f,GM, ω). (Vi har här introducerat G, som är gravitationskonstanten.)

Ett annat sätt att definiera referensmodellen vore genom parametrarna $(a, J_2, \gamma_e, \omega)$, dvs f är utbytbar mot J_2 och GM mot γ_e (normalfältets tyngdkraft vid ekvatorn). Av tabell II framgår den ökade noggrannhet bestämningen av ovanstående parametrar genomgått under 1900-talet, en förbättring som till allra största delen kan tillskrivas satellitgeodesin.

Tabell II. Storlek och osäkerhet i referensjordens parametrar

Parameter	Storleks- ordning	Osäkerhet ca 1900	Osäkerhet ca 1980
a [m]	6×10^6	$1/(2 \times 10^4)$	$1/(3 \times 10^6)$
f	1/300	1/100	$1/10^5$
J_2	10^{-3}	1/100	$1/10^5$
GM [$m^3 s^{-2}$]	4×10^{14}	$1/10^4$	$1/10^7$
γ_e [$m s^{-2}$]	10	$1/(2 \times 10^4)$	$1/(2 \times 10^6)$
ω [s^{-1}]	7×10^{-5}	$1/(3 \times 10^7)^*$	$1/(3 \times 10^7)^*$

* Variationer i rotationshastighet

Det nya geodetiska referenssystemet (1980) antaget vid IUGGs möte i Canberra 1979 definieras av följande parametrar, (Bulletin Géodésique, 1980, vol 54, No 3, s 402):

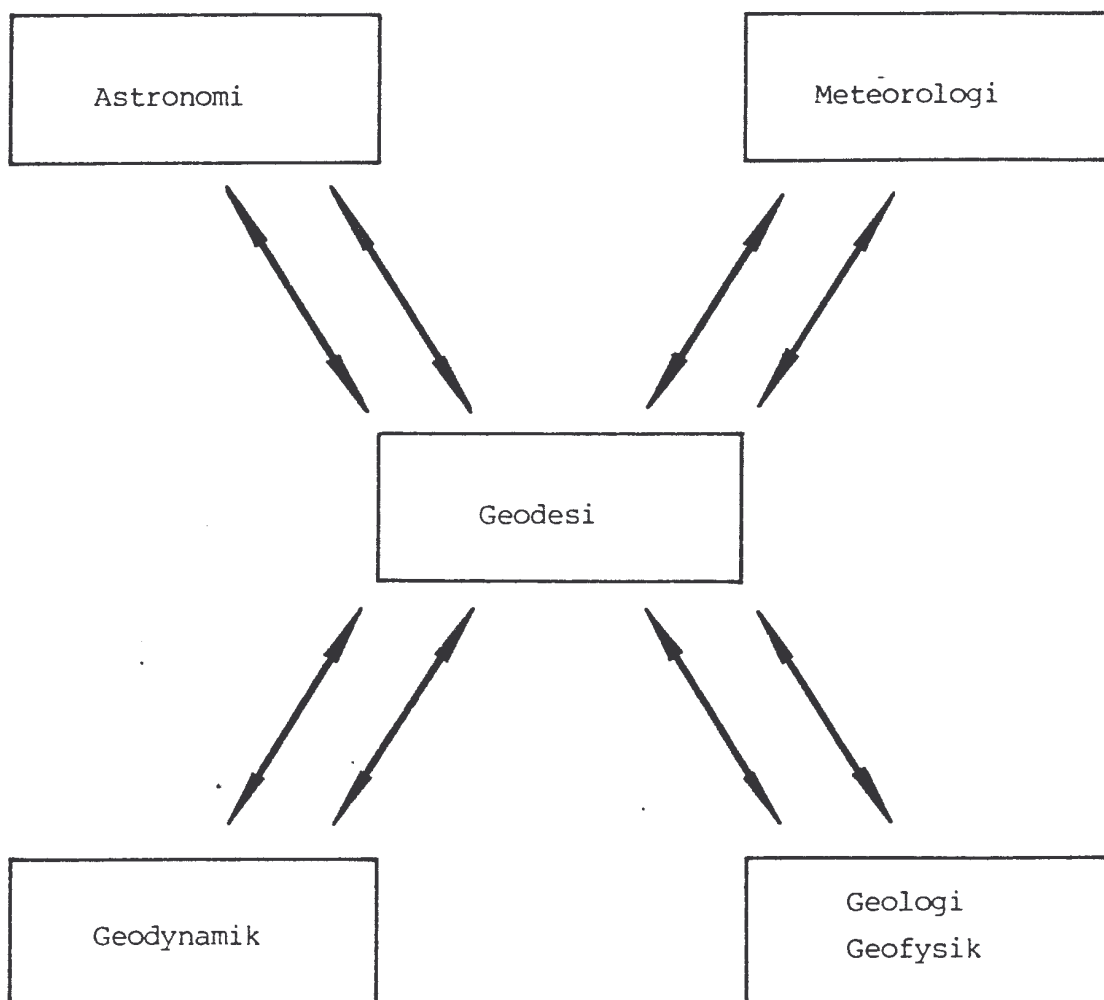
$$\begin{aligned}
 a &= 6378137 \text{ m} & f &= 1/298,257 & J_2 &= 1,08263 \times 10^{-3} \\
 GM &= 3,986005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2 & \gamma_e &= 9,780327 & \omega &= 7,292115 \times 10^{-5}
 \end{aligned}$$

Förhoppningsvis kommer detta referenssystem att stå sig flera årtionden.

Geodesin samverkar med angränsande vetenskaper (fig 10). Genom de moderna metoderna kan geodesin inte bara lösa många av sina egna uppgifter utan även ge väsentliga bidrag

Fig 10. Sambandet mellan geodesin och dess gränsområden:

Geodesin ger och tar.



TABELL III Några moderna geodetiska tillämpningar

Tillämpning	Mätmetoder, instrument
Variationer i jord- rotationen Polvandring	astronomiska metoder doppler VLBI månlaser
Tidjord	horisontalpendel gravimeter månlaser VLBI dynamisk satellitgeodesi
Körelser i jordskorpan (jordbävning, kontinental- drift, landhöjning)	el.opt avståndsmätning avvägning gravimeter VLBI laser dynamisk satellitgeodesi
Geoidbestämning Täthetsvariationer i jordens inre	gravimeter astronomiska lodavvikelser doppler, avvägning satellitaltimetri dynamisk satellitgeodesi
Isbergs och glaciärers rörelser Oljeplattformars, fyrars, öars positioner	doppler
Studium av havsströmmar	satellitaltimetri dynamisk satellitgeodesi (tyngdkraftsmätning från båtar)
Banbestämning av satelliter	doppler laser radar dynamisk satellitgeodesi
Bestämning av månbanan och månens rotation	månlaser mån-satelliternas rörelser
Bestämning av månens och planeternas topografi och tyngdkraftsfält samt dyna- miska parametrar	radar doppler dynamisk satellitgeodesi

till sina gränsområden. I tabell III ges några tillämpningar för moderna geodetiska metoder. Ett par av de viktigaste användningsområdena är studiet av mekanismer för kontinentaldriften och förutsägelse av jordbävningar. Dessa problem kan kanske lösas genom ständig rymdgeodetisk övervakning i geodynamiskt intressanta områden. Satellitmetoderna är här mycket gynnsamma dels därför att den relativa noggrannheten är hög vid mätningar över stora avstånd, dels därför att själva mätningarna är förhållandevis billiga och kan med fördel upprepas ett flertal gånger. I NASAs regi pågår fram till 1986 ett internationellt forskningsprojekt benämnt Crustal Dynamics Project (CDP). Dess målsättning är att med hjälp av rymdmetoder (främst VLBI och laser) öka vår kunskap och förståelse för kontinentaldrift och vissa regionala deformationer inom kontinenterna samt jordrotationens eventuella korrelation med jordbävningar, kontinentaldrift och andra geofysiska fenomen.

I ett annat internationellt forskningsprojekt benämnt MERIT (Monitoring Earth Rotation and Intercomparison of Techniques) skall under 1983-1984 olika instrument (optiska instrument, satellitlaser, månlaser, VLBI, doppler) mäta variationer i jordrotationen och polvandring. Syftet med projektet är dels att olika instrument skall jämföras (för bestämning av eventuella systematiska fel i mätprocedurerna), vilket bör leda till en bättre observationsteknik i framtiden, dels att öka vår kunskap om (orsaken till) variationerna i jordrotationen, "Universal Time" och polvandringen.

Sammanfattningsvis kan sägas att de rymdgeodetiska metoderna har på en kort tid revolutionerat den högre geodesin och vår kunskap om jordens storlek, form och tyngdkraftsfält. Satellitmetoderna kommer säkerligen att få stor inverkan även på den tekniska geodesin (dvs geodetisk verksamhet på regional och lokal nivå). Dessutom har geodesins möjligheter att bistå sina gränsområden förstärkts avsevärt.

Referenser

- ANDERLE, R J: Application of NAVSTAR GPS geodetic receiver to geodesy and geophysics, *Annales de Géophysique*, Vol 37, nr 1, 1981.
- ANDERSON, A J och H-G SCHERNECK: *The geoid of the Baltic and Gulf of Bothnia obtained from SEASAT altimeter data*, Uppsala Universitet, Avdelningen för geodesi, rapport nr 10, 1981.
- ASHKENAZI, V och R J GOUGH: *Determination of Position by Satellite Doppler*, University of Nottingham: 1975.
- BALMINO, G, C H REIGBER och B MOYNOT: *The GRIM 2 Earth Gravity Field*, Deutsche Geodätische Kommission, A 86 (34), 1976.
- BERTOTTI, B: Twin Probes for Space Geodesy, *Il Nuovo Cimento*, vol 1 C, nr 4, 1978.
- BROWN, D: Doppler Positioning by the Short Arc Method, *Proceedings of the International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning*, Las Cruces, New Mexico, 1976 a.
- BROWN, D: Doppler Surveying with the JMR-1 Receiver, *Bulletin Géodésique*, vol 50, s 9-25, 1976 b.
- BOSSLER, J D och GOAD, C C: Using the Global Positioning System (GPS) for Geodetic Positioning, *Bulletin Géodésique*, vol 54, s 553-563, 1980.
- CHOVITZ, B H och K R KOCH: Combination solution for gravity field including altimetry, *Journal of Geophysical Research*, vol 84, 1979.

- CAMPBELL, J: Monitoring Crustal Dynamics in Seismotectonic Zones by Very Long Baseline Interferometry, in *Terrestrial and Space Techniques in Earthquake Prediction Research*, vol 1, sammanställd av A Vogel, Friedr Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1979.
- CAMPBELL, J och B WITTE: Grundlagen und geodätische Anwendung der Very Long Baseline Interferometry (VLBI), *Zeitschrift für Vermessungswesen*, nr 1, 1978.
- DEGNAN, J J: Airborne Laser Ranging System, *CSTG Bulletin*, nr 2, 1980.
- FISCHELL, R E och V L PISACANE: A Drag-Free Low-Low Satellite System for Improved Gravity Field Measurements, *Proceedings of the 9th GEOP Conference*, OSU Report nr 280, 1978.
- GAIGNEBET, J: Etat actuel de l'expérience LASSO, *Annales de Géophysique*, vol 37, nr 1 1981.
- GAPOSCHKIN, E M: Global gravity field to degree and order 30 from GEOS 3 satellite altimetry and other data, *Center for Astrophys Prep, Series 1092*, 1979.
- GRAFAREND, E och K HEINZ: Rank defect analyses of satellite geodetic networks II, dynamic mode, *Manuscripta Geodetica*, 1978.
- GRAFAREND, E och E LIVIERATOS: Rank defect analyses of satellite geodetic networks I, geometric and semi-dynamic mode, *Manuscripta Geodetica*, 1978.
- HEISKANEN, W A och H MORITZ: *Physical Geodesy*, W H Freeman and Company, San Fransisco, 1967.

- HERRING, T A, B E COREY, C C COUNSELMAN, I I SHAPIRO,
B O RÖNNÄNG, O E H RYDBÄCK m fl: Geodesy by
Radio Interferometry: Intercontinental Distance
Determinations with Subdecimeter Precision,
Journal of Geophysical Research, vol 86, nr B3,
s 1647-1651, 1981.
- HIRVONEN, R A: *Adjustment of satellite triangulations*,
Hawaii Institute of Geophysics, 68, 20, 1968.
- KAKKURI, J: *Stellar Triangulation with Balloon - Borne
Beacons*, *Annales Academiae Scientiarum Fennicae*,
Serie A, nr 113, 1973.
- KAKKURI, J och K KALLIOMÄKI: *Photoelectric time micrometer*,
Publications of the Finnish Geodetic Institute,
nr 74, 1972.
- KAULA, W M: *Determination of the Earth's Gravitational Field*,
Reviews of Geophysics, vol 1, nr 4, 1963.
- KOCH, K R: *Earth's Gravity Field and Station Coordinates
From Doppler Data, Satellite Triangulation and
Gravity Anomalies*, NOS 62, 1974.
- KUMAR, M och MUELLER, I: *Detection of Crustal Motion using
Spaceborne Laser Ranging Systems*, *Bulletin Géo-
désique*, vol 52, nr 2, 1978.
- LERCH, F, S KLOSKO, R LAUBSCHER och C WAGNER: *Gravity Model
Improvement Using GEOS-3 (GEM 9 and 10)*, *Journal
of Geophysical Research*, vol 84, 1979.
- LERCH, F, C WAGNER, S KLOSKO, R BELOTT, R LAUBSCHER och
W TAYLOR: *Gravity Model Improvement Using GEOS-C
Altimetry (GEM 10 and GEM 10 B)*, rapport presen-
terad vid AGU Spring Annual Meeting i Miami, 1978.

- NES, H, T HAGFORS och G STETTE: A Very Long Baseline Interferometry Experiment with Mobile Equipment, *Zeitschrift für Vermessungswesen*, nr 6, 1979.
- NIELL, A E, R F MacDORAN, K M ONG m fl: Mobile Radio Interferometric Geodetic Systems, i *Terrestrial and Space Techniques in Earthquake Prediction Research*, sammanställd av A Vogel, Friedr Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1979.
- PARKINSON, B W: Global Positioning System (NAVSTAR), *Bulletin Géodésique*, vol 53, s 89-108, 1979.
- REIGBER, Ch: Improvements of the Gravity Field from Satellite Techniques As Proposed to the European Space Agency, *Proceedings of the 9th GEOP Conference*, OSU Report nr 280, 1978.
- RUMMEL, R, L SJÖBERG och R H RAPP: *The Determination of Gravity Anomalies from Geoid Heights*, OSU Report nr 269, 1977.
- SJÖBERG, L: *On The Recovery of Geopotential Coefficients using Satellite-to-Satellite Range - Rate Data on a Sphere*. LMV, Gävle 1981, (Artikeln godkänd för publicering i *Bulletin Géodésique*, 1981.)
- SCHMID, H H: *Three-Dimensional Triangulation With Satellites* NOAA Professional Papers 7, 1974.
- SCHWARTZ, C R: *The Use of Short Arc Orbital Constraints in the Adjustment of Geodetic Satellite Data*, OSU Report nr 118, 1969.
- SEEGER, H: Possibilities and Limitations of Doppler Positioning in Geodynamics, i *Terrestrial and Space Techniques in Earthquake Prediction Research*, sammanställd av A Vogel, Friedr Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1979.

SMITH, D E: Spaceborne Ranging System, *Proceedings of the 9th GEOP Research Conference*, OSU Report nr 280, 1978.

STANSELL, T A: *The TRANSIT Navigation Satellite System: Status, Theory, Performance and Applications*, Magnavox Co, 1978.

OSU Report = Report of the Department of Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio.