

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

LUCHTVAART- EN RUIMTEVAARTTECHNIEK



TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

AFDELING DER LUCHTVAART- EN RUIMTEVAARTECHNIEK

Memorandum M-333

SATELLIETBANEN EN GEOFYSISCH ONDERZOEK

dr.ir. L. Aardoom

ir. K.F. Wakker

Samenvattingen van twee voordrachten,
gehouden op 23 maart 1979 voor de
Sectie Mechanica van het Koninklijk
Instituut van Ingenieurs (KIVI)

Mei 1979

Delft - Nederland

Satellietgeodesie

dr.ir. L. Aardoom, Afdeling der Geodesie

De eerste hoofdtaak van de geodesie is de onderlinge plaatsbepaling van punten op aarde. Als klassieke grondslag voor geodetische metingen dient een 2-dimensionaal driehoeksnet (triangulatie) over het aardoppervlak. De maximaal bereikbare zijdelengte van de driehoeken is ca. 50 km, zodat bredere wateren (zeeën, oceanen) op deze wijze niet kunnen worden overbrugd. Worden satellieten als hulppunten in de ruimte gebruikt, dan bieden zij de gelegenheid tot het leggen van een wereldwijd, ruimtelijk (3-dimensionaal) meetkundig verband. Toen satellieten nog niet ter beschikking waren, ontleende de geodesie de 3^e dimensie (de hoogte) aan metingen van het aardse gravitatieveld. Het doen van zwaartekrachtmetingen over het gehele aardoppervlak is echter een moeizaam werk en de satellieten boden al dadelijk (omstreeks 1960) een welkome aanvullende geodetische mogelijkheid.

De satellietgeodesie is thans een discipline van de ruimtegeodesie: het gebruik van hulppunten in de buitenaardse ruimte ten behoeve van de geodesie.

Laser-afstandmeting naar satellieten vanaf grondstations is een belangrijke satellietgeodetische techniek. Hiervoor bestaan diverse, met speciale spiegels (retroreflectoren) uitgeruste satellieten, b.v.: Geos 3, Starlette, Lageos, Seasat 1. Door vanaf vier of meer punten op aarde (stations) gelijktijdig de afstanden naar een satelliet te meten kunnen, na herhaald meten, de onderlinge afstanden tussen die vier punten worden berekend. Dit is een voorbeeld van meetkundige satellietgeodesie, waarbij de dynamica van de satellietbaan is geëlimineerd. De afstanden tot de satellieten worden bij de laserafstandmeting afgeleid uit de gemeten looptijd, heen en terug, van een op het station uitgezonden korte (enkele nanoseconden), intensieve (b.v. 1 J), zeer monochromatische laserlichtpuls.

Zulke metingen worden sedert de zomer van 1976 uitgevoerd op het T.H. Observatorium voor Satellietgeodesie te Kootwijk. De meetprecisie is

thans (mei 1979) ongeveer 20 cm, standaardafwijking. In de loop van 1979 zal de meetprecisie worden verbeterd tot ongeveer 10 cm. Het station te Kootwijk maakt deel uit van een Europees netwerk dat uiteindelijk een tiental stations gaat omvatten. Het Kootwijkse station is thans een van de best-werkende in dit netwerk. Het werk te Kootwijk wordt verricht door de Werkgroep Satellietgeodesie, één van de vier werkgroepen van de Nederlandse Commissie voor Geofysica en Ruimteonderzoek (GROC). Deze werkgroep is organisatorisch een deel van de T.H. Afdeling der Geodesie. Buiten Europa zijn er een twintigtal stations; de besten daarvan zijn enkele Amerikaanse, met een precisie van 5 à 10 cm. Laser-afstandmeting is overigens slechts één van de voor de geodesie gebruikelijke satellietmeettechnieken, zij het de thans meest preciese. Naast station-naar-satelliet technieken zijn er b.v. ook inter-satelliet technieken.

De eerder geschetste meetkundige methode in de satellietgeodesie is niet de meest praktische. Immers de metingen moeten daarbij gelijktijdig vanaf meerdere stations worden verricht, hetgeen vaak door weersomstandigheden wordt verhinderd. Daarom zijn in de satellietgeodesie niet-gelijktijdige baanmethoden in gebruik, waarbij de dynamica van de satelliet noodzakelijkerwijze een rol speelt. Daarom is voor de Werkgroep Satellietgeodesie de sinds enkele jaren bestaande samenwerking met de Sectie Baanmechanica van Ruimtevoertuigen van de T.H. Afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, een zeer welkome.

De baan van een satelliet wordt in overwegende mate beheerst door het aardse gravitatieveld, dat zoals reeds opgemerkt, in de geodesie zulk een essentiële rol speelt. Het gravitatieveld wordt in de geodesie beschreven door een oneindige reeks van Bolyfuncties. Het gravitatie-equipotentiaalvlak op gemiddeld zeeniveau heet geoid. De langgolvlige structuur van het gravitatieveld (golflengte > 2000 km) wordt gevonden door analyse van nauwkeurig bepaalde satellietbanen. Voor verdere detaillering is peiling, vanaf satellieten, van het ware zeeniveau (tot op enkele meters na de geoid) toegepast. Dit gebeurt met radarhoogtemeting (precisie: beter dan 20 cm) vanuit speciale satellieten (Geos 3, Seasat-1). Op beide satellieten zijn vanaf Kootwijk laser-afstandmetingen verricht. Deze metingen vormen een belangrijke bijdrage tot de noodzakelijke zeer nauwkeurige baanbepaling van de satellieten, en dus op in-

directe wijze tot de bepaling van het ware zeeniveau, dat dan bij benadering de geoid is. Het verschil zeeniveau - geoid dient oceanografisch te worden geïnterpreteerd in termen van drukverschillen, stromingen, enz. Opgemerkt mag worden dat vóór de laser-afstandsmeting met kleine bundeldivergentie de baan van de satelliet bij benadering bekend moet zijn; ook bij deze baanvoorspelling is de eerder bedoelde samenwerking tussen beide T.H.-groepen een vruchtbare gebleken.

Een andere methode ter verdere detaillering van het gravitatieveld (tot golflengten > 500 km) is direkte relatieve versnellingsmeting tussen twee naburige satellieten.

Belangrijke ontwikkelingslijnen van de laser-afstandsmeting vanaf grondstations zijn de verbetering van de meetprecisie en de opvoering van de verplaatsbaarheid van de grondapparatuur. De te bereiken precisie ontwikkelt zich tot ongeveer 3 cm, verwacht in het begin van de 80-er jaren. Deze precisiegrens is kritisch voor het meten van de aardkorst-deformaties in regionaal en wereldwijd verband. Deze precisieontwikkeling geeft dan aanleiding tot de ontwikkeling van de satellietgeodesie tot satelliet-geodynamica. Geodynamica is de dynamica van het aarde-maan-stelsel, in zijn variëteit van aspecten. Een eigentijds aspect daarbij is de onderlinge beweging van aardchollen, volgens de hypothese van de aardschollen-tectoniek uit de geofysica. De direkte meting van de veronderstelde geringe onderlinge snelheden van hoogstens 15 cm/jaar is een bijdrage verwacht van de geodesie.

Ruimte-technieken, ook de laser-afstandsmeting naar satellieten, zijn daarbij veelbelovend. Het leveren van een bijdrage met de Nederlandse laser-afstand meetapparatuur geniet grote aandacht in het genoemde T.H.-samenwerkingsverband. Gehoopt wordt dit werk in een later stadium te kunnen doen aansluiten bij het geofysisch onderzoek dat elders in Nederland wordt verricht. De aardschollen-tectoniek ontleent zijn eigentijds karakter aan een zoeken naar methoden om aardbevingen te voorspellen. Dit zoeken geniet alom grote belangstelling.

Met het oog hierop bestaat het streven de meetprecisie van de laserinstallatie te Kootwijk in 1979 te verbeteren tot 10 cm en daarna nieuwe apparatuur te ontwikkelen met een precisie van 3 à 5 cm in 1983. Bovendien wordt ernaar gestreefd de nieuwe apparatuur door een grotere

mate van transportabiliteit, elders, b.v. in potentiële aardbevingszônes, inzetbaar te maken. De apparatuur zou dan kunnen worden ingebracht in een internationale en interdisciplinaire onderneming en kunnen werken naast andersoortige apparatuur om aardkorst-deformaties te meten, ten dele langs geodetische weg.

Het ontwikkelen en inzetten van de laser-afstandmeetapparatuur zal gepaard moeten gaan met het ontwikkelen en toepassen van verwerkingsmethoden voor de metingen, uiteindelijk gericht op het detecteren van aardkorst-deformaties. De deformaties zullen worden afgeleid door statistisch toetsen van op geofysische gronden te formuleren deformatiehypothesen. Geodetisch bezien is de hypothese dan de veronderstelling dat het geodetische netwerk tussen herhalingsmetingen, gespreid over weken, maanden of jaren, is vervormd.

De toe te passen methode van satellietgeodetische netwerkbevestiging is een baanmethode, waarin het T.H.-samenwerkingsverband onontbeerlijk is. De lengte van de beschouwde baanstukken (gemeten in tijd) zal worden beperkt tot enkele omlopen van de satelliet of tot maximaal enkele dagen, teneinde de af te leiden geodetische resultaten, b.v. interstations-afstanden, zo precies en zo betrouwbaar mogelijk te vinden. Gestreefd zal moeten worden naar een zo scherp mogelijke interpreteerbaarheid van de resultaten. Zo al betrouwbare deformaties kunnen worden gevonden, zullen dit aanvankelijk (maar dit zal nog wel enkele jaren duren) alleen de grootste (b.v. 10 cm/jaar) zijn; eerst later zullen, hopelijk, kleinere snelheden (b.v. 3 cm/jaar) kunnen worden gedetecteerd.

Baanberekening van satellieten

ir. K.F. Wakker, Afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek

Het is algemeen bekend dat de baan van een satelliet om de aarde bij benadering als een ellips mag worden beschouwd, een zgn. Keplerbaan, waarvan de vorm, grootte en stand in de ruimte niet veranderen. De stand van het baanvlak t.o.v. een geocentrisch niet-draaiend assenstelsel kan door twee hoeken worden vastgelegd. Voor de beschrijving van de orientatie van de ellips in het baanvlak is een derde hoek nodig. Vorm en grootte van de ellips kunnen met twee parameters worden vastgelegd. Om de positie van de satelliet in zijn baan te bepalen is een zesde parameter nodig. Deze zes parameters, die in wezen de zes integratie konstanten van de bewegingsvergelijking voor een Keplerbaan zijn, worden de (klassieke) baanelementen genoemd.

Ten gevolge van allerlei op de satelliet werkende stoorkrachten zal de werkelijke baan van de satelliet afwijken van de geïdealiseerde Keplerbaan. De werkelijke positie en snelheid van de satelliet definieren op elk moment een denkbeeldige momentane Keplerbaan. Deze zgn. osculerende baan raakt in het punt waar de satelliet zich bevindt aan de werkelijke baan. De baanelementen van de osculerende baan variëren onder invloed van de stoorkrachten met de tijd.

Voor vele toepassingen op het gebied van de baanberekening van satellieten wordt de baan bij voorkeur niet beschreven door de componenten van de toestandsvektor (positie en snelheid) maar door de osculerende baanelementen.

De belangrijkste stoorkrachten die op een satelliet werken zijn het gevolg van: de niet-radiaal-symmetrische massaverdeling van de aarde, de luchtweerstand, de aantrekking door zon en maan en de stralingsdruk van het zonlicht.

Voor het berekenen van de stoorkrachten t.g.v. de niet-bolvorm van de aarde wordt gebruik gemaakt van een beschrijving van het aardse gravitatieveld d.m.v. een reeks in Legendre-polynomen (en toegevoegde Legendre-funkties). Uit de beschikbare modellen blijkt dat de bijdrage van

de eerste term in deze reeks (J_2) ongeveer duizend maal zo groot is als de bijdrage van elke volgende term, en dat de grootte-orde van opeenvolgende termen in de reeks niet snel monotoon afneemt. Voor eerste-orde berekeningen kan daarom volstaan worden met alleen de bijdrage van de eerste term (J_2) in rekening te brengen; voor meer precieze berekeningen moeten gelijk de effecten van een hele serie termen in rekening worden gebracht. Voor baanberekeningen t.b.v. geodetische toepassingen, waar een nauwkeurigheid van enige meters of beter wordt geeist, zullen dan ook enige honderden termen uit deze reeks moeten worden meegenomen.

De belangrijkste veranderingen die de satellietbaan onder invloed van de niet-bolvorm van de aarde ondergaat zijn een monotone verandering (seculair) van de stand van het baanvlak om de poolas, en van de oriëntatie van de ellipsbaan in het baanvlak. Voor satellieten in lage banen kan het baanvlak b.v. tot 8° /dag om de poolas roteren. Voor vele satelliet-missies wordt dankbaar gebruik gemaakt van deze verstoring. Door een geschikte keuze van de stand van het baanvlak kan voor een gegeven baanhoogte een situatie worden bereikt waarin het baanvlak 1° /dag in oostelijke richting om de poolas roteert. Voor dergelijke zonsynchrone banen is het b.v. mogelijk dat de satelliet gedurende lange tijd achtereen continu in het zonlicht verblijft, hetgeen voor de energievoorziening d.m.v. zonnecellen erg aantrekkelijk kan zijn.

De luchtweerstand is een lastig te modelleren kracht op de satelliet. Een belangrijke parameter in de atmosfeer-modellen die worden gebruikt om de luchtdichtheid ter plaatse van de satelliet te berekenen is de zgn. zonne-activiteit. Op een hoogte van 400 km varieert de gemiddelde luchtdichtheid met een faktor 100 over de 11-jaarlijkse zonnecyclus. Daarop gesuperponeerd zijn dan nog kortdurende heftige fluktuaties t.g.v. zonneuitbarstingen. Voor baanvoorspellingen moet gebruik worden gemaakt van modellen voor de te verwachten zonneactiviteit. Deze modellen zijn momenteel nog zeer onbetrouwbaar. Het was deze slechte voorspelbaarheid van de luchtdichtheid die de beperkende faktor was voor de nauwkeurigheid van de baanvoorspellingen voor de Astronomische Nederlandse Satelliet (ANS), die gedurende de periode 1974-1977 door de Sectie Baanmechanica van Ruimtevoertuigen aan de Afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek werden verricht. Om de invloed van luchtkrachten klein te houden worden

geodetische satellieten, waarvan de baan juist heel nauwkeurig berekend moet kunnen worden, dan ook bij voorkeur in een niet te lage baan gebracht (> 700 km) en worden zij veelal als kleine, relatief zware bollen uitgevoerd.

Bij baanvoorspellingen worden de positie en snelheid (of de osculerende baanelementen) van de satelliet op een begintijdstip bekend verondersteld. Omdat de bewegingsvergelijkingen voor gestoorde satellietbanen niet analytisch gesloten oplosbaar zijn kunnen voor het berekenen van de baan twee wegen worden bewandeld. De desbetreffende differentiaalvergelijkingen worden numeriek geïntegreerd of er worden benaderende analytische oplossingen gebruikt. De eerste methode lijkt erg simpel, doch is dat in de praktijk zeker niet. Om voor baanvoorspellingen over vele omlopen toch een goede nauwkeurigheid te behouden moet in een groot aantal significante cijfers worden gerekend en moeten zeer efficiënte, nauwkeurige en stabiele integratie-processen worden toegepast. Een rekenprogramma dat geheel op numerieke integratie berust en waarmee de invloed van vele stoorkrachten nauwkeurig in rekening kan worden gebracht is al sinds enige jaren operationeel bij de Sectie Baanmechanica en verricht goede diensten als referentie om de waarde van analytische methoden aan te toetsen.

Een probleem dat zich bij praktische baanberekeningen altijd voordoet is de vraag welke stoorkrachten nog moeten worden meegenomen om een bepaalde nauwkeurigheid te bewerkstelligen. Dit is een lastig probleem waar op voorhand weinig over te zeggen valt. Maatgevend hierbij is hoe de grootte, maar vooral ook de richting van de stoorkrachtsvektor op de satelliet met de tijd varieert. Wanneer deze vektor langere tijd in dezelfde richting werkt kunnen de effecten van op het oog erg kleine stoorkrachten toch onverwacht groot zijn.

Het grote voordeel van de benaderende analytische theorieën voor gestoorde satellietbanen is dat zij rekentechnisch erg snel zijn, en dat zij veelal een duidelijk fysisch inzicht kunnen geven in het gedrag van satellietbanen. Een groot nadeel is dat de analytische relaties die de gestoorde baan beschrijven voor de hogere-orde theorieën zeer omvangrijk zijn. Een belangrijk probleem vormt ook de vraag in hoeverre een

samenstel van analytische theorieën voor verschillende typen stoor-krachten de werkelijkheid nog benaderd. In het algemeen kan dan ook worden gesteld dat puur analytische technieken zowel een grote rol spelen voor eerste-orde "engineering" berekeningen als voor berekeningen waar het om redelijk hoge nauwkeurigheden gaat. Voor baanberekeningen waar het om een nauwkeurigheid van meters of minder gaat zal het gebruik van numerieke integratie processen onvermijdelijk blijven.

Voor de positievoorspelling van de geodetische satellieten waaraan vanuit Kootwijk laser-afstandmetingen worden verricht kan nog worden gebruik gemaakt van analytische technieken, zij het dan dat hierbij vele hogere-orde storingen in rekening moeten worden gebracht. Sinds 1976 is er een dergelijk programma operationeel en wordt het door de Werkgroep Satellietgeodesie gebruikt om de nauwe laserbundel op de met het blote oog veelal onzichtbare satellieten te kunnen richten. Voor positievoorspellingen van drie satellieten gedurende alle passages over Kootwijk voor een periode van een week in de toekomst verbruikt dit programma ca 12 minuten rekentijd op de IBM 370/158 computer van de TH-Delft. De positievoorspellingen hebben daarbij gemiddeld een nauwkeurigheid van beter dan 3 boogminuten (topocentrische hoekmaat).

Het doel van een baanbepaling is om uit waarnemingen van de beweging van een satelliet de positie en snelheid van de satelliet, of de osculerende baanelementen, op een bepaald referentie-tijdstip te bepalen. Hiermee beschikt men dan over de beginvoorwaarden van een volgende baanvoorspelling. Nu is het zo dat het niet mogelijk is op een gegeven tijdstip 1 meting te verrichten die de complete positie en snelheid van de satelliet vastlegt. Het is daarom noodzakelijk een aantal metingen, b.v. laser-afstandmetingen, op verschillende tijdstippen te gebruiken en daarbij in rekening te brengen dat de baan over het tijdsinterval waarvoor waarnemingen beschikbaar zijn, gestoord is. Een moeilijkheid die hier nog bij optreedt is dat zowel de metingen als de modellen voor de gestoorde baan nog met fouten zijn behept.

Voor de baanbepaling kunnen nu twee wegen worden bewandeld: de metingen worden of sequentieel verwerkt, waarbij na het verwerken van steeds meer metingen de baan steeds beter wordt bepaald, of de metingen worden alle tegelijk (batch) verwerkt.

Voor de sequentiele verwerking loopt er binnen de Sectie Baanmechanica momenteel een onderzoek naar de toepasbaarheid van Kalman filters. Mogelijk zal in de toekomst een programma op basis van een dergelijk Kalman filter in vrijwel "real-time" verwerking kunnen worden gebruikt om de laser tijdens de passage van de satelliet over Kootwijk op basis van de laatste afstandmetingen bij te sturen.

De meest gebruikte techniek voor de baanbepaling is echter een batch-verwerking van alle waarnemingen tegelijk. Het principe van een dergelijke baanbepaling is eenvoudig. Allereerst wordt een schatting gemaakt van de toestand van de satelliet op het referentie-tijdstip. Met behulp van het model voor de gestoorde baan wordt nu berekend wat de "waarnemingen" op de andere tijdstippen zouden moeten zijn. Deze berekende waarden zullen in het algemeen niet overeenkomen met de werkelijke metingen en leiden tot zgn. residuen. Het is nu de taak van het iteratieve zoekproces deze residuen zo klein mogelijk te maken en aldus een baan te leveren die zo goed mogelijk met de waarnemingen overeen komt.

Een dergelijk baanbepalingsprogramma, gebaseerd op analytische theorieën voor de baanverstoringen t.g.v. de niet-bolvorm van de aarde en t.g.v. de luchtweerstand is sinds medio 1977 bij de Sectie Baanmechanica operationeel. In de meest recente versie is het programma b.v. in staat uit laser-afstandmetingen gedurende vier passages van een satelliet op twee achtereenvolgende dagen over Kootwijk de baan van de satelliet zodanig te bepalen dat deze berekende baan voor het gehele tijdsinterval minder dan 200 m afwijkt van de werkelijke baan. Dit soort nauwkeurigheden is erg hoog wanneer het om baanbepalingen gaat t.b.v. de operaties van satellieten. Voor geofysisch onderzoek is deze nauwkeurigheid echter nog niet voldoende, en moet men zijn toevlucht zoeken tot numerieke integratietechnieken voor de dynamika van de satelliet en tot verfijnde statistische methoden voor het schatten van de parameters.

met is daarbij ook mogelijk het proces van de baanbepaling uit te breiden, waarbij als de te-bepalen parameters niet alleen de baanparameters op een referentie-tijdstip worden beschouwd, maar ook station-koordinaten en parameters in de stoorkrachtmodellen. Zo kunnen uit laser-afstandmetingen b.v. luchtdichtheden in de atmosfeer of konstanten in de reeksontwikkeling voor

de gravitatie-potentiaal worden bepaald.

Medio juni 1979 zal een begin worden gemaakt met de implementatie op de TH-computer van een geavanceerd programmapakket dat speciaal voor dit doel in de V.S. is ontwikkeld: het GEODYN/ORAN rekenpakket. Dit pakket zal een essentieel stuk gereedschap gaan vormen in het samenwerkingsverband tussen de Werkgroep Satellietgeodesie en de Sectie Baanmechanica van Ruimtevoertuigen. Deze samenwerking, die al van 1975 dateert, is voor het onderzoek naar de baanberekening van satellieten bijzonder vruchtbaar omdat de verschillende theorieën en technieken aan echte waarnemingen, zoals die in Kootwijk worden verricht, kunnen worden getoetst, en omdat de eisen die voor geofysisch onderzoek aan de baanberekening worden gesteld extreem hoog zijn. Het moeten voldoen aan deze eisen werkt zeer stimulerend en komt de kwaliteit van het onderzoek ten goede.

Memorandum 333



60142081082