

Laserafstandmeter voor satellieten

Laserafstandmeter meet beweging aardkorst op een cm nauwkeurig

H. Visser en B.A. van der Zwan

Onze aardkorst beweegt en gehele continenten verschuiven ten opzichte van elkaar. Deze bewegingen zijn in de orde grootte van enkele millimeters tot centimeters per jaar. Om deze bewegingen goed in kaart te brengen is het noodzakelijk nauwkeurig de beweging van de aardkorst te meten op plaatsen die tienduizenden kilometers van elkaar verwijderd zijn. De afstanden moeten daartoe met een nauwkeurigheid van circa 1 cm bepaald worden. De laser afstandmeettechniek via satellieten biedt deze mogelijkheid. In opdracht van het Duitse Institut für Angewandte Geodäsie is door TNO-TPD ontwikkelde mobiele laserafstandmeter voor satellietgeodesie. De werking en constructie worden hier uitgelegd.

Laserafstandmeter (LAM)

Over de hele aarde wordt de afstand naar verschillende satellieten door een aantal LAM-stations gemeten. Hierdoor is geleidelijk een netwerk ontstaan waarmee de afstand van bijvoorbeeld Amsterdam-Sidney met een nauwkeurigheid van circa 2 cm kan worden bepaald.

Het meetprincipe is eenvoudig: op een zeker tijdstip wordt een laserpuls van enkele milli-Joules weggeschoten naar een met retroreflectoren uitgeruste satelliet. De retroreflector (speciale reflector die willekeurig invallende stralen reflecteert in de richting van de zender) op de satelliet kaatst de puls terug naar de LAM. Daar wordt het tijdstip van terugkeer van de puls

nauwkeurig gemeten met behulp van een detector. De snelheid van het laserlicht is bekend, zodat de tijd die de lichtpuls onderweg was (looptijd) bepalend is voor de afstand tussen de LAM en de satelliet. Een correctie voor de afgelegde afstand in de atmosfeer is hierbij noodzakelijk, maar deze kan voldoende nauwkeurig worden berekend aan de hand van een model waarin hoofdzakelijk de verandering van de luchtdruk, die nauwkeurig wordt gemeten, van belang is.

Een satelliet laserafstandmeter bestaat zodoende uit een pulslaser, een telescoop, een detector, een nauwkeurig tijdmeetsysteem en een aantal satellieten die voorzien zijn van retroreflectors. Het ontvangen signaal is erg zwak, in de orden van enkele fotonen, wat hoge optische eisen aan de telescoop stelt.

Tabel 1 geeft van een aantal satellieten waarop gemeten wordt met de vermelding van de gemiddelde hoogte van hun baan. Sommige satellieten zijn speciaal bedoeld voor geodetische doeleinden, andere zijn voorzien van een retroreflector zodat zij kunnen worden opgenomen in het net van geodesiemetingen en de

Naam satelliet	Afstand in km	Retroreflector diam. in cm	Doel van de afstandsmeting
ERS-2	780	10	Bepaling baan
Lageos	7.000	60	Geodetisch
Glonass	20.000	70	Geodetisch
Maan	384.000	100	Fundamenteel onderzoek

Tabel 1. Satellieten die met een laserafstandmeter gemeten worden en hun afstand tot het aardoppervlak.

Laserafstandsmeter meet beweging aardkorst op een cm nauwkeurig

baan van de satelliet nauwkeurig bekend wordt. Ook op de maan zijn een aantal retroreflectors geplaatst. Hierop wordt met laserafstandsmeters gemeten, hoofdzakelijk om fundamenteel onderzoek te doen naar onder andere gravitatie golven.

Omdat een LAM een betrekkelijk kostbaar en complex instrument is, zijn er slechts een beperkt aantal landen die er een hebben. Weinig van die landen bevinden zich op het zuidelijk halfrond, waar dan ook een 'gat' in meetnet zit. Om dit gat te vullen laat het Duitse

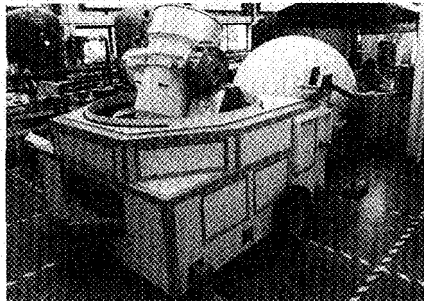
instituut voor Geodesie een transportabel meetstation ontwikkelen dat diverse geodetische technieken gecombineerd kan toepassen. Het station, dat bestaat uit een vijftal containers van 12 meter lengte, gaat op diverse locaties op het zuidelijk halfrond metingen verrichten met intervallen van ongeveer een jaar. Een onderdeel is het laserafstandmeetsysteem dat onder verschillende klimatologische omstandigheden op diverse locaties kan werken tussen $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

De telescoop

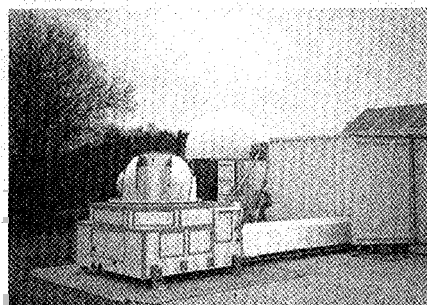
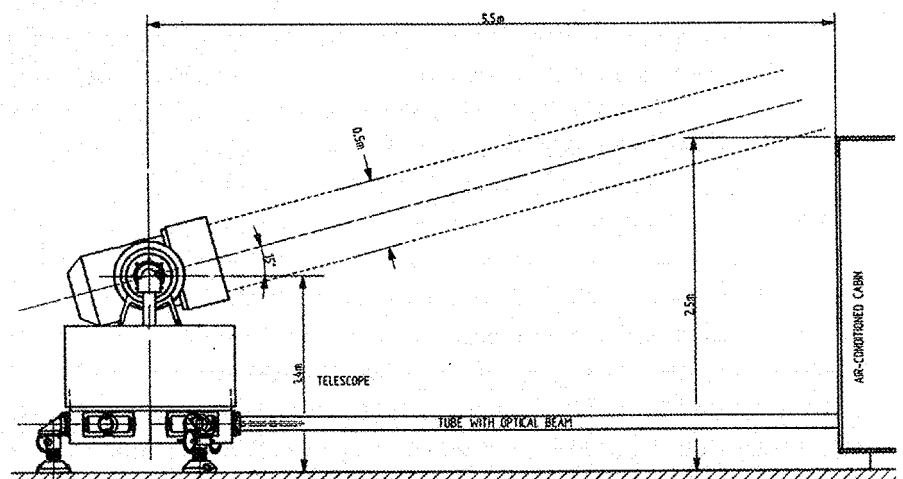
Het optisch gedeelte van de laserafstandsmeter bestaat uit de volgende elementen:

- een Coudé telescoop in een elevatie over azimutconfiguratie (horizontale mechanische as op verticale as), deze is gemonteerd op een kar, zie figuur 1;
- een titanium-saffierlaser met twee golflengten (847 nm 30 mJ+ 423,5 nm 30 mJ). Dit is de eerste LAM die simultaan zal meten bij

Figuur 1. LaserAfstandsmeter (LAM) voor het meten van de afstand tot satellieten op de centimeter nauwkeurig, ontworpen en gebouwd door TNO-TPD te Delft.



Figuur 2. Schematisch beeld van de opstelling. De telescoop staat op een afstand van 5,5 m van de container waarin de laser zit, samen met de ontvanger die meet hoelang een laserpuls onderweg is geweest.



Figuur 3. Beeld van de telescoop in bedrijf.

- deze twee golflengten;
- een zend/ontvang optischsysteem, dat de verbinding vormt tussen laser en telescoop / telescoop en detectors, hierna de T/R-unit (Transmit/Receive) genoemd.

Voor transport worden alle onderdelen van de LAM ondergebracht in een twaalf meter contai-

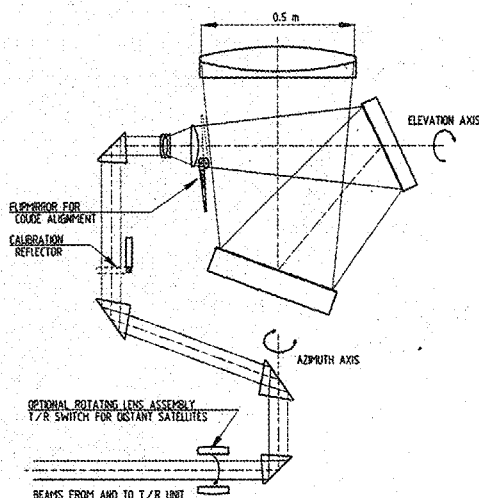
ner. Bij de installatie van het systeem op een meetplateau, wordt de telescoop uit de container gereden. De bolle kap bovenop de kar dient om de telescoop bij slechte weersomstandigheden te beschermen.

De figuur 2 geeft een schematisch beeld van de opstelling. Figuur 3 geeft een beeld van de telescoop in bedrijf. Tijdens de meting staat de telescoop op 5,5 meter van de container.

De optiek

Het algemeen concept van de telescoop optiek is getekend in figuur 4. De telescoop wordt gebruikt voor zowel het zenden als ontvangen van de laserpuls. Een frontlens met een diameter van 0,5 m (een gekit achromatisch doublet) en een kleiner corrigerend triplet lensstelsel vormen de basis van deze Coude telescoop. De bundel wordt eerst door de holle verticale as (azimut) en vervolgens door de holle horizontale as (elevatie) in de telescoop geleid. De lange brandpuntsafstand van de frontlens is opgevouwen tot een compact en mechanisch uitgebalanceerd systeem met behulp van twee vlakke spiegels. Het triplet lensstelsel collimeert de beide ontvangen lasergolflengten tot een bundel met diameter van 60 mm (vergroting $500/60=8,33$ x).

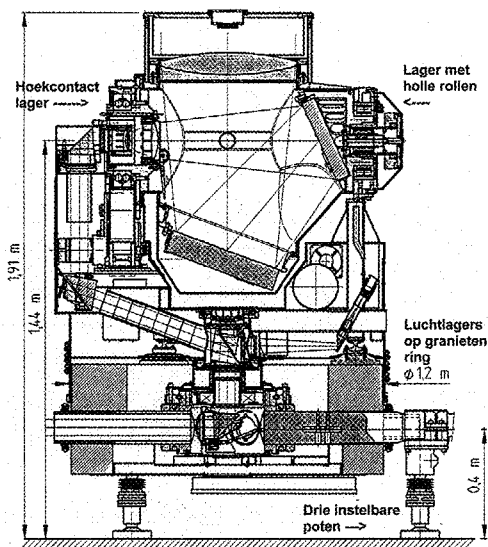
De stand van de telescoop in een absoluut coördinaten systeem wordt vast gesteld door een zogenaamd sterprogramma uit te voeren. De telescoop wordt gericht op een bekende ster. De ster wordt geobserveerd door een oculair en wanneer de ster exact in het midden van het beeld is (hiervoor is een kruisdraad in het beeld gespiegeld), worden de azimuth en elevatie hoeken en het exacte tijdstip vastgelegd. Dit wordt herhaald met een aantal sterren. De telescoop en de rest van het optisch-mechanisch systeem zijn van een zodanige nauwkeurigheid dat na de uitvoering van dit programma de richting van de telescoop op beter dan 2 boogseconden bekend is over het hele hoekbereik.



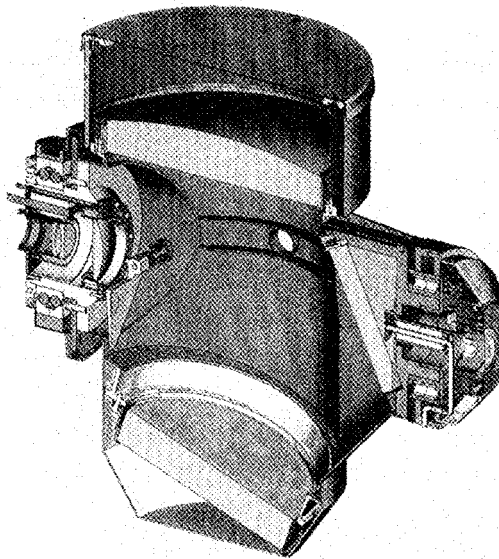
Figuur 4. Stralengang in de telescoop. De bundel wordt door de rotatieassen heen geleid.

Mechanische constructie

Voor alle lageringen, zie figuur 5, werd een zeer hoge nauwkeurigheid vereist om de gewenste hoeknauwkeurigheid van de telescoop te kunnen realiseren. De basis wordt gevormd door een granieten ring van 1,2 m diameter en een gewicht van 600 kg. Voordelen van het toepassen van een granieten ring zijn:



Figuur 5. Mechanische opbouw van de telescoop. Een granieten ring staat op drie poten. De ring is onderdeel van een groot luchtlager voor de verticale as. De as blijft zijdelings op zijn plaats door een precisielager in het midden.



Figuur 6. Lagering van de elevatie met een voorgespannen kogellager (links) en een voorgespannen rollenlager (rechts). De voorspanning van het rollenlager wordt bereikt door het indrukken van de holle rollen. Het lager laat ondanks de voorspanning toch een vrije axiale beweging van de as toe.

- goede oppervlaktekwaliteit en vlakheid, beter dan $4 \mu\text{m}$ over de diameter en daarmee geschikt als drager voor drie luchtgelagerde schoenen, voor nauwkeurige rotatie van de telescoop om de verticale as.
- hoge stijfheid
- goede thermische stabiliteit
- corrosiebestendig

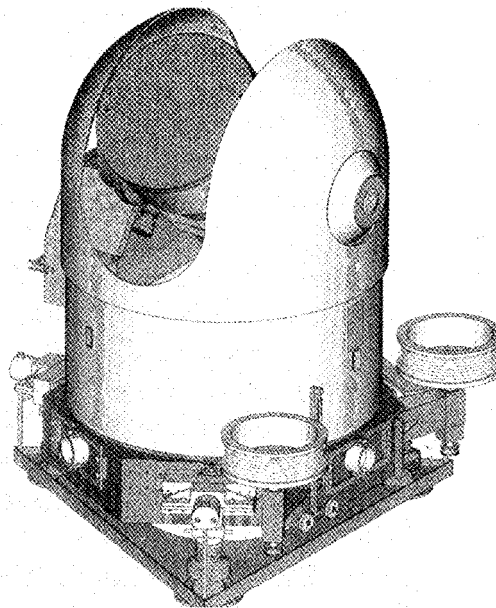
Naast graniet zijn voor de constructie de volgende materialen toegepast:

- Roestvaststaal voor de meeste delen, zoals de telescoopbuis en zijn ondersteuning, het roterende deel van de verticale as, het bevestigen en opsluiten van lagers, etc.
- Aluminium voor de structuur die de granieten plaat draagt en voor een groot aantal kleine, minder belangrijke onderdelen.
- Titaan voor het bevestigen van de optiek en voor het bevestigen van het aluminium frame onder de granieten plaat. Titaan heeft ongeveer dezelfde thermische uitzetting als graniet en als de meeste optische glassoorten voor lenzen en spiegels. Door het gebruik van titaan is het nauwkeurig bevestigen en uit

richten van deze onderdelen over een breed temperatuurbereik eenvoudiger te realiseren.

De lagering van de verticale as wordt verzorgd door drie vlakke en relatief kleine (oppervlak $2,5 \text{ dm}^2$) luchtlagers die op de granieten ring drijven. Door deze drie lagers wordt de (verticale) azimut-as volledig bepaald door de vlakheid van de ring en is qua nauwkeurigheid het best haalbare. In dwarsrichting wordt de verticale as op zijn plaatsgehouden door een voorgespannen precisiekogellager van 400 mm doorsnede.

De lagering van de telescoop om de horizontale as (elevatie) is gerealiseerd met de keuze van een voorgespannen hoekcontactlager aan de ene zijde en een voorgespannen rollenlager aan de andere zijde, zie figuur 6. Het hoekcontactlager legt de zijdelingse beweging vast. De holle rollen in het rollenlager worden bij de montage enigszins ingedrukt zodat er voorspanning in radiale richting ontstaat. In axiale richting kan de as vrij in het lager bewegen, zodat bijvoor-



Figuur 7. De elektrische kabels en luchtslang liggen met een paar slagen om de behuizing. Tijdens de rotatie worden ze op- en afgewikkeld op de trommels. De positie van de trommels is zodanig dat ze een gelijke maar tegengestelde kracht op de behuizing van de telescoop uitoefenen. Zodoende wordt de nauwkeurigheid van de rotatie niet beïnvloed door de spankracht op de kabels.

beeld lengteverschillen door uitzetting nooit problemen kunnen veroorzaken. De afmetingen in figuur 5 tonen hoe compact het ontwerp geworden is. Het totale gewicht van de telescoop is ongeveer 1700 kg.

Ook aan kleine details die de nauwkeurigheid kunnen verstoren is gedacht. De elektriciteitskabel voor aandrijfenergie en signaaloverdracht evenals de luchtslang die de lucht voor de lagers levert, worden op een speciale manier op en afgewikkeld tijdens rotatie om de azimut-as. De trommels aan de omtrek van de telescoop behuizing, zie figuur 7, zorgen voor een gelijke maar tegengestelde spankracht op de kabels en slangen die enkele slagen om de behuizing heen liggen. Door op deze wijze op en af te wikkelen via de trommels is de resulterende kracht die de kabels op de telescoop uitoefenen tot een minimum gereduceerd.

Aandrijving en positiemeting

De hoekuitlesing van beide assen is uitgevoerd met 21-bits absolute hoekencoders, die direct aan de as gekoppeld zijn. De uitleesnauwkeurigheid is 0,8 boogsec RMS en de hoekresolutie is 0,62 boogsec ($2^{21} = 2097152$ posities over 360 graden). Beide assen worden via een voor- gespannen tandwielaandrijving aangedreven door een stappenmotor. De vertraging voor het azimut is 838,8608 keer ($2^{23}/10^4$) en de vertraging van de elevatie is 1677,7216 keer ($2^{24}/10^4$). De stappenmotoren worden aangestuurd met microstappen en kunnen daardoor 10^4 stappen per motoromwenteling maken. Daardoor maakt de stappenmotor op de azimut-as 8 (micro)stappen per encoderpositie (0,62 boogsec) en de elevatiemotor 4 stappen per encoderpositie. De microstappen van de motor kunnen dus gebruikt worden voor het bepalen van de positie tussen twee opeenvolgende encoderwaarden.

De gespecificeerde maximum hoeksnelheden zijn 6 graden/s voor de elevatie-as en 15 graden/s voor de azimut-as. De bijbehorende motortoerentallen zijn 28 omw/s, respectievelijk 35 omw/s. De positioneer-nauwkeurigheid van de telescoop op van te voren berekende ruimtesatellieten is beter dan 2 boogsec RMS.

Laser

De bandbreedte van de Titanium Saffier laser is 0,2 nm bij 847 nm. Om ook bij daglicht te kunnen meten met de LAM moet er goed spectraal gefilterd worden. Dit wordt gedaan door twee instelbare Fabry-Perot filters. Deze beide filters hebben een hoge efficiëntie ($> 80\%$), een spleet van 12 μ m en een relatief lage finesse (50 voor 847 nm en 25 voor 423.5 nm). De Fabry-Perot filters zijn in een klein drukkamertje ingebouwd. De gewenste golflengte filtering wordt ingesteld door de luchtdruk in de drukkamer te variëren. Per bar verschuift de doorgelaten golflengte met 0.028% (0,12 nm per bar voor 423,5 nm en 0,23 nm per bar voor 847 nm). Zo kunnen de filters exact op de lasergolflengten worden afgesteld.

Uiteindelijk wordt het licht naar detectors geleid. Als detectors worden Single Photon Avalanche Dioden (SPAD) gebruikt. Deze detectors zijn alleen gedurende een zeer korte tijd (100 ns, de tijd dat het terugkomende signaal verwacht wordt) gevoelig te maken (gating). Door de grote versterking van het avalanche effect ($\sim 10^6$) veroorzaakt 1 foton een duidelijk signaal.

Verantwoording

De tekst is grotendeels afkomstig van teksten van H.Visser en B.A. van der Zwan, ter beschikking gesteld aan de redactie door J.R. Nijenhuis. Allen zijn werkzaam bij TNO Technisch Fysische Dienst, Postbus 155, 2600 AD Delft.