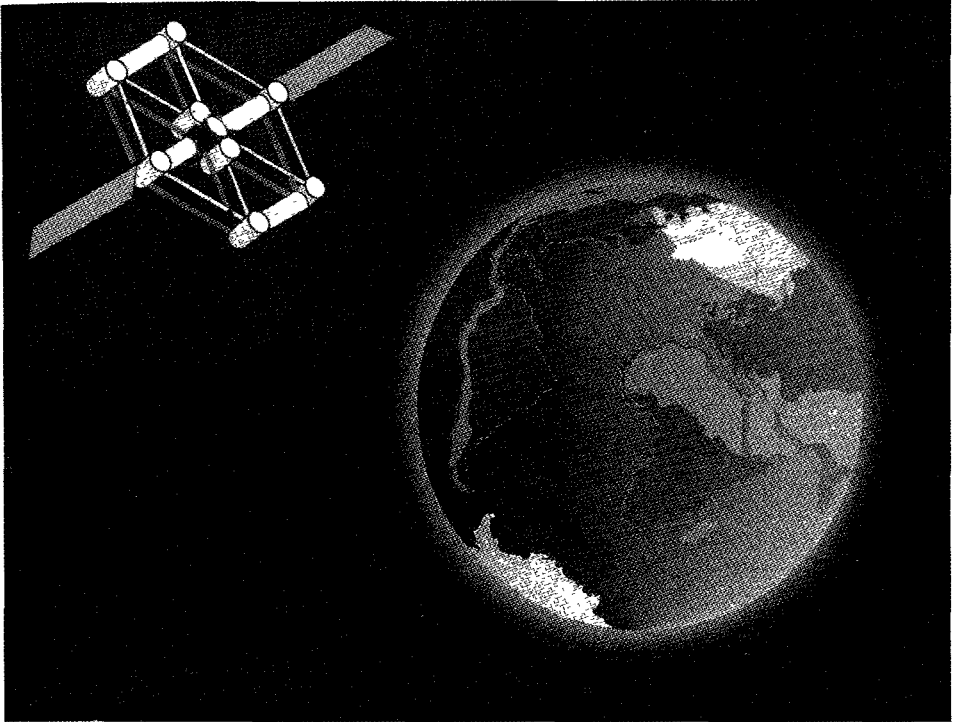


# Optische Apertuur Synthese

*Bart Snijders,  
Technisch Fysische Dienst TNO-TU Delft  
Postbus 155, 2600 AD Delft*



Figuur 1  
Een optisch apertuur synthese systeem in de ruimte

## Science fiction?

Astronomen zullen in de toekomst gebruik willen maken van instrumenten met een steeds hogere resolutie, tot in het milli-boogseconde gebied.

Een van de meest tot de verbeelding sprekende mogelijkheden van dergelijke instrumenten is de detectie van planeten die

hoogstwaarschijnlijk rond de meest nabije sterren draaien.

Voor observatie-telescopen op de aarde wordt de resolutie veelal bepaald door de turbulente atmosfeer. De afgelopen jaren is er een sterke ontwikkeling geweest van zgn. adaptieve optische systemen. Met adaptieve optiek is het mogelijk om golf-

front-verstoringsen, veroorzaakt door de atmosfeer, te corrigeren en op die manier een hogere resolutie van de observaties te behalen.

Observatie-telescopen die in de ruimte gestationeerd zijn, ondervinden geen last van luchtwervelingen. De resolutie van instrumenten in de ruimte wordt in principe beperkt door buiging. Momenteel streeft men dus naar telescopen met een zo groot mogelijke diameter van het lichtvangend oppervlak, zoals bijvoorbeeld de Hubble-telescoop. In de nabije toekomst zal de niet geringe stap gezet worden in de richting van telescoop-systemen met een diameter in de orde van 100 meter. Het is om minimaal twee redenen niet mogelijk om een conventionele telescoop met een spiegel van 100 meter diameter voor gebruik in de ruimte te realiseren. ten eerste is een dergelijke spiegel niet (met voldoende nauwkeurigheid) te vervaardigen, en ten tweede is geen enkel ruimtevaartuig voldoende groot om een dergelijke telescoop in een baan om de aarde te brengen.

Toch is de 100 meter ruimte-telescoop geen instrument dat verwezen moet worden naar de science fiction boekjes. Met behulp van een slimme configuratie van een aantal kleinere telescopen en de coherente samenvoeging van de beelden van de individuele telescopen kan een instrument van 100 meter gesimuleerd worden en kan de beeldkwaliteit van een 100-meter instrument benaderd worden. Een samengestelde telescoop met coherente beeldcombinatie wordt een synthetisch apertuur systeem genoemd. De maximale resolutie van een synthetische apertuur systeem waarvan de telescopen bijvoorbeeld maximaal 100 meter uit elkaar staan is gelijk aan de maximale resolutie van een monolithische 100-meter telescoop. Het is in feite het optisch equivalent van de samengestelde radiotelescoop in Westerbork. Een synthetisch apertuur systeem bestaande uit een tiental telescopen met ieder een diameter van 1 meter is in principe met bestaande technologieën en com-

ponenten te vervaardigen en in de ruimte te brengen

### **Nieuwe uitdagingen**

De ontwikkeling van een optisch synthetisch apertuur systeem vereist dat een groot aantal nieuwe problemen van uiteenlopende aard opgelost wordt:

- De lichtbundels van de individuele telescopen moeten coherent samengevoegd worden, dit leidt tot toleranties voor de oppervlaktefouten en nauwkeurigheden van de onderlinge positionering van de componenten die van een zelfde orde van grootte zijn als de toleranties en nauwkeurigheden van een 100 meter telescoop.
- Het golffront afkomstig van een ver verwijderd object moet op een voldoende groot aantal plaatsen bemonsterd worden om een hoge resolutie van de observatie te kunnen realiseren. Dit houdt in dat een synthetisch apertuur systeem voldoende telescopen moet bevatten en telescopen met voldoende diameter. Deze kwalitatieve uitspraak wordt in een volgende paragraaf nader gekwantificeerd.
- Een opvouwbare en later uitvouwbare mechanische constructie is nodig om de individuele telescopen in de ruimte op een vaste onderlinge afstand te kunnen positioneren. Hiervoor is een lichte en compacte opbouw vereist. De stabiliteitseisen voor de mechanische componenten zijn zeer streng.
- Verder is beeld-reconstructie nodig: de opgenomen beelden moeten gedigitaliseerd worden en daarna met behulp van een computer worden bewerkt. De bewerkingen vertonen veel gelijkenis met de complexe bewerkingen die op informatie uit radiotelescopen uitgevoerd worden.

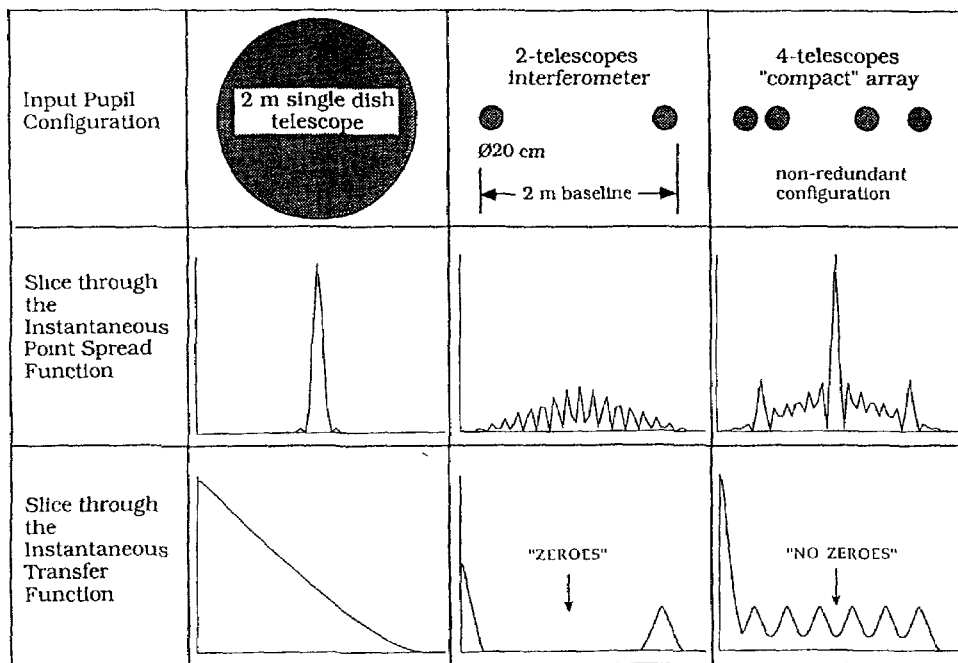
Diverse onderzoek-centra over de gehele wereld werken momenteel aan de diverse nieuwe uitdagingen die door optische apertuur synthese opgeworpen zijn (zie Lit. 1 en 2).

## Basisprincipes

De superieure beeldkwaliteit van een synthetisch apertuur systeem kan alleen bereikt worden door coherente samenvoeging van de lichtbundels van de individuele telescopen. Bij breedbandige observaties in het golflengte-gebied van het zichtbare licht bedraagt de coherentielengte van het licht enkele micrometers. De lichtwegen door het apertuur synthese systeem (lengte ongeveer 50 meter) moeten dus binnen een fractie van een micrometer gelijk gemaakt worden. Het waarnemen van lichtzwakke objecten vereist lange observatie-tijden (enkele uren) en over de volledige observatieperiode dient de weglengte van de individuele telescoopbundels op sub-micrometer schaal gestabiliseerd te worden.

Een lichtbundel doorloopt achtereenvolgens de ontvangende telescoop, een optische

vertragingsslijn voor de stabilisatie van de weglengte, een spiegelsysteem voor de onderlinge alignering van de lichtbundels en een combinatie-telescoop waarin de bundels van de verschillende telescopen tot een beeld gecombineerd worden. Het totale aantal reflecties kan daarbij 10 of meer zijn. Daarbij mogen geen significante golf-front-fouten ontstaan: de aberraties moeten ten opzichte van de buiging verwaarloosbaar zijn. Dat brengt met zich mee dat strenge eisen aan de spiegels gesteld worden; de oppervlakte-nauwkeurigheid per component moet beneden 0,1 golflengte liggen. Verder resulteren on-nauwkeurigheden in de configuratie van de telescopen (bijvoorbeeld variaties van de onderlinge afstand of oriëntatie) in golf-front-fouten. Daarom worden strenge eisen gesteld aan de positionering van de spiegels, en de stabiliteit van deze positionering.



Figuur 2  
Vergelijking van de puntspreidingsfunctie en de modulatie-overdrachtsfunctie van een enkelvoudige telescoop en een synthetische apertuur telescoop

In figuur 2 (overgenomen uit Lit. 3) worden (in vereenvoudigde, 1-dimensionale vorm) de overeenkomsten en verschillen tussen een monolithisch telescoop en twee verschillende synthetische apertuur systemen aangegeven.

De puntspreidingsfunctie (psf) van een enkele grote telescoop geeft een smalle piek te zien. De psf van twee kleinere telescopen is opgebouwd uit de (relatief brede) psf van een individuele kleine telescoop, in combinatie met een periodiek patroon (interferentie-lijnen) die ontstaan uit de coherente samenvoeging van de bundels van de twee telescopen. De psf van een rij van 4 telescopen vertoont een smalle centrale piek (vergelijkbaar met de piek van de grote telescoop), maar daarnaast een zekere uitsmering van het licht van een fictieve puntbron.

De modulation transfer functie (mtf) van de grote telescoop laat zien dat ook kleine objecten, dus objecten met een hoge ruimtelijke frequentie, nog met een aanzienlijk contrast afgebeeld worden. De mtf van de twee kleinere telescopen toont ons dat zowel objecten met lage ruimtelijke frequenties als objecten met hoge frequenties met een zeker contrast afgebeeld worden, maar de midden-frequenties ontbreken volledig in het beeld ("zeroes"). In de afbeelding ontbreekt dus informatie met bepaalde ruimtelijke frequenties en dit verlies kan niet door beeld-reconstructie teniet gedaan worden: een deel van de informatie is simpelweg verdwenen. De mtf van de rij van 4 telescopen vertoont geen nulpunten en loopt door de hogere frequenties. In dit geval kunnen de midden-frequenties met beeldreconstructie versterkt worden en kan de beeldkwaliteit van de grote telescoop dicht benaderd worden. Voor een twee-dimensionale array van telescopen geldt evenzo de eis dat het overeenkomstige (twee-dimensionale) vlak van de overdracht-functie van ruimtelijke frequenties (in het vakjargon het "UV-vlak") zo goed mogelijk gevuld dient te worden. De ontwerper van een synthetisch apertuur

systeem zal er naar streven om met een beperkt aantal telescopen een maximale vulling van het ruimtelijke frequentie-vlak te realiseren. Bij een gegeven aantal telescopen kan de vulling van het UV-vlak vergroot worden door het complete instrument om de as die in de richting van het te observeren object wijst te laten draaien: dit wordt super-synthese genoemd. De beelden die vanuit verschillende hoekstanden van het roterende synthetische apertuur systeem opgenomen worden, zullen niet coherent optisch gecombineerd kunnen worden; ze worden afzonderlijk vastgelegd en in een computer gecombineerd. Lannes (zie Lit. 4) heeft voor de op deze manier verkregen resolutie afgeleid

$$FRR \leq 0,75 n_t (n_r)^{0,5}$$

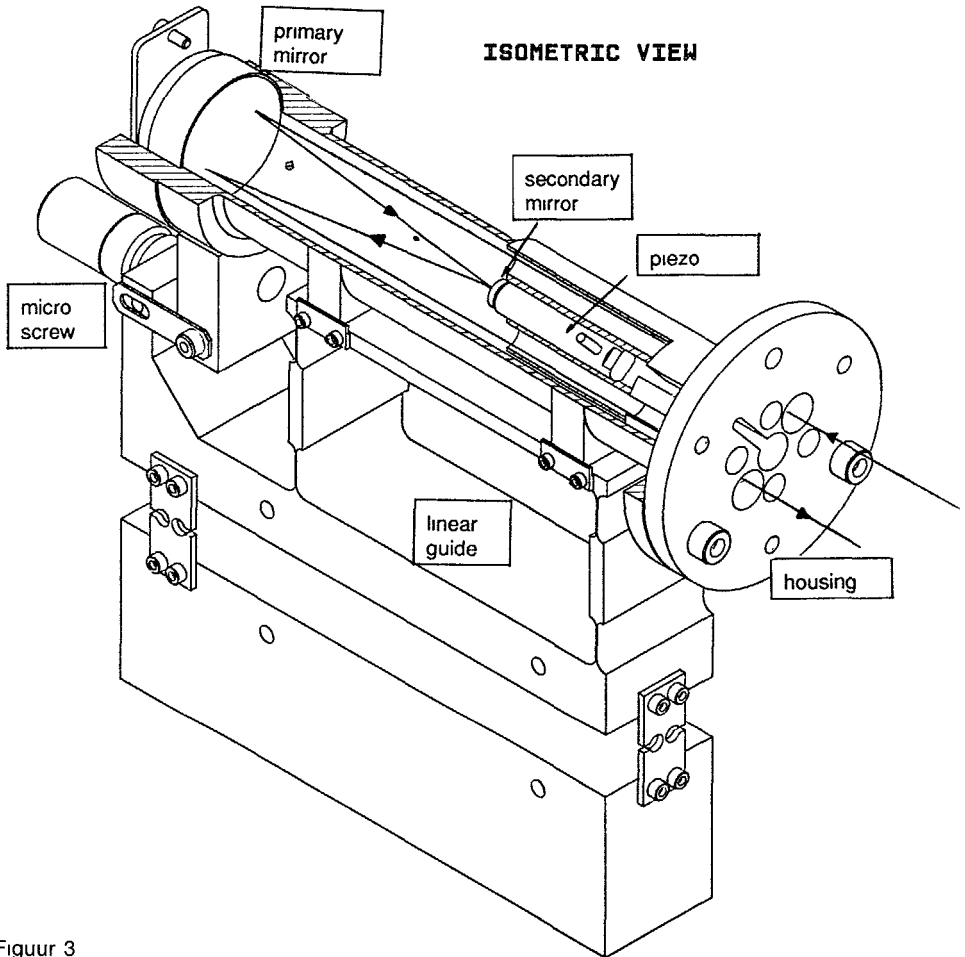
Hierin is FRR de "field-to-resolution ratio" (= de winst in resolutie t o v een enkelvoudige kleine telescoop),  $n_t$  is het aantal telescopen en  $n_r$  is het aantal hoekstanden van waaruit beelden opgenomen worden. Verder heeft Lannes uit computer-simulaties bepaald dat in de optimale configuratie de individuele telescopen op een cirkel liggen. Voorbeeld met een samenstelling van 10 telescopen van 1 meter diameter waarmee uit 150 verschillende hoekstanden beelden opgenomen worden kan uiteindelijk een resolutie-verbetering met een factor 100 (t o v een enkele 1-meter telescoop) gehaald worden: een dergelijk synthetisch apertuur systeem evenaart dus een 100-meter telescoop!

### **Opto-mechanische aspecten**

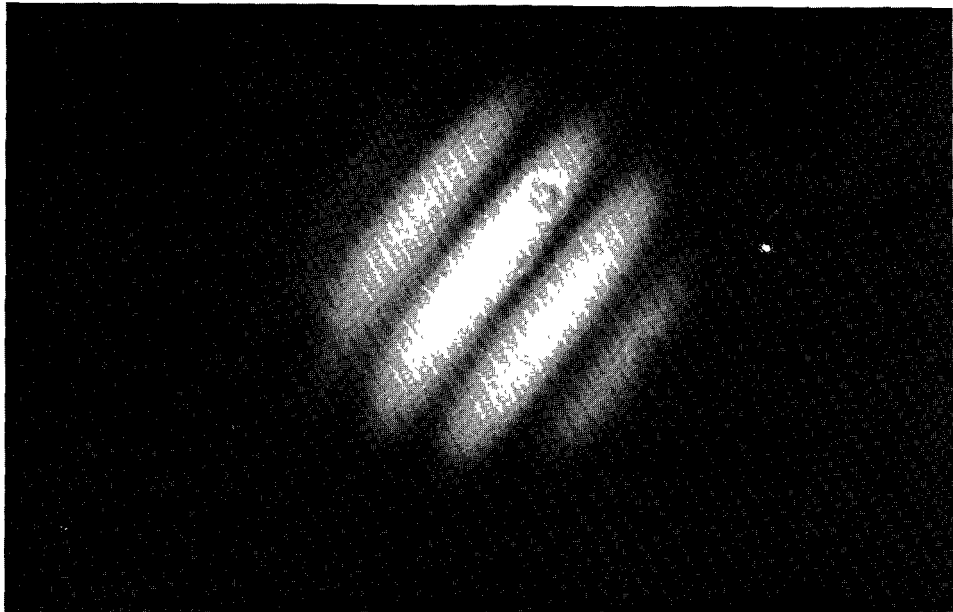
In het frame van een apertuur-synthese systeem moet een zeer hoge mechanische stabiliteit gerealiseerd worden door middel van een opvouwbare en lichte constructie. Ter verbetering van de mechanische eigenschappen van een lichte, relatief slappe constructie worden actieve trillingsdempers toegepast, en wordt gebruik gemaakt van een actieve stabilisatie van de optische weglengten door middel van optische vertragingssystemen.

Bij de TPD is in opdracht van ESA gewerkt aan een testopstelling voor een optische vertraginglijn. Hiervoor werd een retro-reflector (van het cats-eye type) gebruikt. In figuur 3 is te zien dat de binnenkomende gecollimeerde bundel door de primaire parabool-spiegel op de vlakke secundaire spiegel gefocussieerd wordt. Na reflectie aan de secundaire spiegel wordt de bundel wederom gecollimeerd bij de tweede reflectie aan de primaire spiegel. De optische weglengte door de retroreflector kan snel en over een klein bereik gevarieerd worden

door de secundaire spiegel, met een piezo-elektrische actuator, in de richting loodrecht op het spiegelvlak te bewegen. Een grotere slag kan bereikt worden door de gehele retroreflector te bewegen. In de testopstelling werd door een cats-eye reflector een weglengte-variatie geïntroduceerd. Het verschil van de optische weglengte van twee lichtbundels afkomstig van een puntbron werd gemeten door de twee lichtbundels gezamenlijk te focuseren op een CCD matrix-detector (zie figuur 4). Uit het interferentiepatroon op de detector



Figuur 3  
Optische vertraginglijn



Figuur 4  
Beeld van een puntbron verkregen door coherente samenvoeging van twee telescoop-bundels

werd het optisch-weglengteverschil berekend, en vervolgens werd dit verschil door een tweede cats-eye reflector teniet gedaan. Metingen hebben uitgewezen dat de nauwkeurigheid van een dergelijk weglengtestabilisatie beter dan 10 nanometer is, zelfs bij externe weglengte-verstoringsen van ongeveer 1 millimeter/seconde

### Ontwikkelingen in de komende jaren

Optische synthetische apertuur systemen zullen in de nabije toekomst voor diverse astronomische toepassingen, zowel voor observatie vanaf het aardoppervlak als vanuit de ruimte, ontwikkeld worden.

De Europese ruimte-onderzoek organisatie ESA zal zich richten op tweetal instrumenten: een beeldvormend synthetisch apertuur systeem, en een instrument voor zeer nauwkeurige astrometrie

ESO, het Europese bureau voor astronomie vanaf de aarde, werkt momenteel in zuid-amerika aan de Very Large Telescope Interferometer. Deze meervoudige telescoop zal uiteindelijk bestaan uit een viertal

8-meter telescopen waarvan de lichtbundels coherent samengevoegd worden met het licht van een aantal kleinere telescopen. De maximale afstand tussen de telescopen zal daarbij meer dan 200 meter bedragen.

Dergelijke instrumenten zijn uitermate complex en de ervoor benodigde technologieën liggen aan de rand van de huidige technische mogelijkheden. De toepassing ervan zal een enorme stap voorwaarts betekenen voor de astronomie, en dit alles maakt het werkgebied van de optische apertuur synthese uitermate boeiend.

### Literatuur

1. Optical Engineering, vol.27, nr 9, 1988
2. Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II, SPIE Vol 2200, 1994
3. M. Coradini c.s., "SIMURIS, Scientific and Technical Study - Phase I", ESA report, 1991
4. A. Lannes c.s., "On the concept of field-to-resolution ratio in aperture synthesis", SPIE, Vol 2209, blz 402-412, 1994