

Nanometer positionering over 60 meter

De Delay Lines voor de Very Large Telescope Interferometer

Twee Nederlandse bedrijven, Dutch Space en TNO-TPD, hebben aan de European Southern Observatory (ESO) opnieuw drie delay lines geleverd welke deze maand op de berg Paranal in de Chileense Atacama woestijn geïnstalleerd zullen gaan worden in de interferometer van de Very Large Telescope (VLT). De levering is een vervolg op eerdere leveringen van drie delay lines, die nu volledig operationeel zijn in de interferometer tunnel op de berg.

• *Harm Hogenhuis¹ en Jan Nijenhuis²* •

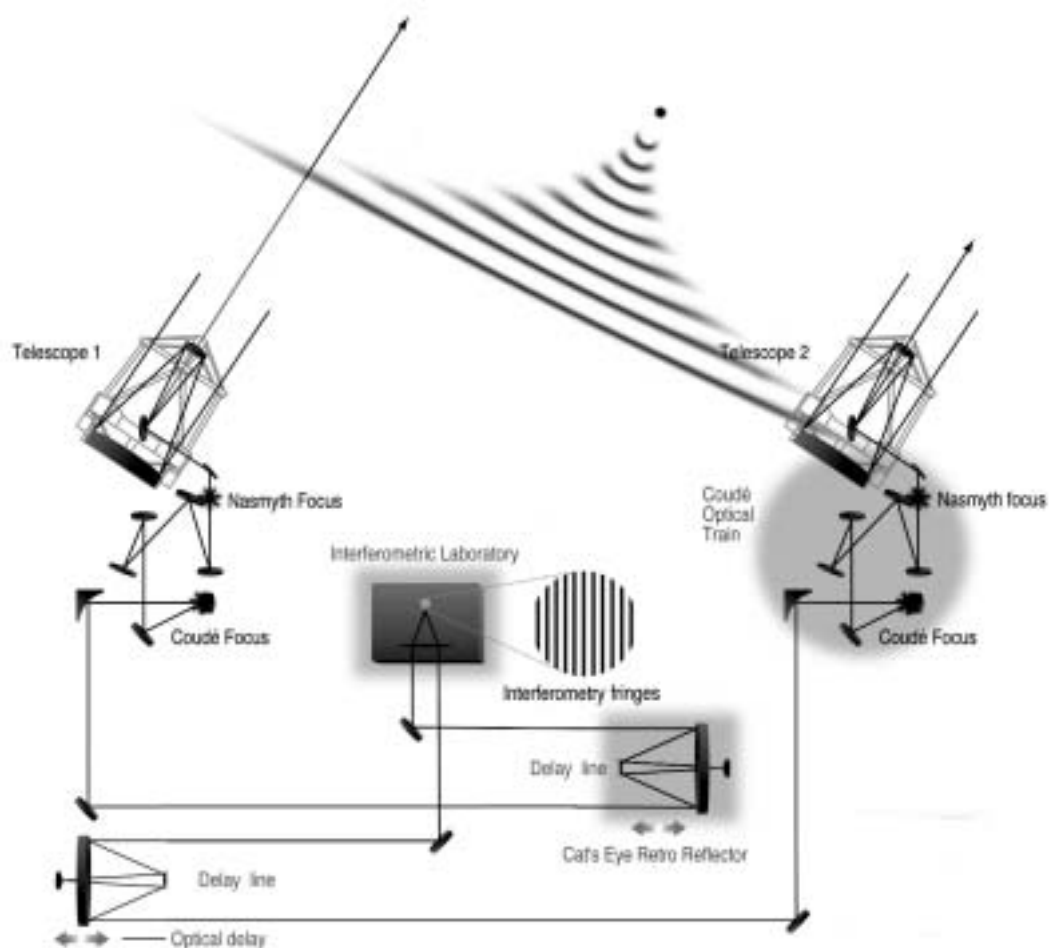
Wat is een delay line?

Optische telescopen worden gebruikt om golffronten van uitgezonden licht van astronomische objecten op te vangen. Hoe groter de telescoop, hoe meer licht er opgevangen kan worden van een golffront, hoe meer informatie detail gedestilleerd kan worden uit een meting. Maar ook hoe groter de telescoop, hoe verder terug in tijd er geobserveerd kan worden door naar zwakke objecten te kijken. De afmetingen van de hoofdspiegel van de telescoop worden op een gegeven moment limiterend voor het haalbare oplossend vermogen van de telescoop. Om deze limitatie te omzeilen wordt tegenwoordig veel het principe van een interferometer toegepast: meerdere telescopen welke eenzelfde golffront kunnen opvangen worden optisch gekoppeld zodanig dat de informatie van het golffront over elkaar heen gelegd wordt.

Om de informatie van een golffront zuiver te houden is het vereist dat de optische weglengte verschillen vanaf het geobserveerde object via de verschillende telescopen tot aan

¹ Dutch Space
Postbus 32070 2303 DB Leiden
Tel: 071-5245430 Fax: 071-5245499
Email: h.hogenhuis@dutchspace.nl

² TNO TPD
Jan Nijenhuis
Postbus 155 2600 AD Delft
Tel: 015-2692075 Fax: 015-2692111
Email: nijenhuis@tpd.tno.nl



Afbeelding 1. Schema van de VLTI (illustratie: ESO)

de detector nihil zijn. Zoals afbeelding 1 laat zien, is dat niet zonder meer het geval.

Een golffront wat onder een hoek ten opzichte van de normaal binnen komt wordt niet gelijk in tijd opgevangen door twee telescopen die op een afstand van elkaar staan. Om te realiseren dat het golffront van de telescopen op het zelfde moment wordt opgevangen in de detector moet een van de bundels van de twee telescopen 'vertraagd' (omgeleid) worden. Dit omleiden gebeurt met behulp van de genoemde delay lines. Om geen verschil in licht verlies of vervorming van het golffront te krijgen langs de beide licht wegen worden beide telescopen uitgerust met dezelfde optiek, maar slechts van een van beide wordt het licht omgeleid. De delay line is uitgerust met een reflector, die door middel van actuators wordt verplaatst zodanig dat na positionering de optische weglengtes op fracties van de golflengte van het licht gelijk zijn langs beide wegen. Op deze

manier kunnen meerdere telescopen optisch 'gekoppeld' worden en wordt een effectieve telescoop gecreëerd die vele malen groter is dan een enkele telescoop van eenzelfde afmeting.

De afstand waarover de bundel omgeleid moet worden wordt bepaald door de plaats van het observatie object aan het firmament, die varieert door de draaiing van de aarde over de nacht, en de afstand tussen de telescopen. Paranal heeft op de berg een array van posities waar (hulp) telescopen van elk 1,8 m diameter geplaatst kunnen worden. Daarnaast staan nog vier grote maar vaste telescopen van elk 8,2 m diameter, die eveneens gekoppeld kunnen worden. Deze variatie maakt dat er per combinatie steeds andere optische weglengtes moeten worden gecompenseerd door de delay lines. Omdat steeds dezelfde positioneer nauwkeurigheid vereist wordt is het de uitdaging om de performance van de delay line voor de range van optische weglengte verschillen die weggeregeld moeten worden dezelfde te laten zijn.

DELAY LINES

Hoe werkt de delay line

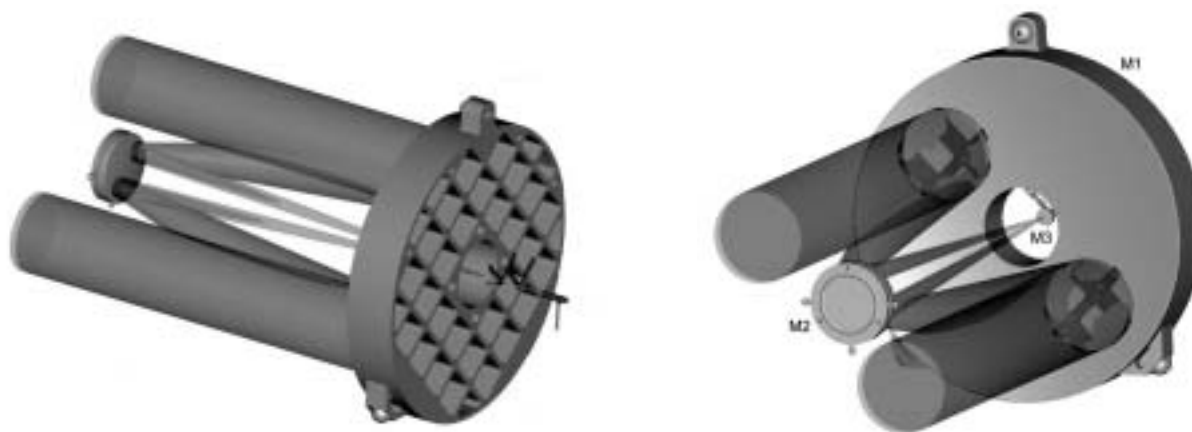
Onderstaand plaatje geeft aan hoe de delay line werkt. Met een laser interferometer (fine metrology) wordt de verplaatsing gemeten van de delay line reflector waar de bundels van de telescopen op reflecteren. Wanneer de positie niet overeenkomt in de tijd met een vooraf gecommandeerde positie wordt een control algoritme geactiveerd wat deze fout compenseert. Deze correctie wordt uitgevoerd met een twee-traps actuator: eerst wordt de grove fout met behulp van een lineaire motor met een 100 Hz regel frequentie gecompenseerd, vervolgens wordt berekend wat de rest fout is en deze rest fout wordt met behulp van de tweede trap, een piëzo-electrische actuator die aan het focus spiegel gemonteerd is van de reflector, weggeregeld. Deze restfout heeft een orde van enkele tientallen nanometers en wordt iedere 0.5 msec gecompenseerd.

Het unieke van het Nederlandse ontwerp is dat er maar twee trappen nodig zijn voor het bereiken van een prestatie niveau van enkele nanometers positie nauwkeurigheid, waar in de toepassingen van concurrenten vaak 4 of meer trappen nodig zijn om eenzelfde niveau te bereiken. Het lage frictie niveau van het Nederlandse ontwerp wordt mogelijk gemaakt door het toepassen van de lineaire motor, het draadloos overbrengen van stroom en commando's naar de tweede trap en de opstelling van de kar op de rails.

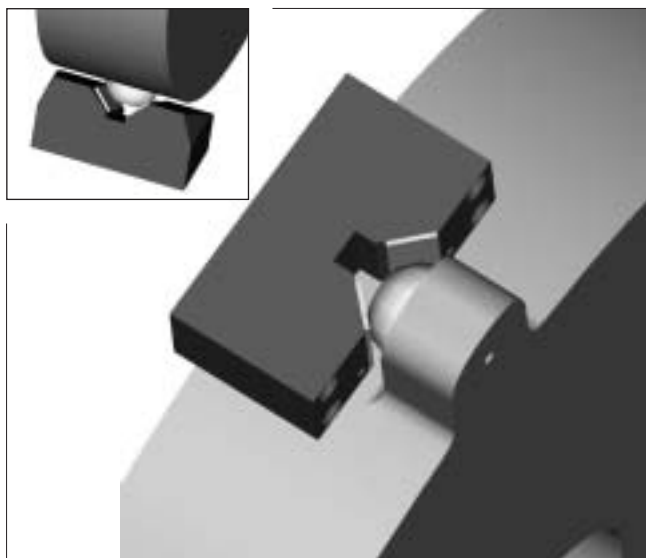
Dutch Space heeft een contactloze lineaire motor ontwikkeld die niet beperkt wordt in afstand. Door slimme technieken worden lineaire motor controllers (LMCU) langs de lijn aangezet wanneer de magneet strip in het bereik komt van een van de spoelen. Met een speciaal protocol wordt de commandering doorgegeven van de ene controller naar de

volgende. Slechts twee controllers hoeven daarmee tegelijk actief te zijn; de overige zijn allemaal uit en geven daarom geen warmte af in de tunnel (per controller wordt 2.5 W gedissipeerd). Dit laatste is belangrijk want lokale warmtebronnen in de tunnel zijn verstorend voor de licht bundels.

Data communicatie naar de bewegende kar is nodig voor de aansturing van de piëzo-electrische actuator. Hiervoor wordt een draadloze verbinding gebruikt met behulp van laser-transceivers (optical datalink). De transceivers zitten zowel op de kar als op een statisch frame aan het einde van de lijn. Via deze optische datalink (670 nm golflengte) met baudrate van 115k2 bps worden positie commando's gegeven vanuit de Local Control Unit (LCU) naar een controller op de kar waar een amplifier voor de piëzo in zit. Om geen kabels te hoeven laten meeslepen door de kar voor stroom toevoer wordt gebruik gemaakt van het contact tussen de rail en het wiel voor stroom doorvoer. Een conductieve en slijtvaste coating op het wiel wordt gebruikt om een goed elektrische contact te garanderen. In de lagers wordt een smering toegepast die eveneens de stroom mogelijk maakt naar de as van het wiel. De as is geïsoleerd van de structuur van de kar zodat er verder geen stroom op de structuur komt te staan. De stroom wordt van de as afgetapt voor verbinding met de controller op de kar. De enige weerstand van de kar nu wordt geïntroduceerd door de lagers en het contact tussen wiel en rail. De iso-statische positie op de rail van de kar (op drie wielen) is gedaan om de weerstand minimaal te houden. Aan één kant van de kar zitten 2 wielen met een V-groef voor geleiding, aan de andere kant een vlak wiel waardoor geen laterale spanning kan worden opgebouwd door slechte uitlijning van de railsen of door temperatuur effecten. Uiteindelijk zijn voor de kar waarden gemeten van rond de



Afbeelding 2. Bundelverloop over de drie spiegels (M1, M2, M3) (illustratie: Dutch Space/TNO TPD)



Afbeelding 3. Kinematische vattng van de M1 spiegel (illustratie: Dutch Space/TNO TPD)

50 gram aan weerstand bij een gewicht van rond de 240 kg van de totale assembly. Hierdoor kan er zeer nauwkeurig gepositioneerd worden tot nanometer niveau. Dit is super laag temeer daar door atmosferische verstoringen de fluctuaties in de optische weglengte groot zijn die met dit systeem ook nog eens voor een belangrijk deel worden recht getrokken.

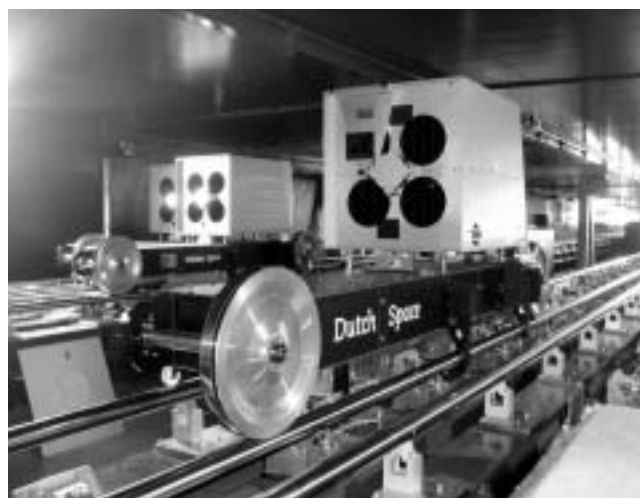
Door een spoel kort te sluiten, bijvoorbeeld aan beide uiteinden van de lijn, kan een remwerking worden bereikt om de delay line tot stilstand te brengen als er door omstandigheden geen controle meer zou zijn vanuit de LCU.

Door het Doppler-effect van de laser kan de snelheid niet hoger worden dan 0.5 m/sec (voor snelle plaatsing ergens op de lijn). De snelheden tijdens observaties die nodig zijn om de rotatie van de aarde bij te houden liggen echter niet hoger dan 5 mm/sec. De lengtes van de lijnen zijn ruim 60 meter. De uitlijning van de rails is van groot belang. Door de reflector wordt de bundel terug gekaatst en wanneer de afstand tot de intrede pupil erg groot is kan de laterale verplaatsing van de terugkerende bundel ook groot worden wanneer de reflector een hoek maakt ten opzichte van de inkomende bundel. De maximale hoek die wordt toegelaten is slechts enkele boogseconden. De doorbuiging van de rails of een verkeerde uitlijning kan deze hoek makkelijk veroorzaken. Door slim te construeren is dit effect zoveel mogelijk ondervangen. Zo is de aangrijping van de lineaire motor kracht zo goed als mogelijk aangebracht in het zwaartepunt. Daarnaast is de steek tussen de assen van de twee geleidings

wielen een veelvoud van de steek tussen de ondersteunende punten van de rails waardoor de doorbuiging alleen verticale verplaatsingen van enkele microns veroorzaakt maar geen rotatie van de kar. De railsen zijn eveneens voor dit doel uitermate nauwkeurig geslepen en overgangen tussen railen zijn speciaal bewerkt.

In de LCU worden alle subsystemen gecombineerd. Een CAN-bus voor de aansturing van de lineaire motor, een seriële link met de controller op de kar en een IEEE interface voor de power distributie. Het metrologie systeem is met een directe adressering van het VME bord gekoppeld aan de snelle processor voor een directe verwerking van de meet gegevens. Verder wordt vanuit het interferometer systeem een off-set terug gekoppeld naar de LCU wanneer nog uit data van een fringe sensor blijkt dat het door de VLTi computer berekende en dus gecommandeerde verschil tussen de weglengtes via de telescopen niet volledig klopt. Deze terugkoppeling gebeurt via een snelle fiber communicatie lijn (fast link) om de terugkoppeling direct te kunnen verwerken.

Optisch gezien is de uitvoering van de reflector op de delay line iets ingewikkelder dan een simpele vlakke spiegel die de bundel reflecteert. Waar nl. rekening mee moet worden gehouden is dat geen verlies van licht mag optreden. De optische bundel die van de telescoop komt wordt nl. steeds breder en zonder tegenmaatregelen gaat een deel van de bundel naast de spiegels vallen. Daarom is de reflector uitgevoerd als een drie spiegel systeem. In bijgaande plaatjes is te zien hoe dat in z'n werk gaat.



Afbeelding 4. Delay Line in de interferometer tunnel van de VLTi facility in Paranal (foto: Dutch Space/TNO TPD)

DELAY LINES



Afbeelding 5. Delay Line bij Dutch Space in de Clean Room (foto: Dutch Space/TNO TPD)

De op de grote spiegel vallende bundel wordt gefocuseerd op de tweede waarbij de twee spiegels samen precies op de derde spiegel focuseren. Daar vindt de feitelijke spiegeling, vergelijkbaar met die van een vlakke spiegel plaats. De aldus gereflecteerde bundel is precies het spiegelbeeld van de invallende optische bundel. Was de bundel aanvankelijk divergerend, nu is hij convergerend. Uit de figuren zou men misschien afleiden dat de spiegels maar gedeeltelijk gebruikt worden. Dat is niet helemaal waar. Voor de duidelijkheid wordt slechts een heen en weergaande bundel getoond. In werkelijkheid zijn er twee bundels die reflecteren in de Cats Eye. Onderling zijn ze 90° verdraaid.

Mechanisch stelt de uitvoering van de Cats Eye hoge eisen. Van primaire belang daarbij is dat alles gemaakt is van aluminium. De temperatuur, en die is variabel, heeft zodoende geen invloed op de werking van de Cats Eye omdat slecht een schaaffect optreedt wat geen nadelige invloed heeft op het functioneren van het instrument. Daarnaast is van groot belang dat de spiegels stabiel gemonteerd worden ondanks de optredende belastingen (verplaatsingslimiet $< 1 \mu\text{m}$).

Gewoon vastbouten is niet toegestaan in verband met de vervormingen op nanometer schaal die hierbij optreden in de spiegels. Daarom is gekozen voor een zgn. kinematische vassing. De spiegels zijn uitgerust met drie ronde kogels die in zgn. V-groeven vallen.

Dit laatste is goed zichtbaar in bovenstaande plaatjes voor de grote spiegel (M1). De kleine spiegel is overeenkomstig gemonteerd. De kinematische vassing maakt het mogelijk de spiegels uit de Cats Eye te tillen tijdens het vervoer naar Chili zonder dat daarbij de uitlijnnauwkeurigheid verloren gaat. De spiegels kunnen ter plaatse opnieuw gemonteerd worden zonder bijzondere gereedschappen en met de garantie dat de spiegels ruim binnen $1 \mu\text{m}$ op hun oude plek terug komen. Ook in verband met de noodzaak de spiegels van tijd tot tijd schoon te maken is dit een uitermate plezierige eigenschap wat veel werk scheelt.

Stijfheid is een ander kenmerk van de Cats Eye. De eisen ter attentie van de eigenfrequentie zijn hoog ($>120\text{Hz}$) voor een systeem van ca. 61 kg. Dat kan alleen als het gebruikte materiaal optimaal toegepast wordt. In de constructie mogen geen zogenaamde excentriciteiten voorkomen. Alle plaatvelden van de doosconstructie mogen alleen op trek en afschuiving belast worden. Buiging is verboden omdat dit zeer nadelig is voor een hoge stijfheid. Het is dan ook niet toevallig dat de steunpuntsreactie van de twee onderste spiegelkogels van de M1 spiegel precies door het snijpunt van onder- en zijvlak van de doos gaat.

Het relatief eenvoudige en weinig complexe systeem heeft ook het voordeel van een snelle installatie in Paranal na eenmaal afgeleverd te zijn aan de klant. Het meeste werk zit in het plaatsen en uitlijnen van de rails en spoelen van de lineaire motor.

Momenteel zijn drie systemen operationeel op de berg Paranal in de Chileense Atacama woestijn. Vandaag de dag worden delay line prestaties gemeten van rond de 8 nanometer RMS positioneer nauwkeurigheid. Samen met de optische prestaties van de Cats Eyes heeft Dutch Space met TNO-TPD een uiterst nauwkeurige delay line ontwikkeld voor een interferometer in aardse omgeving die zijn weerga niet kent.