

H. J. VAN AGTHOVEN

TECHNISCHE PROBLEMEN IN DE DETECTIESYSTEMEN VOOR HOGE RESOLUTIE

In 1979 werd door de Europese ruimtevaartorganisatie ESA (European Space Agency) een studie uitgeschreven naar mogelijke instrument-ontwerpen voor het verkrijgen van multi-spectrale informatie vanuit de ruimte van het aardoppervlak. De gewenste zwade breedte was ongeveer 170 km met een beeldelement resolutie van 30 m.

Voor de gevraagde resolutie en gegeven zwade breedte betekende dit het simultaan waarnemen van ongeveer 6000 beeldelementen. In het totale instrumentenpakket was één instrument bestemd voor het doen van waarnemingen in het zichtbare deel van het spectrum en wel in vier afzonderlijke kleurbanden. Daarnaast was het wenselijk om simultaan het gehele zichtbare deel uit het spectrum, 'n zogenaamd panchromatisch kanaal, waar te nemen. Voor het panchromatische kanaal was de gevraagde beeldelementresolutie 15 m, hetgeen overeenkomt met ongeveer 12000 beeldelementen. Deze studie, die in samenwerking met andere Europese ruimteonderzoekinstellingen werd uitgevoerd, werd in het najaar van 1980 afgesloten. In het studierapport werd door middel van een aantal ontwerpconcepten aangetoond dat de na te streven doelstellingen uitvoerbaar waren.

Voor de kleurscheiding en het detectiesysteem, werd echter voorzien dat nog verdere ontwikkelingswerk nodig was. De vervolgoopdracht van ESA was de technische problemen voor het detectiesysteem te onderzoeken en adequate fabricage en assemblage methodieken te ontwikkelen en deze te verifiëren aan een proefmodel. Deze studie werd uitgevoerd in samenwerking met de groep ESAT van de Katholieke Universiteit van Leuven die het onderzoek aan lijndetectoren, lineaire Charged Coupled Devices (CCD's) uitvoerde

(zie artikel Declerck en Debusschere).

Detectiesysteem

Het detectiesysteem moet in elk van de vier kleurkanalen met ongeveer 6000 beeldelementen en met ongeveer 12000 beeldelementen in het panchromatische kanaal kunnen meten. Het optisch ontwerp is zodanig van opzet, dat elk beeldelement in de kleurkanalen twee detectorelementen krijgt toegewezen, terwijl dit voor het panchromatische kanaal één detectorelement is. Dit betekent dus vijf meetkanalen met elk 12000 detectorelementen in lijn. De langste lijndetector die verkrijgbaar was bevatte echter maar 2048 elementen, wat betekent dat er zes van deze detectoren in lijn moeten worden geplaatst. De fysieke lengte van de lijndetector is echter groter dan het lichtgevoelige deel, te weten 2048 elementen, waardoor bij het in lijn plaatsen beeldinformatie verloren gaat. Om dit te ondervangen is het kleurscheidingsprisma zodanig ontworpen, dat elk kleurkanaal en het panchromatisch kanaal tweemaal worden afgebeeld aan weerszijde van een vlak van symmetrie. Hierdoor wordt het mogelijk elk kanaal op te splitsen in 2x3 lijndetector-eenheden die om en om aan weerszijden van het vlak van symmetrie zijn gelegen.

In figuur 1 zijn schematisch de waarnemingzwade en de symmetrische uitsplitsing van kleurkanalen in het beeldvlak van het waarnemingsinstrument weergegeven. De beide afbeeldings-



H. J. van Agthoven (53) is sinds 1956 werkzaam bij de Technisch Fysische Dienst TNO-TH. Vanaf 1964 is hij betrokken bij de ontwikkeling en bouw van instrumenten voor het ruimteonderzoek. Hij houdt zich daar vooral bezig met mechanische aspecten en de ontwikkeling van fabricage- en assemblagetechnologieën.

lijngroepen liggen elk in een plat vlak, waarbij het niet noodzakelijk is dat deze vlakken evenwijdig zijn of samen vallen.

In elk beeldvlak worden nu per kanaal drie lijndetectoren geplaatst, en wel zodanig dat de gehele afbeeldingslijn door detectorelementen wordt gedekt. De zes detectorpakketten worden zodanig geformeerd dat elk detectorpakket één lijndetector voor ieder kleurkanaal bevat. In figuur 2 is het principe van de kleurscheiding geschetst. De functie van dit kleurscheidingsprisma is het door het aardoppervlak gereflecteerde zonlicht uit te splitsen in de vier afzonderlijke kleurbanden en een panchromatische band. Het kleurscheidingsprisma bestaat uit twee identieke delen aan weerszijden van het vlak van symmetrie om de hiervoor genoemde redenen. De opbouw van de detectorpakketten wordt schematisch getoond in figuur 3.

De eerder omschreven detectorpakketten bestaan dus elk uit vijf CCD lijndetectoren waarvan de lichtgevoelige oppervlakken in één plat vlak, het beeldvlak, moeten liggen. De onderlinge afstand

wordt bepaald door de plaats van de verschillende kleurbanden. Deze plaatsen volgen uit het ontwerp van het kleurscheidingsprisma.

De vereiste positionaauwkeurigheid is 0,1 beeldelement, wat in een absolute afmeting voor de gangbare grootte van een detectorelement overeenkomt met 2,5 μm . Daar de detectorpositionering niet de enige foutenbron is, moest zelfs gestreefd worden naar een waarde in de orde van 1 μm . De scherptediepte-tolerantie is $\pm 10 \mu\text{m}$, maar om dezelfde redenen moet hier naar $\pm 2,5 \mu\text{m}$ voor de detectorpositionering worden gestreefd. Normaliter worden lijndetectoren in een met een glazen venster afgesloten huisje geleverd.

De afmetingen van zo'n huisje voor een 2048 elementslijndetector is $38 \times 15 \text{ mm}^2$. Bij toepassing van zo'n voorgebouwde detector betekent dit dat de afstand tussen twee kleurbanden tenminste 15 mm moet zijn. Dit laatste is een ernstige beperking in de ontwerprijken van het kleurscheidingsprisma en blijkt in de praktijk een niet-acceptabele beperking te zijn.

De lijndetector zelf is een silicium chip van 30x2 mm². Gezien de hoge positienuwkeurigheden moeten bovendien de precieze ligging en de vorm van de chip in het huisje nauwkeurig bekend zijn. Deze grootheden blijken zeer moeilijk vast te stellen in een afgemonteerde detector. Dit alles pleit er dan ook sterk voor om niet een voorgemonteerde detector toe te passen, maar de losse detectorchips te gebruiken.

Probleem

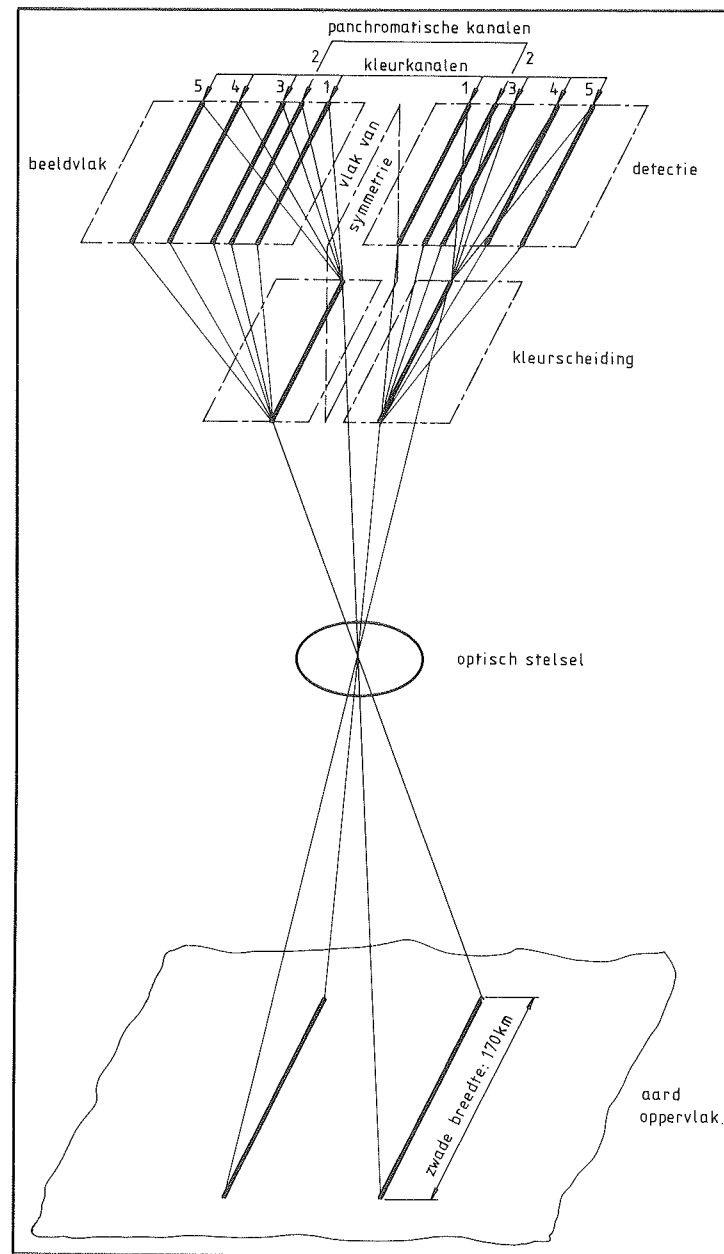
Het probleem nu was met bovengenoemde nauwkeurigheid vijf detectorchips in één vlak op gegeven afstanden in het detectorpakket te monteren. Er moest bovendien rekening worden gehouden met de mogelijkheid dat de dunne detector chip meer dan 2,5 µm krom zou kunnen zijn. Uit metingen bleek later dat dit zelfs in de orde van 20 µm lag.

Bij het ontwerp van het detectorpakket en de toe te passen methode van assemblage moesten dus de volgende problemen worden opgelost:

- een chip drager, met daarbij behorende montage techniek, zodanig dat een kromme chip binnen 2,5 µm vlak werd gebogen en in die toestand gefixeerd.
- een positioneer-methode om de chip met vating binnen 2,5 µm, maar liefst binnen 1 µm, op z'n plaats te brengen.
- een bevestigingsmethode om de nauwkeurig gepositioneerde chip op z'n plaats te houden.

De gemonteerde detector moet na fixatie aanzienlijke versnellingskrachten en temperatuurswisselingen zonder blijvende vervorming kunnen doorstaan.

De toegepaste technieken zullen worden beschreven in dezelfde volgorde als hierboven gesteld. Met mechanische hulpmiddelen werd de detector chip recht gebogen tot op 1 µm of minder en in deze stand vastgehouden. Hierna werd een stijve keramische plaat aan de achterkant van de chip gekit. Na het uitharden van de kit werden de mechanische hulpstukken weggenomen, wat een voldoende vlakke detector



Figuur 1. Schematische weergave van een multispectraal waarnemingsinstrument. De beide zwaden bestaan elk uit ongeveer 6000 beeld-elementen van 30 m welke na spectrale scheiding worden afgebeeld op 12000 detectorelementen. Daar de langste lijndetector slechts 2048 elementen bezit worden twee zwaden symmetrisch afgebeeld om verlies van beeldinformatie te voorkomen. In een dubbel uitgevoerde kleurscheidingsprisma wordt in elk prisma het van het aardoppervlak afkomstige licht in vier kleurbanden en een panchromatische band gescheiden. Deze kleurbanden worden afgebeeld op het detectorvlak, dat ook weer uit twee symmetrische delen bestaat.

De binnenzijde van dit venster werd gekozen als referentievlak. De afstand tussen beeldvlak en referentievlak werd gesteld op 250 µm. Op dit referentievlak werd door ESAT in elektronenstraal-lithografie zeer nauwkeurig ($\pm 0,6$ µm) een markeringspatroon aangebracht dat overeenkomt met de gewenste plaatsen van de lijndetectoren in het beeldvlak. Dit markeringspatroon werd uitgevoerd als een stelsel condensatorplaten. Figuur 6 is een foto van dit venster waarvan de afmetingen 80x32 mm² zijn. Het andere deel van de condensatorplaten is aangebracht op de lijndetectorchip. Voor het aanbrengen van deze condensatorplaten zijn aan het fabricageproces van de detector een aantal processtappen toegevoegd. (Zie ook pag. 114).

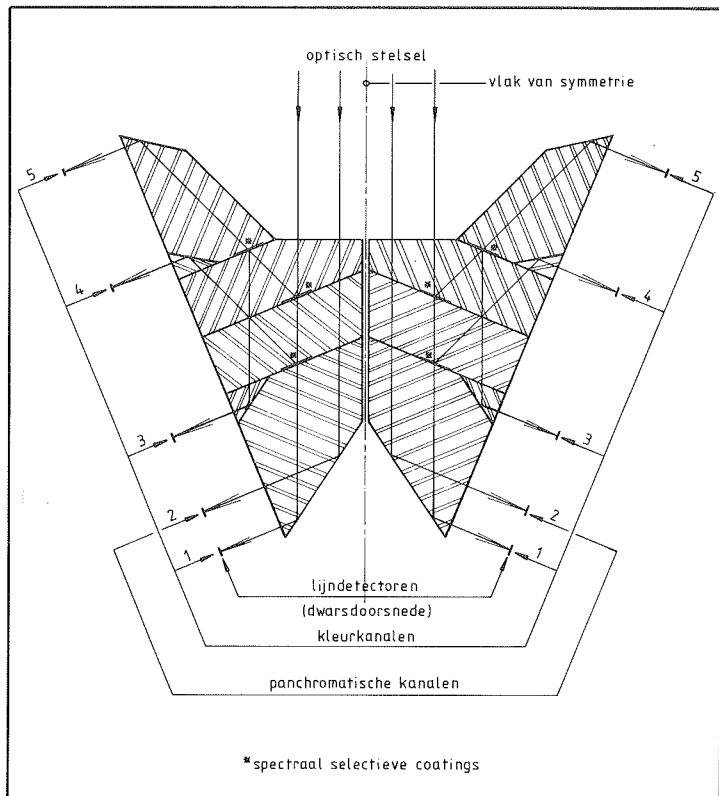
De functie van het als proefmodel te bouwen detectorpakket was het ontwerpen en verifiëren van fabricage en assemblagetech-nieken. Om die reden was het niet noodzakelijk daarvoor functionerende lijndetectoren te gebruiken. Mede ter bespreking van de kosten werd door ESAT een dummy lijndetector ontworpen en vervaardigd. Afmetingen en materiaal waren gelijk aan een 2048 elementen lijndetector. In het ontwerp waren de positioneer-condensatorplaten opgenomen, alsmede justeerkenmerken voor enige alternatieve positiebepalingsmethoden die eveneens zijn geprobeerd. Tevens waren stookweerstand in de chips opgenomen, waarmee het

gemonteerd op een drager opleverde. In deze drager waren aansluitpennen naast de detector chip gemonteerd, vanwaar de elektrische verbindingen naar de detectors chip werden gemaakt.

Deze samenstelling en de afmetingen daarvan zijn weergegeven in figuur 4. Figuur 5 is een voorbeeld van de kromming van een losse detector chip over een lengte van 3 cm. Tevens is in deze grafiek aangegeven in welke mate dit kon worden teruggebracht na het verbinden van de chip aan de keramische drager.

Meer hoofdbreken

Het op de juiste plaats positioneren, het meten van die positie en het in die positie fixeren van de detectoreenheid kostte meer hoofdbreken. Voor dit positioneren moest een opstelling worden gebouwd die de detectoreenheid kon vastpakken en in drie assen transleren en roteren. Het meten van de plaats van de detector ten opzichte van een referentievlak werd volgens de capaciteieve methode uitgevoerd. Het complete detectorpakket wordt afgesloten met een vlak glazen venster.



Figuur 2. Deze figuur toont een dwarsdoorsnede van het dubbele kleurscheidingsprisma. Deze kleurscheiding wordt verkregen door spectraal selectieve filters in de lichtweg. Deze filters laten het licht in een bepaalde kleurband door terwijl het overige licht buiten deze kleurband wordt gereflecteerd. Het panchromatische licht wordt ongefilterd afgebeeld.

Aardschermen

Door het aanbrengen van aardschermen was het mogelijk deze in een aanzienlijke mate te onderdrukken. Echter niet zodanig dat de $1\ \mu\text{m}$ positie nauwkeurigheid kon worden bereikt. In fig. 9 zijn twee gepositioneerde chips in een vlak gegeven. Fig. 9a toont de positiefout die het gevolg was van de parasitaire capaciteiten, terwijl fig. 9b een beeld geeft wat de verbetering is na het aanbrengen van aardschermen. Fig. 10 toont een venster, waarop tevens verstijvingsribben zijn bevestigd, met 5 gemonteerde detectoreenheden. (Zie ook pag. 115).

effect van thermische gradiënten kon worden nagegaan. De totale configuratie van condensatorplaten voor het positioneren van één detector bestaat uit vier platen op de detector en acht platen op het venster.

Voor het meten van de afstand tot het referentievlak is de absolute capaciteitswaarde van belang, terwijl de meting in het detectorvlak wordt uitgevoerd volgens de balansmethode. Dit laatste betekent dat één condensatorplaat, op de detector, wordt gepositioneerd t.o.v. twee dicht naast elkaar liggende platen op het referentievlak. In de juiste positie is de capaciteitswaarde van het detectorplaat naar elke van de vensterplaten gelijk. Figuur 7 is een foto van een deel van de dummy-detector met condensatorplaten.

De detectorafmetingen zijn $30 \times 2\ \text{mm}^2$ en die van de condensatorplaten $1,2 \times 0,1\ \text{mm}^2$. Fig. 8 geeft een beeld van de positioneeropstelling. Na het positioneren op de juiste plaats van de detectoreenheid worden vier pennen, $0,5\ \text{mm}$ diameter, door

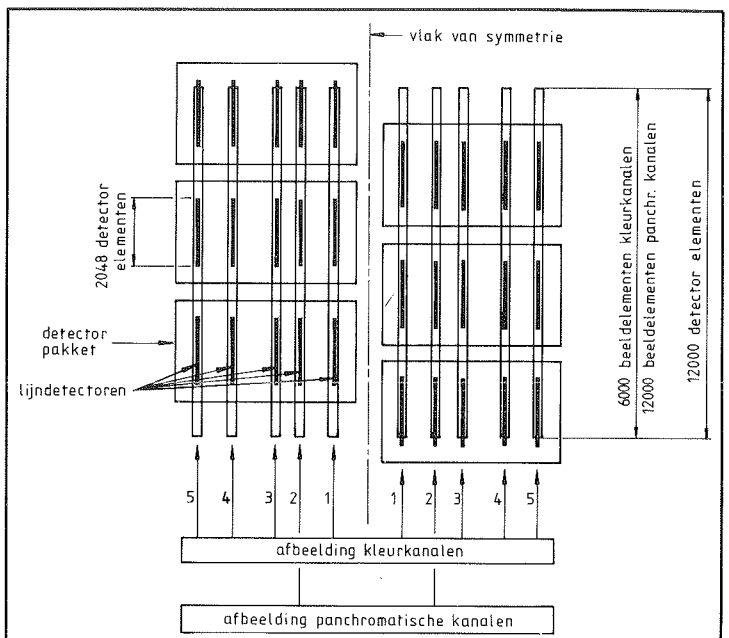
gaten in de detectordrager geschoven en vervolgens aan het venstervlak en aan de detectordrager gekit. Na het uitharden van de kit wordt het positioneermechanisme losgekoppeld van de detectoreenheid. (Zie ook pag. 114).

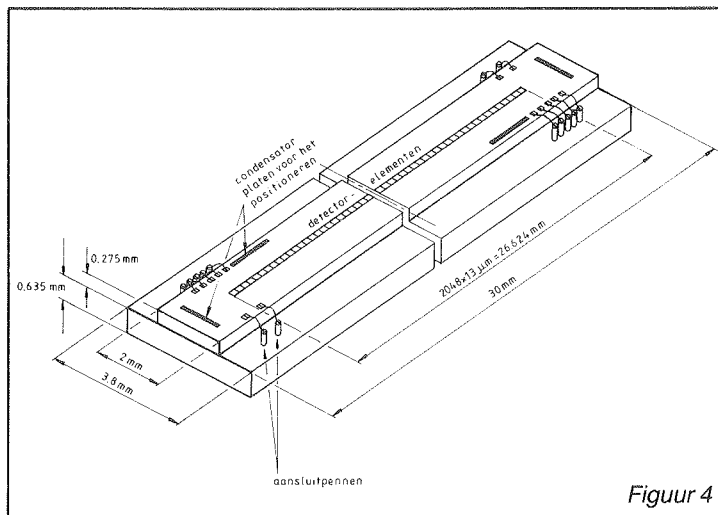
Bij het positioneren van de chips ten opzichte van het referentievlak werd gebruik gemaakt van zowel de capacitieve meetmethode als enige alternatieve chip positie meetmethoden. Deze alternatieven waren het meten met een meetmicroscop en met vier in de chip aangebrachte fotodioden van $100 \times 100\ \mu\text{m}^2$. Het probleem met deze alternatieve meetmethoden was dat niet in alle drie de assen met dezelfde hoge nauwkeurigheid kon worden gemeten. De capacitieve methode had dat probleem nauwelijks. Daar was de theoretische ondergrens voor de gegeven afmetingen van de condensatorplaat in de orde van $0,4\ \mu\text{m}$. Bij deze methode echter werden de eerste metingen in ernstige mate verstoord door parasitaire capaciteiten.

toreenheid op elk gewenst ogenblik te controleren tijdens de verdere beproevingscyclus.

Het compleet geassembleerde model werd zowel thermisch als mechanisch beproefd. Het doel van deze beproevingen was het verifiëren van de mechanische integriteit van zowel de elektrische als mechanische verbindingen en een controle van de chip positie stabiliteit. De thermische beproeving bestond uit een aantal temperatuurswisselingen tussen 0 en 40°C van het complete model en het verwarmen van de afzonderlijke chips, door de daarin aangebrachte stookweerstand. Met deze laatste proef werd, naast chip positie stabiliteit, de thermische weerstand tussen chip en detectorbehuizing gemeten. Deze waarden werden gemeten met en zonder een thermische kortsluitchip, die een onderdeel vormde van de verschillende ontwerpen. Deze bedragen respectievelijk 5 en $9,5$

Figuur 3. In deze figuur is schematisch weergegeven hoe de afzonderlijke lijndetectoren zijn gegroepeerd zodanig dat het gehele zwadebeeld door detectorelementen wordt gedekt. Vijf lijndetectoren, die elk $1/6$ deel van de zwade bedekken, een in elke kleurband en de panchromatische band, zijn ondergebracht in één detectorpakket. Het complete detectiesysteem is opgebouwd uit zes identieke detectorpakketten.

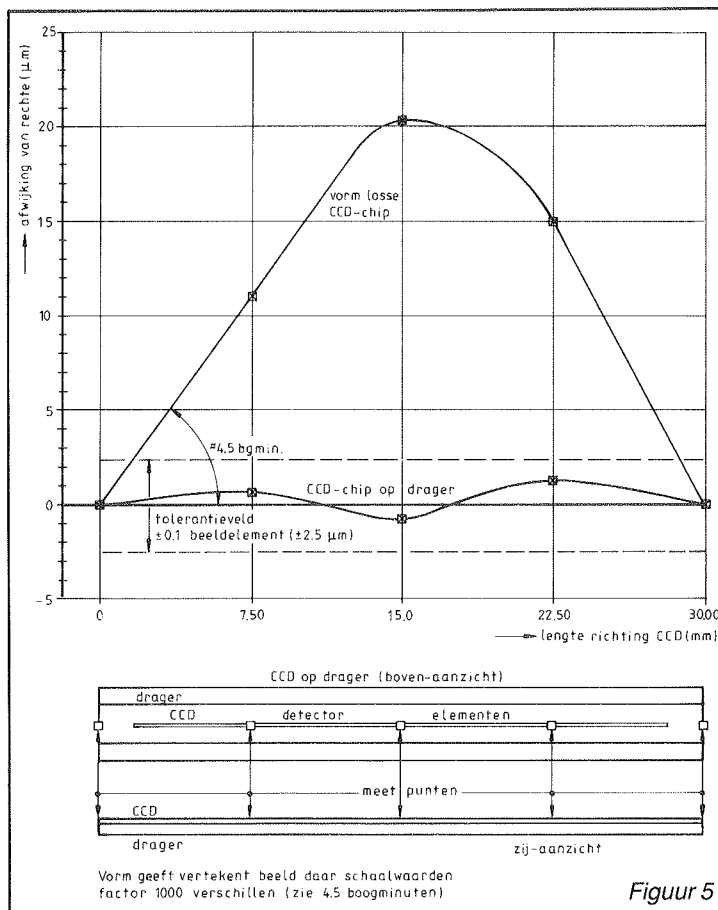




Figuur 4

Figuur 4. Dit is een schets van een CCD lijndetector gemonteerd op een keramische drager. Tijdens montage wordt de als gevolg van het fabricage proces kromme CCD eerst met mechanische hulpmiddelen recht gebogen en in deze toestand vastgehouden. Hierna wordt de rechte chip met een bij verhoogde temperatuur uithardende kit vastgemaakt aan de drager. Om de breedte van deze detectoreenheid klein te houden worden de elektrische aansluitingen gemaakt via dunne dicht naast de chip gemonteerde pennen.

Figuur 5. Deze grafiek toont de mate van krom zijn van een losse CCD chip van 3 cm lengte na het fabricage proces en in welke mate dit kan worden gereduceerd, middels de eerder genoemde montage techniek, na het vastmaken op een vlakke stijve drager.



Figuur 5

Figuur 7. Deze foto geeft een beeld van de beide uiteinden van de dummy lijndetector. Deze dummy is qua afmetingen en materiaal identiek aan een 2048 elementen CCD lijndetector. Hier zijn echter geen detectorelementen aangebracht. Op deze dummy zijn de justeercondensatorplaten zichtbaar en een van de alternatieve justeerkenmerken, t.w. de vier fotodiodes. Deze foto is gemaakt voor het aanbrengen van het aluminium afdekscherm waardoor de elektrische verbindingslijnen nog zichtbaar zijn. De 4 x 5 naast elkaar geplaatste vierkanten zijn de elektrische aansluitvlakken van de CCD.

Figuur 9. Op dit plaatje zijn de verkregen justeerresultaten weergegeven. De twee onder a genoemde positie resultaten geven een beeld van de fout t.g.v. parasitaire capaciteiten. In het onder b getoonde resultaat zijn deze parasitaire capaciteiten door het aanbrengen van aardschermen in belangrijke mate weggenomen. Het streven om een positie nauwkeurigheid van $\pm 1 \mu\text{m}$ te behalen was niet mogelijk als gevolg van de nog aanwezige restparasitaire capaciteiten.

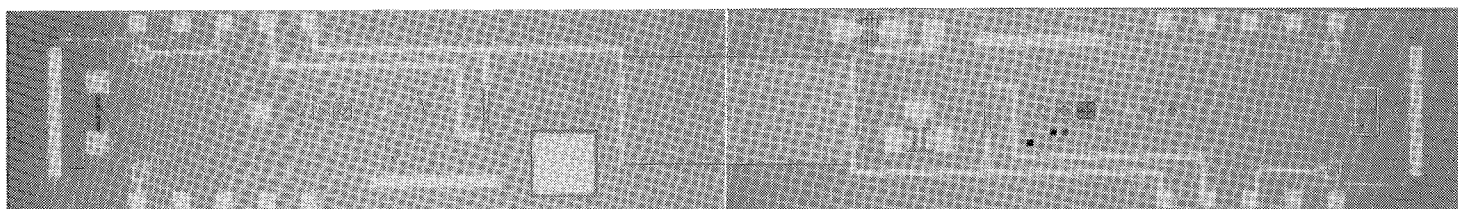
K/W. De mechanische beproevingen waren vibratie en schoktesten. Het versnellingsniveau bij de vibratie testen was 10 g (10x versnelling van de zwaartekracht) in een frequentiegebied van 100 tot 2000 Hz. Bij de schoktesten bedroeg de versnelling 50 g. Na deze beproevingen volgden de controlemetingen en visuele inspecties. Er werden geen meetbare positieveranderingen van de chip posities waargenomen en alle verbindingen waren intact.

Goede mogelijkheden

Met deze studie is aangetoond dat de ontwikkelde fabricage en assemblageteknik goede mogelijkheden biedt voor het bouwen van detectiesystemen met CCD's. Hierbij kunnen CCD's op chip-niveau worden toegepast, waardoor de ontwerpvrijheden in het optische en mechanische deel van het waarnemingsinstrument aanzienlijk worden verruimd. Bij het ontwikkelen van een dergelijke technologie is de actieve medewerking van een detectorleverancier, zoals ESAT, die de detectoren in de gewenste vorm in betrekkelijk kleine aantallen kan en wil leveren, onontbeerlijk.

In een parallelle studie is aangetoond dat een beperkte mechanische vervorming van CCD's bij het rechtbuigen tijdens assemblage, geen schadelijke invloed heeft op het functioneren. Noch de gevoeligheid, noch de donkerstroom werden meetbaar beïnvloed. Als eindconclusie kan dan ook gesteld worden dat de technische problemen voor het bouwen van CCD detectiesystemen met hoge resolutie grotendeels zijn opgelost.

Figuur 7



Figuur 9

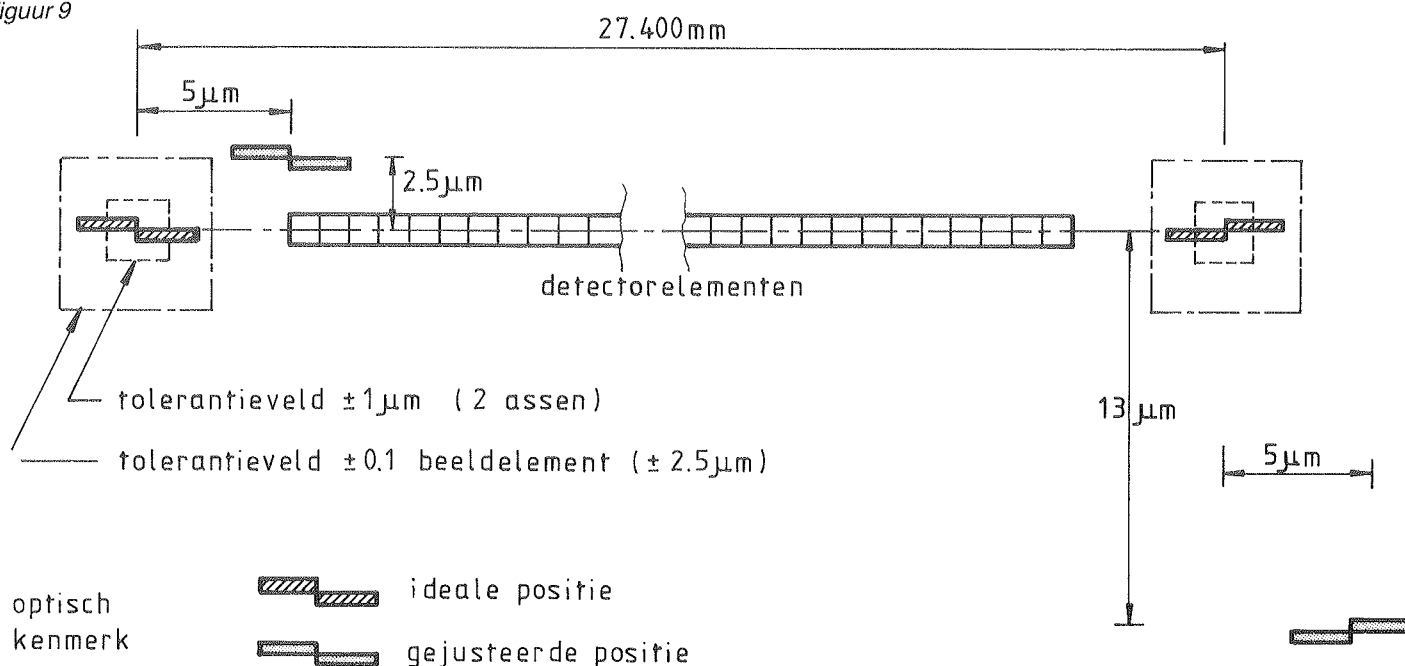


Fig. 9^{a1} Positioneringsfouten t.g.v. parasitaire capaciteiten

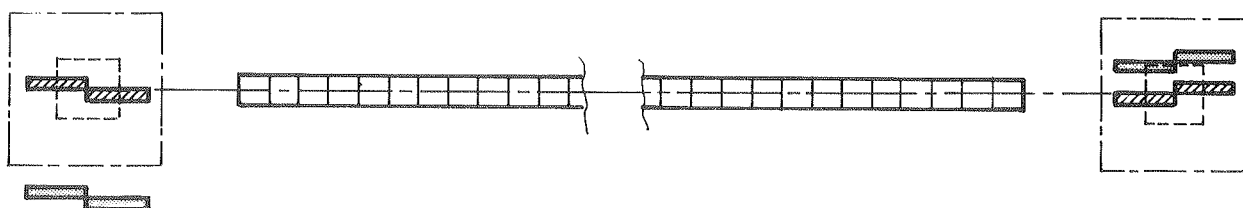


Fig. 9^{a2} Positioneringsfouten na aanbrengen van aardschermen ter onderdrukking van parasitaire capaciteiten

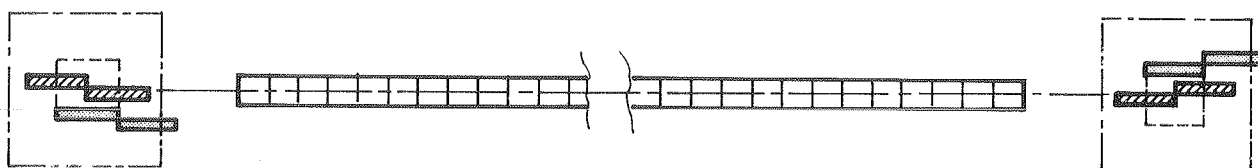


Fig. 9^b Na optimalisering aardschermen, justernauwkeurigheid beter dan 0.1 beeldelement

nauwkeurig te kunnen positioneren, uit een microscoop voor inspectie en uit een verlichtingssysteem waarmee zowel een homogene lichtbundel als een zeer klein lichtvlekje met een afmeting van ongeveer vijf micrometer aangeboden kan worden. De gehele testopstelling wordt met een microcomputer bestuurd, waarmee tevens een snelle verwerking van de grote hoeveelheid meetgegevens gebeurt.

CAESAR-scanner dient geschikt te zijn om zowel land- als zee-oppervlak te observeren.

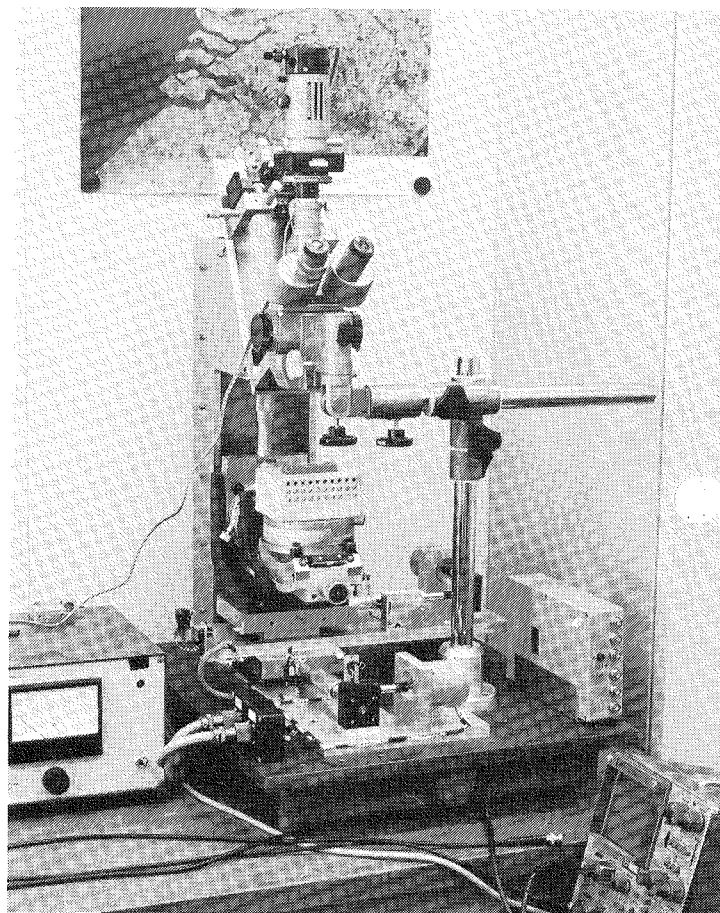
wordt de stroom meetgegevens na een eerste bewerking weggeschreven op een zogenaamde vluchttape. Om enige indruk te verkrijgen van de hoeveelheid: bij meting met het hoogste oplosend vermogen wordt elke 0.005 sec. de inhoud van 1024 detector-elementen (pixels) voor een drietal spectrale banden weggeschreven, waarbij de inhoud van elke pixel, na omzetting van het analoge detector signaal in een digitale waarde wordt weergegeven als een getal dat bestaat uit twaalf enen of nullen (12 bits). De maximale capaciteit van de door het NLR gebruikte opnamerecorder bedraagt 8,5 megabits per seconde (8.500.000 bits/sec.).

Met deze gegevensstroom wordt één vluchttape in ongeveer 15 minuten volgeschreven. Bij metingen boven zee is door het lager oplosend vermogen de gegevensstroom minder, ondanks het feit dat hier in veel meer spectrale kanalen wordt gemeten. De vol-

De verschillende CCD-detectors zijn aan een uitvoerig testprogramma onderworpen, waarbij, zonder op de details van de metingen in te gaan, grote verschillen in de technische prestaties zijn geconstateerd. Als resultaat hebben deze metingen geleid tot een duidelijke keuze van de detector die voor het vluchtmodel van CAESAR gebruikt gaat worden, waarbij als bijzonderheid nog vermeld kan worden, dat in dit geval de gekozen detector ongeveer één derde kost van zijn eveneens geteste collega's.

Veel gegevens

Elke meting met CAESAR levert een enorme hoeveelheid gegevens, die opgeslagen en voor de gebruiker verder verwerkt dient te worden. Tijdens de vlucht



Figuur 6. Voor het testen van de CCD's is een complexe opstelling vervaardigd, die opgebouwd is uit een groot aantal standaard componenten. Met behulp van een microscoop kan het CCD geïnspecteerd en (homogeen) verlicht worden. Een laser met enige optiek biedt het CCD een zeer kleine beeldvlek aan. Nauwkeurige positionering van een detector geschiedt met behulp van enkele rotatietafels en een tweetal lineaire sleden die met een micro-computer bestuurd kunnen worden. De computer verzorgt tevens de uitlezing en de verwerking van het detector signaal.

Beknopt overzicht van de CAESAR specificaties.

Spectrale band	NE $\Delta \rho$ (%)*	
Band 1 535 – 565 nm	≤ 0.5	Landobservatie
Band 2 655 – 685 nm	≤ 0.5	
Band 3 845 – 895 nm	≤ 0.5	
		Minimaal oplosend vermogen: 0.5 m
		Meetomstandigheden: maart-september 10-16 uur
Band 1 400 – 420 nm	≤ 0.05	Zeeobservatie
Band 2 435 – 455 nm	≤ 0.05	
Band 3 510 – 530 nm	≤ 0.05	
Band 4 555 – 575 nm	≤ 0.05	
Band 5 620 – 640 nm	≤ 0.05	
Band 6 675 – 695 nm	≤ 0.05	
Band 7 770 – 800 nm	≤ 0.05	
Band 8 990 – 1050 nm	≤ 0.05	

Gezichtsveld : totaal 25°, per detector element : 0.26 mrad.

* NE $\Delta \rho$ = Kleinst detecteerbare signaalverschil, gerelateerd aan verschil in reflectiepercentage.

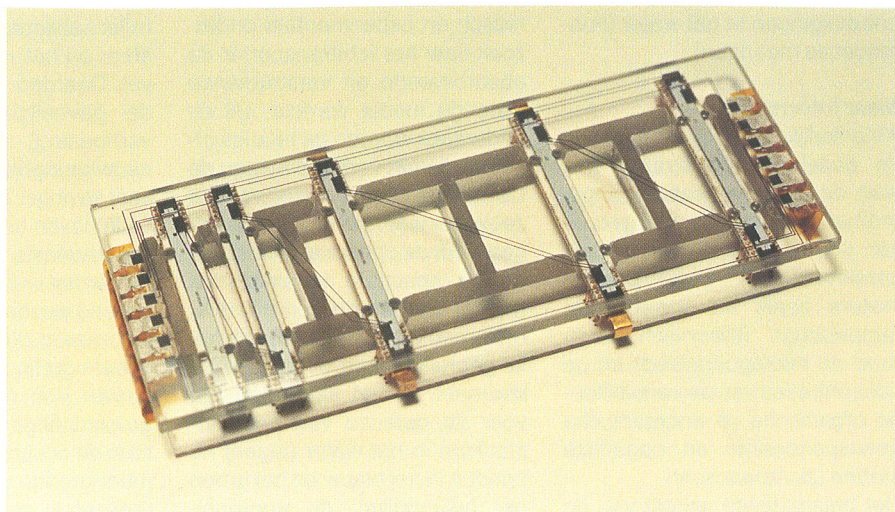
geschreven banden worden verder verwerkt op het RESEDA (= Remote Sensing Dataverwerking) systeem van het NLR. Hier kunnen met een computer de gegevens geordend, gecorrigeerd en in spectrale beelden omgezet worden en hier wordt de informatie uiteindelijk in door de gebruikers gewenste vorm weergegeven.

Met het beschikbaar stellen van financiële middelen uit het Stimuleringsfonds van Wetenschapsbeleid wordt beoogd de omvang en kwaliteit van de Nederlandse remote sensing inspanningen naar een hoger niveau te brengen. Daardoor worden zowel onderzoekers

als het bedrijfsleven perspectieven geboden om de te verwachten resultaten aan te wenden ten dienste van het ontwikkelen van nieuwe toepassingen en produkten.

Verwacht wordt dat de ontwikkeling van de CAESAR scanner, die volgens planning in 1985 operationeel wordt, daaraan een belangrijke bijdrage zal leveren ■

Figuur 10. Deze foto geeft een beeld van de aan de achterzijde van het venster gemonteerde dummy lijndetectoren. Door het venster ziet men tevens een verstijvingsstructuur die enerzijds aan het venster is verbonden en waaraan aan de andere zijde een dunne keramische plaat is bevestigd. Op deze keramische plaat is met dikke film techniek een elektrisch geleidend sporenpatroon aangebracht. Dit sporenpatroon dient voor de elektrische verbindingen van de lijndetectoren en de op het venster aangebrachte condensatorplaten. Deze combinatie heeft een zodanige stijfheid dat bij een drukverschil van 1 bar over het venster de vervorming daarvan minder is dan 1 μm . (Artikel Van Agthoven, pag. 105)



E330

1/11/84