

4/11/84

25 JULI 1984

## THEMA

A. HAMMERSCHLAG

DE INSTRUMENTATIE VOOR OPTISCHE  
AARDOBSERVATIE UIT DE RUIMTE

Het ontwerp van elke ruimtevaartmissie begint met de keuze van een geschikte baan. Zoals uit de in dit nummer besproken voorbeelden blijkt, bestaan er voor een aardobservatie-missie verschillende mogelijkheden, maar door een aantal overwegingen is de keuzevrijheid toch beperkt. De wetten van de mechanica bepalen dat de baan van een aardsatelliet altijd in een vlak door het middelpunt van de aarde ligt. Een satelliet die bijvoorbeeld constant 52° NB rondraait en iedere omwenteling Nederland zou zien, behoort dus tot de onmogelijkheden. Dit is een stevige beperking, niet alleen voor aardobservatie, maar voor alle werkelijk en gefantaseerd gebruik van de ruimte.

De wel mogelijke baanvlakken zijn aangeduid in figuur 1. De keuzemogelijkheden zijn beperkt tot die van de inclinatiehoek van het baanvlak ten opzichte van het evenaarvlak, en tot de richting van de snijlijn met het evenaarvlak. De laatste wordt meestal aangegeven door de lokale zonnetijd van het evenaarpunt onder de dagzijde van de baan.

Wil men dat de gehele aarde kan worden waargenomen, dan moet men een zogenaamde polaire baan kiezen, dus met een inclinatie van 90°. In werkelijkheid kiest men meestal een inclinatie van ongeveer 98°. Banen die niet precies polair of equatoriaal zijn, draaien met hun baanvlak onder invloed van de afplatting van de aarde langzaam rond de poolas. Bij genoemde waarde van de inclinatie (die nog van de baanhoogte afhangt) is deze zogenaamde precessie van het baanvlak precies gelijk aan de omloopsnelheid van de aarde om de zon. De lokale zonnetijd van de baan blijft dan door alle seizoenen heen constant. Meestal kiest men dan voor een tijd omstreeks 10 uur 's ochtends, omdat dan de waarnemingscondities voor het aardoppervlak qua belichting en weersomstandigheden gemiddeld het beste zijn. Aan deze optimalisering offert men dus de mogelijk-

heid op om de poolgebieden waar te nemen.

Voor aardobservatie komen normaliter alleen cirkelbanen in aanmerking omdat men de afstand tot het aardoppervlak zo constant mogelijk wil houden. De enige overgebleven keuze is dan nog de baanhoogte. Deze bepaalt via de wetten van Kepler de omlooptijd van de satelliet. Is deze zo dat de satelliet precies een geheel aantal malen per dag rondloopt, dan wordt na een dag weer precies hetzelfde gebied van de aarde waargenomen. Dit is natuurlijk gunstig voor de gebruikers die dit stuk willen waarnemen, maar de daarbuiten gelegen gebieden komen nooit aan de beurt. Om met de beschreven bijna-polaire baan de gehele aarde af te tasten, moet men een iets afwijkende baanhoogte kiezen. Het waargenomen gebied schuift dan iedere dag iets op, en na verloop van tijd is de gehele aarde waargenomen, waarna men weer opnieuw in hetzelfde gebied terecht komt. Hoe korter deze tijd tussen herhaalde waarneming van het zelfde gebied is, hoe hoger de zogenaamde temporele resolutie van de missie. Hoe hoger de baan, hoe groter het instrument moet zijn om een gelijkblijvende mate van detail op het aardoppervlak te zien. Anderzijds is de gezichtsveldhoek die nodig is om een bepaald stuk



A. Hammerschlag (1932) studeerde in 1956 af als natuurkundig ingenieur. Hij trad in 1958 in dienst van de Technisch Fysische Dienst TNO-TH. Is vanaf het begin in 1964 betrokken bij de ruimtevaartactiviteiten van het instituut en leidt sinds 1969 de afdeling Instrumentatie Ruimteonderzoek. De activiteiten hebben voornamelijk betrekking op optische instrumenten voor astronomische waarnemingen, standsbepaling van satellieten en aardobservatie.

van de aarde te zien kleiner, wat het optische ontwerp weer vereenvoudigt. Per saldo wordt meestal een baanhoogte omstreeks 700 km gekozen. Hierbij hoort dan een baansnelheid van iets meer dan 6 km/sec.

De precisie van de lanceertechniek is tegenwoordig zo groot, dat de besproken baaneigenschappen ook vrijwel perfect gerealiseerd kunnen worden.

#### Zwade

De breedte van de strook onder de satellietbaan (in het engels 'swath', in het nederlands 'zwade') die moet (kunnen) worden waargenomen hangt van de gewenste temporele resolutie af (figuur 2). Voor landobservatie wordt vaak gesteld dat deze twee weken moet zijn om het groeiproses van gewassen voldoende te kunnen volgen. In die tijd heeft de satelliet ongeveer 200 omlopen volbracht. Bij een omtrek van de aarde van 40.000 km moet dan iedere omloop een zwade van 200 km worden waargenomen om een volledig aardbedekking te kunnen realiseren, althans met één enkele satelliet.

Voor landbouwkundige toepassing wil men beeldelementen

van 40 m en minder. Dit betekent dus 5000 of meer beeldelementen over de zwade. Voor zee-waarneming is een temporele resolutie van enkele dagen gewenst, omdat de toestand van de zee sneller kan veranderen. Hiervoor is een zwade van bijna 1000 km gewenst. Anderzijds zijn voor zee-waarneming beeldelementen van ongeveer 200 m ruimschoots voldoende.

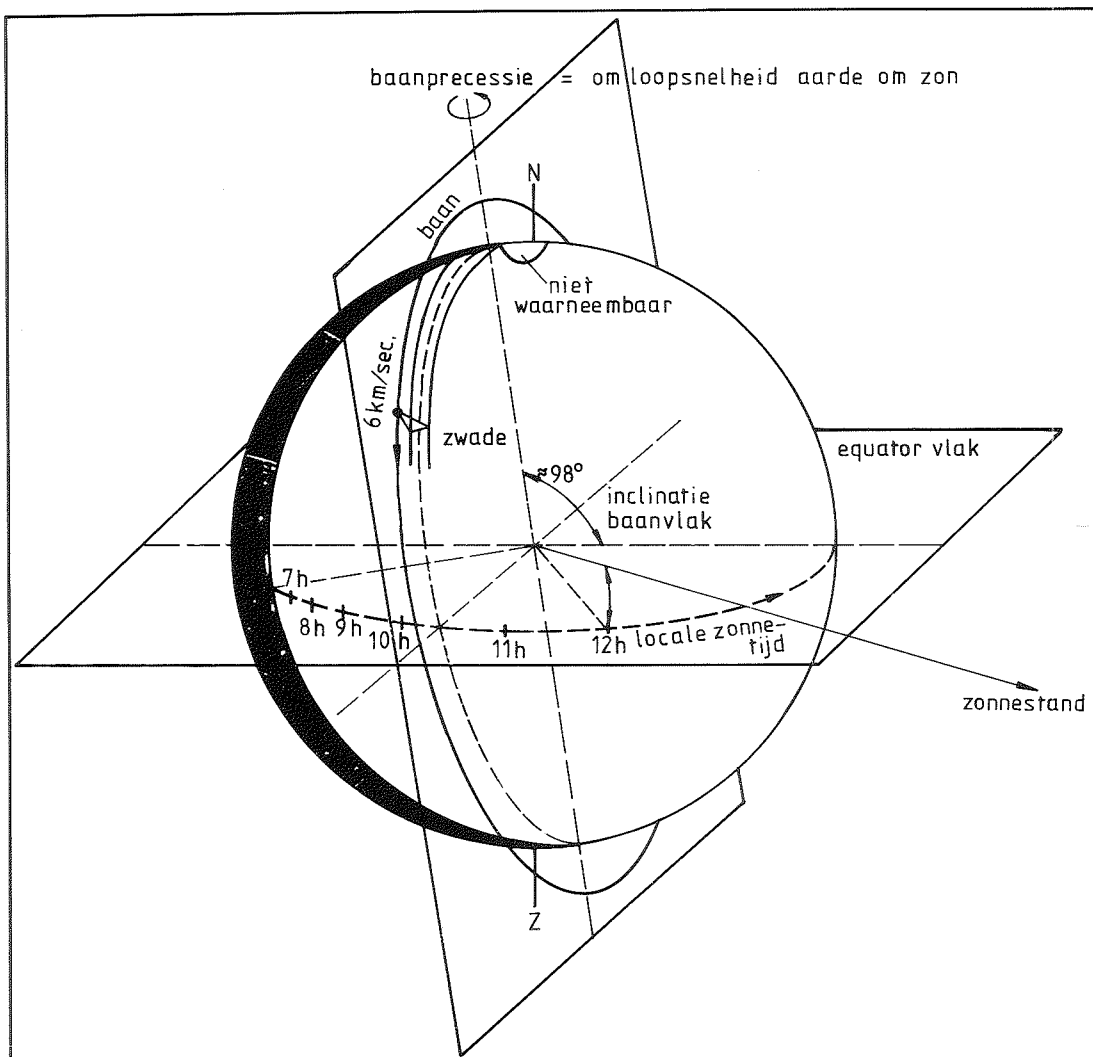
Missies waarbij de zichtrichting een zekere verstelmogelijkheid heeft, kunnen met een smallere zwade uitkomen. Als men zoals beschreven de hele aarde iedere twee weken in zijn geheel opneemt, wordt het merendeel van de informatie niet werkelijk gebruikt. Met een kleinere bestuurbare zwade kan de informatiestroom beter worden aangepast aan de werkelijke behoeften. Bij dergelijke geavanceerde missieconcepten past een hogere resolutie, waarbij men moet denken aan beeldelementen van ongeveer 20 m.

Per saldo blijkt voor alle missietypen het aantal beeldelementen over de breedte van het gezichtsveld niet zo veel te verschillen. Dit aantal is een goede indicator voor de moeilijkheidsgraad van

het waarnemingsinstrument. De genoemde waarde van 5000 elementen is karakteristiek voor de tegenwoordige stand van de techniek. Dit is een zeer zware eis aan de optiek en de rest van het systeem. Ter vergelijking kan dienen dat ons TV-beeld 625 lijnen heeft. Alleen de allerbeste fotografische apparatuur en speciale camera's voor astronomie en luchtkaartering werken op vergelijkbaar niveau. Deze maken echter gebruik van fotografisch materiaal. In dit geval hebben wij een lichtdetector nodig, die het beeld omzet in elektrische signalen die naar de aarde kunnen worden overgeseind. Deze moet zodanig zijn geconstrueerd dat alleen het licht dat op een begrensd gebiedje op de detector valt – het 'detector element' – in een elektrisch signaal wordt omgezet. Dit gebiedje mag hoogstens zo groot zijn als de afbeelding van het gewenste beeldelement op aarde. Er zijn soms goede redenen om het detectorelement kleiner te kiezen dan het beeldelement, maar groter is per definitie niet mogelijk. Zoals in figuur 2 aangegeven kan men in principe gebruik maken van drie typen detectoren, die wij aanduiden als punt-, lijn- en beelddetectoren.

### Ideale instrument

Op het eerste gezicht lijkt een beelddetector het ideale instrument voor ons doel. In punten A, B etc. zet men de mechanische of elektronische sluiters even open, en krijgt men zo een aaneengesloten reeks beelden. Bij een beeldelement van 40 m en een satellietnelheid van 6000 m/sec. is dan de maximale belichtingstijd 1/150 sec., anders wordt de bewegingsonscherpte groter dan het gewenste beeldelement. Er is een ruime keuze van beelddetectoren ontwikkeld voor televisie-opname. Er is echter al op gewezen dat het aantal beeldelementen daarvan veel lager ligt dan nodig. Men heeft dus een aantal opnamebuizen naast elkaar nodig om de zwade te bedekken. Voor ieder stuk zijn dan nog enkele buizen nodig voor de



*Figuur 1 Baanconfiguratie van aardobservatiesatellieten in bijna polaire baan. In combinatie met de aardrotatie kan de hele aarde in een zeker tijdsverloop worden waargenomen, uitgezonderd een klein gebied bij de polen. Door de afplatting van de aarde heeft de aantrekkingskracht een richting die niet precies naar het aardmiddelpunt gericht is. Het resultaat is een langzame precessie – zoals van een tol – van het baanvlak. Door de inclinatiekeuze van 98° bereikt men een precessie die gelijk is aan de omloopsnelheid van de aarde. Men neemt dan steeds op hetzelfde, zo gunstig mogelijk gekozen, moment van de dag waar.*

verschillende kleurbanden. Nu zijn TV-opname-buizen naar de begrippen van de ruimtevaart groot en kwetsbaar, terwijl zij ook nog een uitgebreide elektrische infrastructuur nodig hebben voor het genereren van hoogspanning en andere voedingen. Bouwtechnisch is dit dus een zeer onaantrekkelijke oplossing. Hier zou men wel over heen stappen als het gebruik van beelddetectoren ook werkelijk voordelen zou geven. Dit is echter niet zo, omdat de detector zoals beschreven slechts voor een fractie

van de tijd nuttig wordt gebruikt. Als wij dit vergelijken met de lijndetector, dan zien wij dat daar de belichtingstijd, en dus ook de hoeveelheid signaal, evenzo wordt gegeven door het quotiënt van beeldelement-grootte en satellietnelheid. Nu worden echter alle elementen doorlopend gebruikt en men bereikt dus hetzelfde resultaat met een veel geringer aantal detector-elementen en dus met een principieel veel eenvoudiger detector. Men kan ook verwachten dat het met een lijndetector eenvoudiger zal zijn

een groot aantal elementen om de breedte van het beeld te krijgen. De totale opzet die men met een lijndetector krijgt en die in het Engels met 'pushbroom scanner' wordt aangeduid, is bijzonder elegant en aantrekkelijk voor uitvoering in een ruimtevluchtwaardige uitvoering.

### Puntdetectoren

Beschouwen wij tenslotte de opstelling met puntdetectoren. Hiervan wordt er meestal een klein aantal, bijvoorbeeld zes naast elkaar gezet. Om de zwade te kunnen bestrijken is dan nog een snel oscillerende of eventueel roterende spiegel voor het waarnemingsinstrument nodig. Als we weer uitgaan van 40 m beeldelement en 6 km/sec satellietnelheid, en van zes puntdetectoren in parallel, dan blijkt dat



de spiegel een volledige slag moet maken in 1/25 sec. We moeten nu met zes detectoren hetzelfde werk verrichten als met 5000 elementen bij de lijndetector. De hoeveelheid signaal die we per beeldelement verzamelen is dus maar ongeveer 1/800 van die bij een lijndetector. Het optische systeem moet daardoor veel groter zijn om voldoende licht op te vangen. De benodigde oscillerende spiegel moet dan ook afmetingen hebben in de orde van circa 0.7 m. Het zal duidelijk zijn dat het een formidabel probleem is en dergelijke compo-

met zo'n hoge snelheid nauwkeurig te laten bewegen. Het systeem heeft echter ook voordelen. De optiek hoeft alleen dicht bij de optische as de benodigde kwaliteit te leveren, wat het optisch ontwerp aanzienlijk vereenvoudigt. Ook is de kleurscheiding die voor multispectraal werk nodig is, bij een kleine detector veel eenvoudiger. In deze opzet is het tevens mogelijk een zeer breed spectraal gebied, inclusief het hele infrarood, met één spiegelsysteem af te beelden. Als detector in het zichtbare gebied en het zeer nabije infrarood worden silicium photodiodes gebruikt die tot een bijna onovertrefbare graad van perfectie kunnen worden gemaakt. Voor het infrarood zijn vergelijkbare componenten in andere halfgeleider materialen te verkrijgen, die weliswaar gekoeld moeten worden, soms tot -200°C. Bij een kleine detector-afmeting is echter ook dit een hanteerbaar probleem. Men kan daarbij nuttig gebruik maken van afstraling naar de ruimte die een stralingstemperatuur van -270°C heeft.

Al met al is de pushbroom-scanner toch het aantrekkelijkste concept. Er kleefde echter een groot bezwaar aan. Toen men begon met de eerste aardobservatie-missies, bestonden er nog geen lijndetectoren, en voor het infrarood bestaan zij nog steeds niet. Het Amerikaanse programma met de ERTS- en LANDSAT-missies is dan, afgezien van enige halfslachtige toepassing van beeldbuizen, ook geheel geba-

seerd op de mechanische spiegelscanner. De technologie hiervan kon voortbouwen op die van weersatellieten en militaire luchtverkenning. Met de Thematic Mapper van LANDSAT-D is deze opzet waarschijnlijk dicht bij het eind van zijn mogelijkheden gekomen. (Figuur 3, zie pag. 115) Toen de TPD in 1974/75 voor het eerst zijn aandacht op dit terrein richtte, was er inmiddels wel een in principe zeer bruikbare lijndetector verschenen in de vorm van de lineaire 'charge coupled devices' (er worden in deze techniek ook beelddetectoren gemaakt). Deze CCD's worden nader beschreven in het artikel van Debusschere en Declerck. In essentie bestaan zij uit een lange rij lichtgevoelige elementen op één silicium chip met een ladingstransport-systeem waarmee de signalen van alle detec-

torelementen over één elektrische uitgang kunnen worden overgedragen.

Deze nieuwe mogelijkheid is in een vroeg stadium door Frankrijk opgepakt en geconcretiseerd in het SPOT-programma, dat in 1985 moet leiden tot de eerste pushbroom-aardobservatie-satelliet in de ruimte. Inmiddels heeft ook een minder ambitieus door Duitsland ontwikkeld instrument, de MOMS, een kortstondige ruimtedoep ondergaan in een recente vlucht van de Shuttle. SPOT zal tevens als eerste ook een zekere stuurbaarheid van de zichrichting hebben. Mogelijk heeft men hier van de nood een deugd gemaakt om de nadelen van de betrekkelijk kleine zwade die men bij deze eersteling aandurfde, te compenseren. (Figuur 4, zie pag. 115).

Ook wij hebben al spoedig de conclusie getrokken dat de CCD-pushbroom de aantrekkelijkste toekomstmogelijkheden bood.

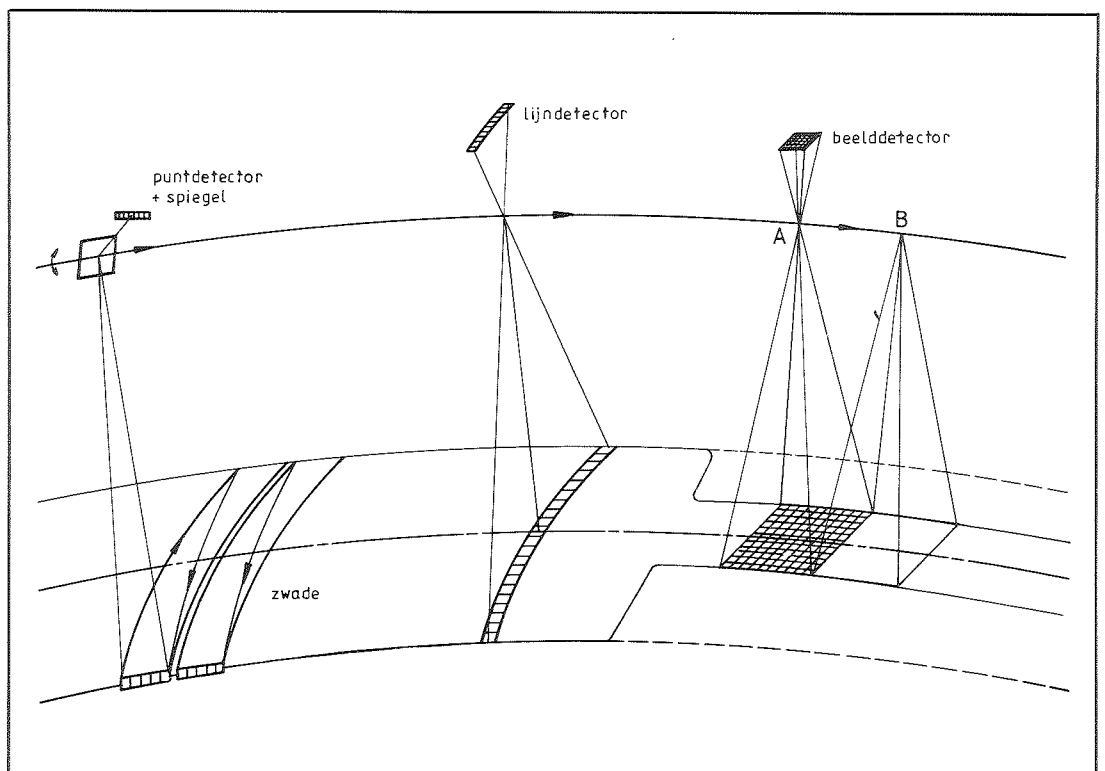
Via nationale en Europese studie- en ontwikkelingsopdrachten waarvan de neerslag in dit nummer te vinden is, hebben wij ons speciaal op de ontwikkeling van dit type instrument gericht.

### Formidabele taak

Ondanks de eenvoud van de opzet is de ontwikkeling van een pushbroomscanner voor gebruik in de ruimte een formidabele taak. Uit de afbeelding van de SPOT-satelliet kan men zich een indruk vormen van de afmeting van een hoge-resolutie-instrument. De fundamentele wetten van de lichtbuiging bepalen bij een gewenste afbeeldingscherpte een minimum afmeting van het optische instrument, die bij 20 m beeldelementen manskame camera's nodig maakt.

Kwalitatief geeft de gemaakte vergelijking van 5000 beeldelementen over het beeld met andere beeldvormende systemen nog een te optimistische indruk. Bij de meeste toepassingen van beeldinformatie is men primair geïnte-

*Figuur 2* Drie manieren van waarnemen met beelddetector, lijndetector en met een klein aantal puntdetectoren + bewegende spiegel. Tot nu toe zijn alle aardobservatie satellieten uitgerust met het laatste systeem, ondanks het nadeel van de bewegende spiegel en de geringe signaalhoeveelheid die per beeldelement wordt opgevangen. Het gebruik van beelddetectoren is niet effectief omdat deze maar een fractie van de tijd nuttig gebruikt worden. Het gebruik ervan in de ruimte heeft ook grote technische bezwaren. De ideale detector is de lijndetector. Geschikte lijndetectoren zijn echter pas de laatste tien jaar ontwikkeld in de vorm van de zogenoemde Charge Coupled Devices (CCD).



resseerd in de herkenning van geometrische structuren. Daarbij geeft het niet als het contrast van de structuur sterk vermindert. Ook voor zeer zwak contrasterende patronen is het oog zeer gevoelig, en er bestaan bovendien heel goede beeldbewerkingstechnieken om dit contrast weer te herstellen. Wie de laatste jaren een van de fascinerende foto's heeft gezien die van de buitenplaneten en hun manen zijn gemaakt, heeft zo'n door de computer opgeknapt beeld onder ogen gehad.

Ook bij de aardobservatie zijn er toepassingen, zoals bijvoorbeeld cartografie, waar men primair geïnteresseerd is in het bepalen van vormen en afmetingen. De belangrijkste toepassingen echter maken gebruik van de multispectrale informatie, waarbij men uit de verhouding van de signalen in de verschillende kleurbanden conclusies wil trekken over de aard van het oppervlak zoals bijvoorbeeld de soort van begroeiing. Voor deze toepassingen kan men veel minder contrastverlies verdragen. Dit betekent dan namelijk dat het signaal van een beeldelement verontreinigd is met dat van buurelementen. Men stelt daarom hogere eisen aan het contrastverlies op de schaal van een beeldelement, die ongeveer overeenkomen met die welke men normaliter zou stellen voor het dubbele aantal beeldelementen; althans zo wordt het meestal gespecificeerd. Hoewel dit niet de plaats is voor een fundamentele discussie over de formulering van gebruikerseisen, is het wellicht nuttig een alternatieve benadering te geven die geheel op technische overwegingen berust. De totale beeldkwaliteit die de gebruikswaarde bepaalt, wordt gegeven door de gecombineerde effecten van beeldelementgrootte, optische beeldfouten, overspraak in de detector en eventueel nog door effecten in de informatieketen die tot het eindproduct leidt. Meestal is in zo'n situatie een ontwerp waar de verschillende foutbronnen ongeveer gelijkwaardig zijn, de gun-

stigste oplossing. In dit geval leert een simpele berekening dat het signaal per beeldelement met de 3-de macht van de elementafmeting verloopt en de gegenereerde datastroom omgekeerd evenredig met het kwadraat. Het eerste effect bepaalt dat beneden een bepaalde grootte van het element de instrumentafmetingen snel groter worden dan het door lichtbuiging bepaalde minimum.

Het tweede bepaalt een grotere capaciteit van de hele informatieketen, die bij een instrument met een hoge resolutie toch al tientallen miljoenen bits/sec. moet verwerken. Verkleining van het beeldelement is dus een zeer dure manier om de gebruikswaarde op te voeren. De beste benadering is dan ook om te proberen aan de gestelde eisen te voldoen met zo groot mogelijke beeldelementen, en om de andere foutbronnen tot het uiterste terug te brengen. In feite is de relatie tussen technische formulering van de beeldkwaliteit en gebruikswaarde van het beeld nog onvolledig doordacht. De laatste is trouwens niet geheel gelijk voor verschillende gebruikers.

#### Minder moeilijk

Het ontwerpen van afbeeldingsystemen met de gewenste beeldkwaliteit is minder moeilijk gebleken dan verwacht. Bestaande basisontwerpen bleken voor de nieuwe eisen zonder ingrijpende wijzigingen geschikt gemaakt te kunnen worden. De bouwtechnische realisering van de ontwerpnaauwkeurigheid valt echter nog grotendeels te bewijzen. Meer nog dan de kwaliteit binnen één kleurkanaal is daarbij het probleem ervoor te zorgen dat men in de verschillende banden precies naar dezelfde plaats kijkt. Het is geen overdreven eis om te verlangen dat de beeldelementen binnen  $\pm 0.1$  beeldelement met elkaar overeenstemmen. Bij 5000 elementen is dit een relatieve nauwkeurigheid van 1:50000 en in absolute maat bij de gangbare afmetingen van detectorelementen  $\pm 2.5 \mu\text{m}$ . Dit is dan een gecombineerde eis

### De precisie van de lanceertechniek is tegenwoordig zo groot, dat de besproken baaneigenschappen ook vrijwel perfect gerealiseerd kunnen worden.

aan de vergroting- en vertekeningsgelijkheid in de verschillende golflengtegebieden, aan de geometrische nauwkeurigheid van de kleurscheiding, en aan de detector-positionering.

Het laatste deelprobleem wordt in dit nummer door Van Aghoven besproken. De kleurscheiding is naar ons gevoel een van de zwakste punten in alle ontwerpen tot nu toe. Hiervoor maakt men steeds gebruik van zogenaamde dichroïsche lagen, dat zijn multipele dunne lagen die de eigenschap hebben om licht beneden een bepaalde golflengte te reflecteren en daarboven door te laten (of omgekeerd). Deze lagen en additionele bandfilters worden gedragen door, meestal tamelijk ingewikkelde, prisma-combinaties. Deze zijn vooral bij lange detectorlijnen zeer moeilijk met de vereiste nauwkeurigheid te maken. De lagen zelf introduceren ongewenste polarisatie-effecten en beïnvloeden de afbeeldingskwaliteit. Men kan gemakkelijk alternatieven bedenken, maar geen van deze heeft tot nu toe de toets der kritiek kunnen doorstaan.

Bij de detector zelf is er het voor de hand liggende streven de gevoeligheid op te voeren en de ruis te verlagen. Hierbij is gestage vooruitgang geboekt. Bij de nieuwe ontwerpen kan daardoor de dimensionering inderdaad door de lichtbuiging worden bepaald, en niet door de signaalbehoefte (met een kleine marge). Een duidelijk probleem is de overspraak tussen naburige elementen, die in het silicium kristal plaatsvindt. Dit leidt ertoe aan ieder beeldelement twee detectorelementen toe te wijzen, waarvan het signaal wordt opgeteld. De langste lijndetectoren die men kan krijgen, bevatten 2048 elementen.

Dit is dus goed voor 1024 beeldelementen. Per kleur zijn dan vijf detectoren nodig. Met vier banden dus twintig detectoren die met hoger genoemde nauwkeurigheid moeten worden gepositioneerd.

Instrumenten voor zeewaarneming hebben zoals besproken veel grotere beeldelementen. De benodigde afmetingen van het optische systeem zijn daarvoor circa vijf- tot tienmaal kleiner. Het wordt dan aantrekkelijk om zoals in de door Bokhove besproken ocean colour monitor, het instrument op te bouwen uit modules die ieder één kleurband detecteren. De interne complexiteit van deze modules wordt daarmee tot het minimum beperkt. De benodigde uitlijningen en justeringen kunnen grotendeels tussen de gemakkelijk hanteerbare modules plaatsvinden. Soortgelijke constructies zijn al toegepast in de MOMS, die is toegepast in vliegtuigen en onlangs in een space shuttle vlucht. Ook de nu in aanbouw zijnde CAESAR vliegtuigscanner, besproken door Bunnik en Smorenburg, is volgens deze opzet gebouwd.

#### Hoge nauwkeurigheid

Het grote probleem van zeemetingen is dat men een zeer hoge nauwkeurigheid in de meting van de lichthoeveelheid verlangd, de orde van 1:1000 relatief. Daar is zelfs in het laboratorium een zeer moeilijke opgave. Een van de problemen bij CCD's is dat de gevoelheden per element nogal uiteenlopen. Dit verbetert gaandeweg, maar de oplossing is toch voornamelijk bereikt door de vooruitgang in de informatietechniek die het mogelijk maakt individuele ijkconstanten van duizenden elementen in de verwerking van de signalen mee te nemen. Deze ijkconstanten moeten van tijd tot tijd, zelfs bij de veel minder eisende landobservatie in de vlucht opnieuw worden bepaald, waarvoor aparte voorzieningen worden meegevoerd. Als ijkbron dient meestal de zon.

Overzien wij het besprokene nog eens in zijn totaliteit, dan blijkt dat

nog veel gedetailleerd ontwikkelingswerk mogelijk is, en ook nodig is om de nu in studie zijnde missies te kunnen verwerkelijken. Dit heeft dan voornamelijk betrekking op verdere verbetering van de kwaliteit van de detectoren en stroomlijning van de interne complexiteit vooral van de kleurscheiding en het detector-arrangement, waarbij langere detectoren zeer welkom zouden zijn. Naast het onvermijdelijke ploeterwerk is er nog duidelijk behoefte aan creatieve ideeën die de moeilijkheden structureel verminderen.

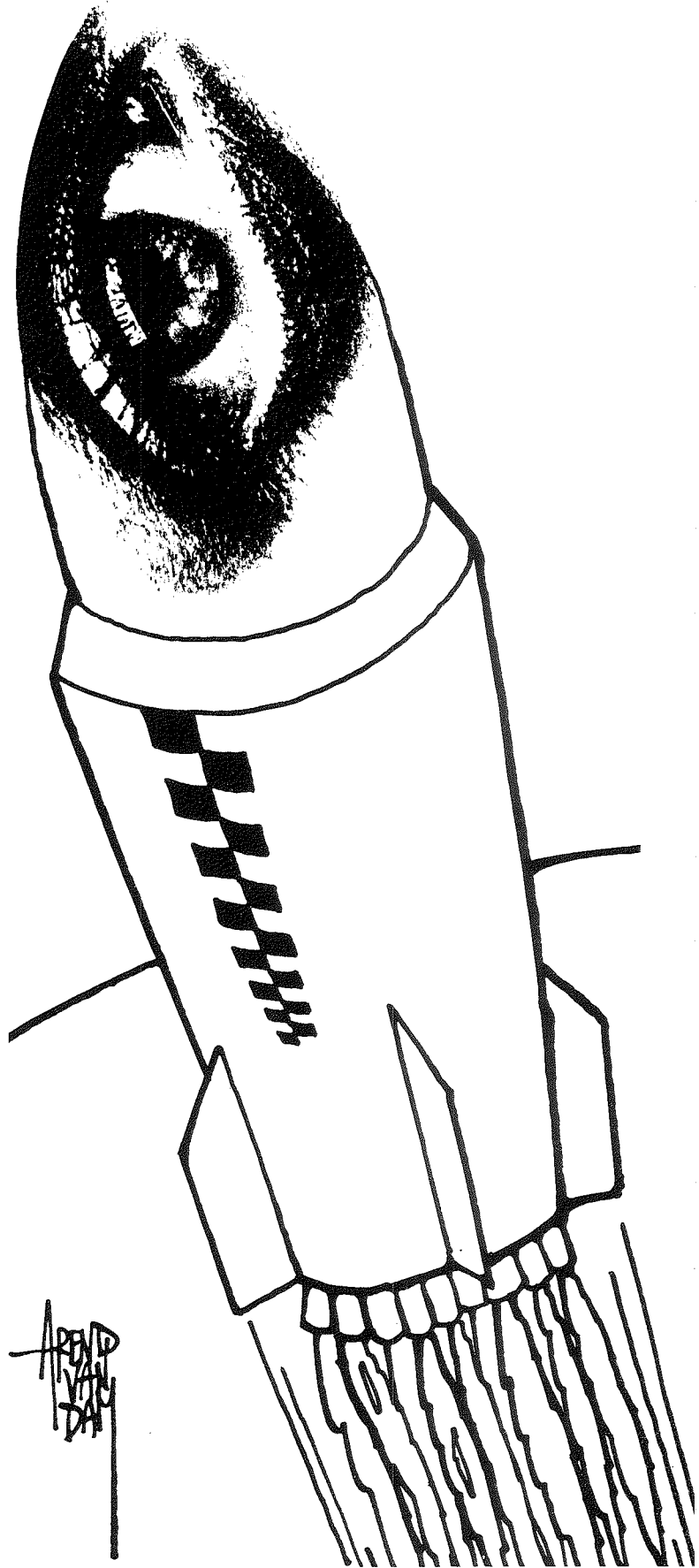
werkelijke doorbraak zou het zijn als er lijndetectoren voor het infrarood beschikbaar zouden komen. Hieraan wordt al sinds vele jaren gewerkt, maar bruikbare detectoren zijn nog steeds niet beschikbaar.

Men moet zich daarbij realiseren dat de invloed die men vanuit de ruimtevaart op de ontwikkeling van bijvoorbeeld detectoren kan uitoefenen maar uiterst beperkt is. Hoe groot de bedragen voor ruimtevaart-projecten ook mogen schijnen, het zijn slechts minieme fracties van de bedragen die omgaan op de markten voor TV-, datatransmissie- en defensie-apparatuur. Niemand begint aan een ontwikkeling die geen vooruitzichten op een van de hoofdtoepassingsgebieden heeft. Het beste wat men kan doen, is proberen bestaande ontwikkelingslijnen met aanvullende ontwikkelingsopdrachten in gewenste richting te sturen. Toch zijn dergelijke impulsen uit de ruimtevaart van belang voor de technologische ontwikkeling. Door de hoge kwaliteitseisen leveren zij vaak het zout in de pap.

SPOT heeft enkele miljoenen uitgegeven om CCD's met op bepaalde punten verbeterde kwaliteit te verkrijgen. De invloed daarvan konden wij bij een onlangs verrichte evaluatie van over de toonbank verkrijgbare CCD's duidelijk herkennen.

Uiteraard is de verdere technische ontwikkeling afhankelijk van de richting waarin de gebruikerseisen zich zullen ontwikke-

len. Het enige dat men als technicus zeker weet is dat gebruikers altijd meer en beter willen, en tenslotte accepteren wat mogelijk is. Het betere in dit geval is in de eerste plaats de resolutie van de beelden. Dit is zeker mogelijk als men maar naar grotere instrumenten, en dus duurdere missies gaat. Gezien de schaal van de economische en andere belangen die gediend (maar wellicht ook benadeeld) kunnen worden, hoeft dit geen bezwaar te zijn. De bedragen zijn echter wel zo groot, dat het nuttig effect duidelijk aangetoond moet zijn. Dit is niet alleen een technisch probleem van interpretatie van gegevens, maar ook een probleem van maatschappelijke inpassing. Om die reden alleen al is het niet zo waarschijnlijk dat in deze eeuw nog missies zullen vliegen met ambities die duidelijk uitgaan boven wat in dit nummer is beschreven. Er zijn echter ook andere beperkingen aan de toekomstige ontwikkeling. Optische observatie wordt onvermijdelijk gehinderd door bewolking en andere weersomstandigheden. Er zal ongetwijfeld een afbakening plaatsvinden van de toepassingsgebieden waar de weersafhankelijke microgolftechnieken betere resultaten geven. Naar ons gevoel is zeker bij hogere resolutie een meer stuurbare en selectieve opnametechniek nodig. De aandacht verschuift dan steeds meer van globale naar lokale problemen, waar men concurrentie gaat ondervinden van laag vliegende bemande vluchten en uiteindelijk van vliegtuigen; althans voor het soort toepassingen waarvoor men recht van overvliegen kan krijgen. Het is mogelijk dat er ook betrekkelijk simpele missies worden geconcipieerd die gespecialiseerd zijn op toepassingen waarvoor juist totale en globale bedekking nodig is. Inmiddels hebben wij het gevoel dat wij in Nederland met de verderop in dit nummer besproken plannen voor een TERS-missie op een spoor zitten dat dicht op de hoofdlijn van de ontwikkeling zit. ■







Figuur 3. De Landsat-D Thematic Mapper. Dit is het meest geavanceerde aardobservatie-instrument dat met een mechanische scanspiegel werkt. Het grote voordeel van deze opzet is dat met één instrument zowel het zichtbare- als het infrarode deel van het spectrum kan worden waargenomen. Op de voorgrond is de zogenoemde passieve stralingskoeler te zien. Door afstraling naar de koude ruimte worden hiermede de infrarood detectoren tot circa  $-200^{\circ}\text{C}$  gekoeld. De zichtopening bevindt zich rechts achter, bij de elleboog van de technicus. (Foto: Hughes Aircraft Corp.) (Artikel Hammerschlag, pag. 97)



Figuur 4. De hoge-resolutiecamera van de Franse SPOT satelliet. Dit is het eerste 'pushbroom' instrument dat in een operationele missie zal vliegen. Het is tevens de eerste aardobservatiemissie met een stuurbare zichrichting. De satelliet draagt twee identieke camera's die met de bovenaan zichtbare richtspiegel onafhankelijk kunnen worden gericht. (Foto: MATRA ESPACE, Toulouse) (Artikel Hammerschlag, pag. 97)