

De ontwikkeling van een stersensor voor telecommunicatie satellieten

*Peter Verhoeff en Ad Maas
TNO-TPD, Afd. Instrumentatie Ruimtevaart
Postbus 155, 2600 AD Delft*

Al geruime tijd is de TPD actief betrokken bij de ontwikkeling van tal van optische sensoren t.b.v. de standregeling van satellieten. De ontwikkelingen concentreren zich hoofdzakelijk op sensoren die gebaseerd zijn op detectie van de positie van de zon of van de (overige) sterren. Dergelijke TPD sensoren zijn in het algemeen "custom-made", dus het ontwerp wordt toegespitst op of aangepast aan de specifieke behoeften van een bepaalde missie. Dit artikel geeft een samenvatting van de ontwikkeling van een moderne CCD stersensor.

Inleiding

Voorafgaand aan de ontwikkeling van de CCD stersensor – het onderwerp van dit artikel – werd door de TPD in ESA verband een stersensor voor toepassing op spinnende wetenschappelijke satellieten ontwikkeld. De GIOTTO satelliet had deze zogenaamde TPD Starmapper aan boord. Deze sensor werkte gedurende de missie naar de komeet Halley dermate goed, dat zij ook weer werd opgenomen in het standregelsysteem van de vier satellieten voor de wetenschappelijke CLUSTER missie. Voor deze missie leverde de TPD vijf vluchtmodellen van de Starmapper; een aan boord van elk van de CLUSTER satellieten en een als reserve. De 4 CLUSTER satellieten zouden in de ruimte gebracht worden met de eerste experimentele Ariane 5 lancering. Tot ontzetting van met name de wetenschappelijke ruimtevaartwereld gingen deze satellieten verloren

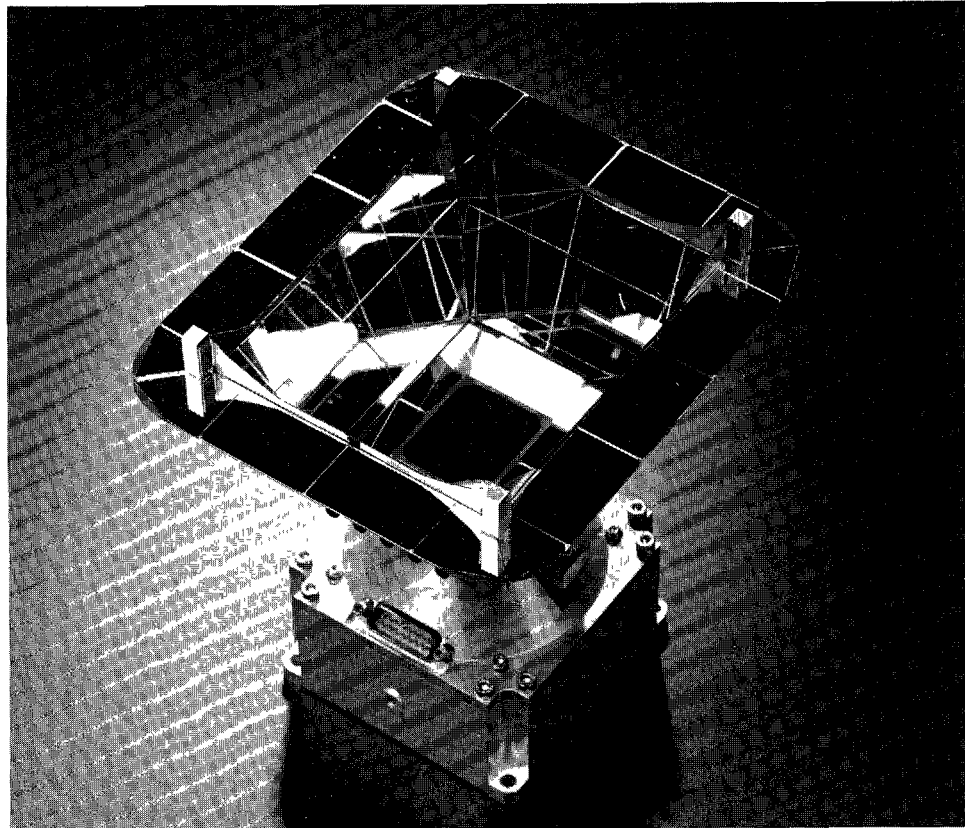
door de onfortuinlijke explosie van de Ariane 501 op 4 juni 1996, ongeveer 40 seconden na de lancering.

Inmiddels heeft ESA besloten de CLUSTER missie zo snel mogelijk alsnog volledig uit te voeren, waarbij een van de vier benodigde satellieten grotendeels wordt opgebouwd uit de beschikbare reserve-onderdelen en de overige drie satellieten opnieuw gebouwd worden. Op dit moment wordt bij de TPD dan ook koortsachtig gewerkt aan de produktie van 3 nieuwe Starmappers.

Het standregelsysteem van drie-assig gestabiliseerde satellieten vraagt om een ander type stersensor. In het begin van de jaren 80 werd bij de TPD een proefmodel ontwikkeld van een geavanceerde CCD stersensor met hoge nauwkeurigheid in een klein gezichtsveld.

Voornamelijk door de politieke situatie, die ertoe leidde dat Nederland een dergelijke complexe en dus dure sensor niet mocht leveren aan de toen in de aanloopfase verkerende wetenschappelijke ESA missies, werd de ontwikkeling in 1986 gestopt. In de loop van 1990 zou de ontwikkeling echter voortgezet worden, maar dan met een eenvoudiger versie met geringere nauwkeurigheid en een veel groter gezichtsveld.

In 1988 lanceerde ESA de telecommunicatiesatelliet ECS-5. Aan boord was een eenvoudige experimentele stersensor, die bedoeld was om de satelliet in het geval van een verstoring van de oriëntatie van de



Figuur 1 toont het gerealiseerde pre-kwalificatie model van het PRS camera.

antennes t o.v de aarde, sneller in de gewenste positie terug te brengen dan met het standaard standregelsysteem voor telecommunicatie satellieten mogelijk was. Deze sensor was ontwikkeld door ESTEC en werd 'Fast Recovery Sensor' (FRS) genoemd. De resultaten waren dermate goed dat ESA in 1990 besloot om een dergelijke sensor toe te passen in het standregelsysteem van toekomstige geostationaire telecommunicatie missies, zoals ARTEMIS (Advanced Relay and Technology Mission). In de ontwikkelingsfase voor ARTEMIS, werd door de TPD samen met Matra Marconi Space UK (MMS UK, het toenmalige British Aerospace), een prototype ster-sensor gebouwd, bestaande uit een camera

(TPD) en een elektronica unit (MMS UK). Karakteristiek voor deze sensor zijn de eenvoud van de elektronica (geen micro-processor) en het ontbreken van een thermo-elektrische koeler voor de detector in de camera. Dit camera concept van passieve koeling wordt gerealiseerd m.b.v. de z.g. strooilichtbaffle, die zo gedimensioneerd is dat zij een netto warmteverlies naar de koude hemel oplevert. Het is deze sensor, genaamd Pattern Recognition System (PRS) die in dit artikel in meer detail gepresenteerd wordt, waarbij de nadruk wordt gelegd op de camera. Van de camera werd een z.g. pre-kwalificatie model gerealiseerd en onderworpen aan een vrijwel volledig kwalificatie testprogramma.

Stersensor configuratie

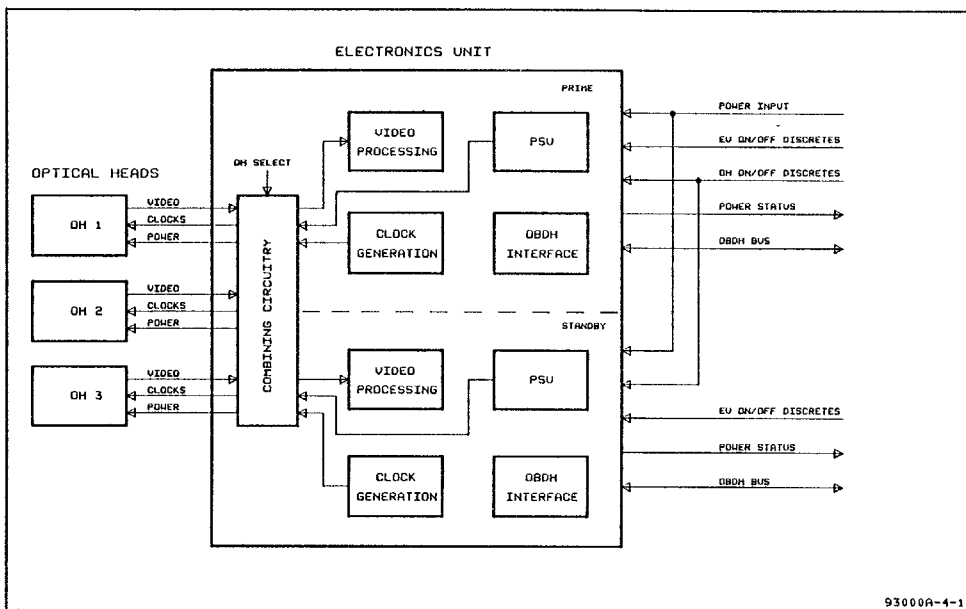
Een complete PRS stersensor bestaat uit drie camera's en één dubbel uitgevoerde (redundante) elektronica unit. Drie camera's zijn nodig vanwege het feit dat er gedurende bepaalde gedeelten van de orbit één verblind kan zijn door de zon. Ook moet er altijd rekening mee gehouden worden dat een camera defect kan raken. Om die reden wordt de elektronica unit dan ook redundant uitgevoerd.

Camera

Een camera bestaat uit een CCD detector van 385 x 588 pixels. Op deze detector wordt via een kleine doch lichtsterke lens het sterpatroon scherp afgebeeld. De beperking in resolutie wordt dus gevormd door het aantal pixels van het CCD alsmede door de beeldkwaliteit van de lens. Deze oplossing werd verkozen boven een oplossing waarbij een ster onscherp wordt afgebeeld en via een zwaartepuntsberekening de precieze stercoördinaten worden bepaald, omdat hiervoor een microproces-

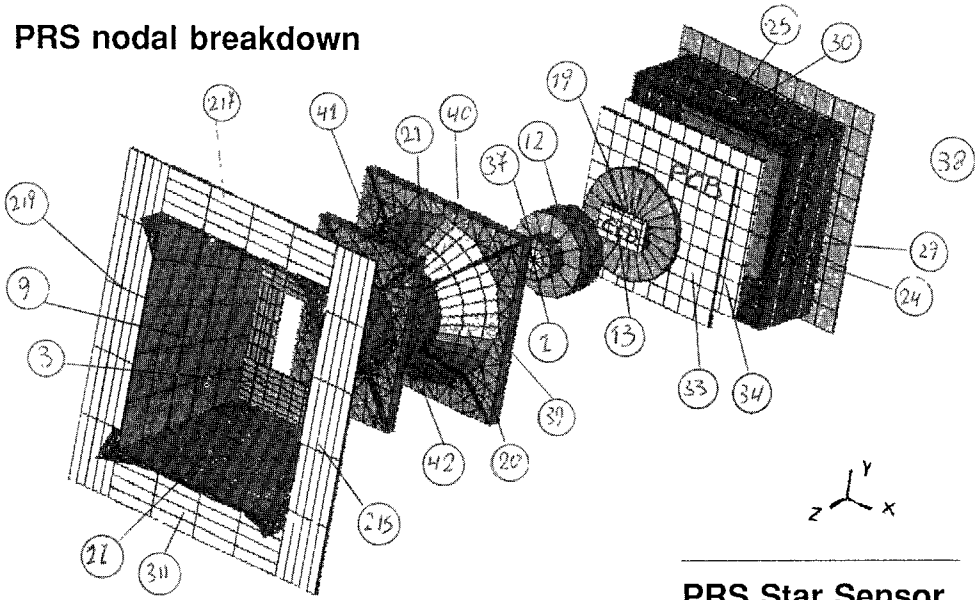
sor nodig is. De gekozen aanpak stelt echter wel hoge eisen aan het ontwerp en de samenbouw van de lens

Verder wordt er een z.g. tweetraps strooilightbaffle toegepast. Deze voorkomt dat direct en gereflecteerd zonlicht (afkomstig van b.v. reflecties op de grote zonnepanelen) van buiten het gezichtsveld de lens binnen treedt. Deze baffle speelt ook een actieve rol in de thermische huishouding van de sensor. D.m.v. een netto uitstraling naar de koude hemelachtergrond wordt de temperatuur van het CCD voldoende laag gehouden om zodanig ruisvrij te werken dat ook de zwakste sterren nog worden waargenomen. Een complicerende factor hierbij is de vereiste lange levensduur van telecommunicatie satellieten, nl. 10 tot 12 jaar. In deze periode treedt een aanzienlijke degradatie op van de thermische eigenschappen van de baffle coating, terwijl juist het CCD door stralingsbeschadiging een hoger ruisniveau krijgt.



Figuur 2
Blok-schema van de PRS elektronica

PRS nodal breakdown



Figuur 3
Thermisch knooppunt model

PRS Star Sensor

In de camera bevindt zich ook de elektronica die echt in de buurt van het CCD geplaatst moet zijn, zoals de CCD stuur-elektronica en de voorversterker. Omdat in het stersensor concept ook rekening is gehouden met een minimum aan bekabeling tussen elektronica unit en camera, werden de kloksignalen gecodeerd overgezonden en werd het aantal schakel- en voedingslijnen geminimaliseerd. Dat betekende echter een toename aan elektronica in de camera. Behalve de meest noodzakelijke circuits was hierdoor ook een klokdecoder logica en een DC/DC convertor nodig. Na de eerste fase, waarin alle elektronica in conventionele componenten werd gerealiseerd, werd dan ook besloten tot een verregaande miniaturisatie van de elektronica. Die werd bereikt door toepassing van large scale integration van de digitale circuits in een Field Programmable Gate Array (FPGA) en door toepassing van zoveel mogelijk Surface Mount Technology (SMT) componenten.

Elektronica unit

De centrale elektronica unit bevat o.m. de volgende functionele blokken: CCD klokp patroon generator en codeer logica, selectie logica voor een van de drie camera's, data-processing, voeding, gain/integratie-tijd omschakel logica en telemetrie- /telecommand interface logica.

De elektronica werkt niet autonoom maar wordt gecommandeerd vanuit het grondstation. Miniaturisatie van de digitale circuits is gedaan door toepassing van een Application Specific Integrated Circuit (ASIC).

Detailbeschrijving van de camera ontwerp

Aan de totstandkoming van de camera ging een behoorlijke ontwerp periode vooraf, waarin geanalyseerd maar ook gekarakteriseerd en beproefd werd. De kritische stukken uit het ontwerp worden hieronder in meer detail beschreven.

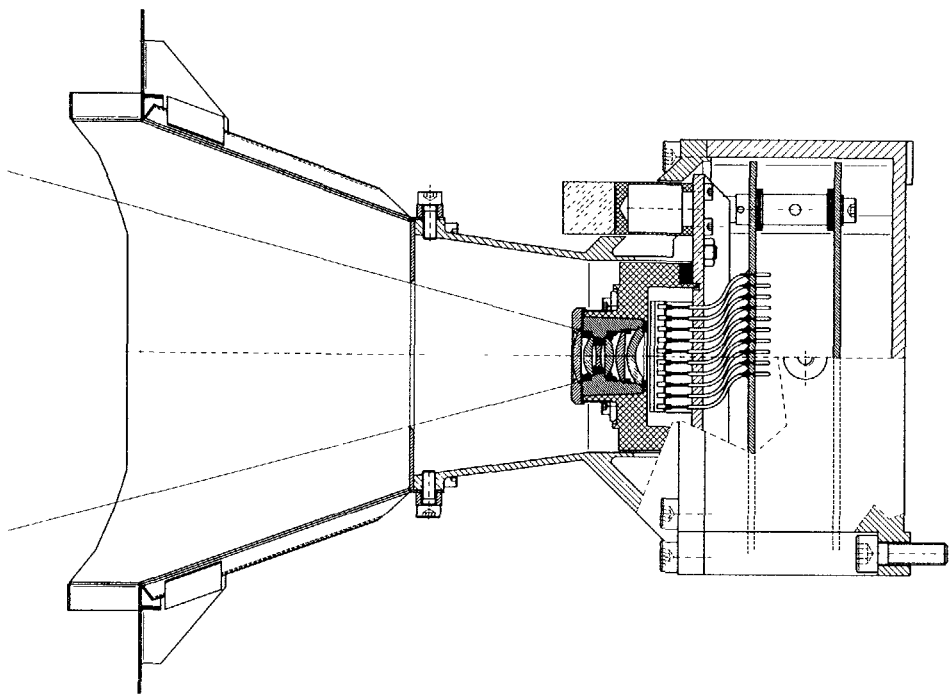
Thermische analyse

Als eerste werd een uitgebreide analyse verricht naar de mogelijkheden om het CCD via z.g. passieve koeling op een voldoende lage temperatuur te houden. Hiervoor werd m.b.v. speciale software een rekenmodel gemaakt, waarin de camera werd gemodelleerd door ruim 80 knooppunten, die onderling een representatieve warmtegeleidings- en warmtestralingskoppeling hebben. Figuur 3 toont een aantal knooppunten in dit model. Het was zaak om de thermische eigenschappen van alle mechanische verbindingen, boutverbindingen en lijmverbindingen zo goed mogelijk af te schatten. Verder konden in het model de omgevingscondities zoals invallend zonlicht nagebootst worden, evenals de thermische karakteristieken van de baffle. De uitkomst van de thermische analyse gaf aan dat het geplande passieve koelingsconcept inderdaad haalbaar was, mits een

aantal maatregelen werden genomen: de baffle moest aan de binnenzijde worden voorzien van een coating die netto meer warmte uitstraalt dan er aan zonnewarmte geabsorbeerd wordt. Dit lukt niet met zwarte coatings, zoals ze bij voorkeur in strooilightafschermingen worden toegepast, maar wel met een aan de achterzijde verspiegelde glaslaag, Optical Solar Reflectors (OSR) genaamd. Tevens moesten terzijde van de baffle nog extra uitstralende oppervlakken worden aangebracht. De door het rekenmodel voorspelde temperatuur van het CCD, aan het einde van een tien jaar durende missie kan met deze maatregelen beneden de $+27^{\circ}\text{C}$ worden gehouden, zelfs in gevallen waarbij de satelliet zelf behoorlijk door de zon is opgewarmd.

Strooilightanalyse

De uitkomst van de thermische analyse



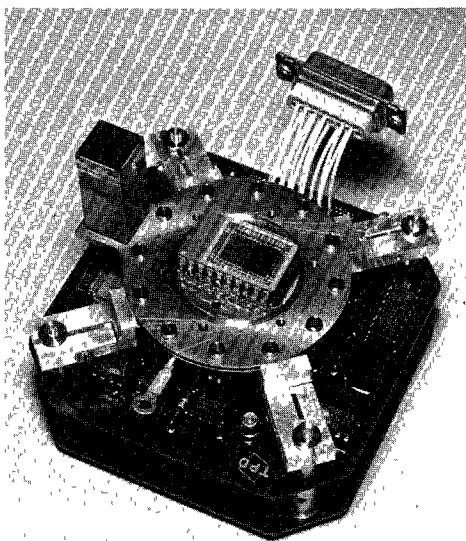
Figuur 4
Mechanisch overzicht van de camera

zorgde op het eerste gezicht voor een probleem: het lijkt tegennatuurlijk om de binnenzijde van een stroolichtbaffle van spiegellend materiaal te voorzien. Er werd een experiment gedaan met een baffle in een zonsimulator opstelling, en het resultaat van dit experiment was dermate moedigend dat de baffle werd gemodelleerd in speciale stroolicht berekeningssoftware. Wonderlijk genoeg gaven de eerste uitkomsten een veel betere stroolichtonderdrukking te zien dan een baffle die geheel met zwarte verf behandeld is. Dit is echter te begrijpen uit de baffle geometrie en uit de reflectie karakteristieken van zwarte verf en spiegellend glas. Zwarte verf reflecteert weliswaar slechts weinig (5 - 10%), het reflecteert wel over een grote ruimtehoek. Een spiegel daarentegen reflecteert sterk in slechts één richting, terwijl buiten de hoofdreflectie er een zeer lage diffuse reflectie over een beperkte ruimtehoek optreedt. Metingen aan de complete baffle hebben, ondanks een klein verstrend effect van naden van de vele OSR glastegetjes in de baffle, een zeer goede stroolichtonderdrukking aangetoond. Er moet echter worden aangetekend dat deze techniek niet voor alle soorten baffles werkt. Het gaat slechts goed bij baffles met een vrij wijde openingshoek. Tevens kan de OSR techniek uit montage oogpunt alleen bij rechthoekige baffles toegepast worden.

Optische analyse

Om te komen tot een kleine, doch lichtsterke lens met een beeldkwaliteit van ca. één pixelafmeting (22 μm) over het grote hoekbereik (30° X 40°) in een groot golfengete gebied werd een potentieel geschikt lensontwerp met optische rekensoftware geoptimaliseerd. Het optimalisatieproces werd beperkt door de keuze van glassoorten: de dosis deeltjesstraling in de ruimte zorgt ervoor dat gewone glassoorten snel verkleuren en zo een zeer lage transmissie krijgen. Speciale stralingsharde glassoorten moesten worden gebruikt. Het uiteindelijk gerealiseerde concept voldeed aan de

beeldkwaliteitseisen. Een tolerantie analyse, waarin alle mogelijke productiefouten in de 6 benodigde lenselementen en in de lensvattingen werden meegenomen, gaf aan dat zowel de lenzen als de vattingen met micrometer toleranties geproduceerd en op elkaar aangepast dienden te worden. Hoewel dit een lastige klus was, is zij tot een goed einde gebracht door de Optische Slijperij van de TU-Delft die de lenzen inderdaad met de gewenste nauwkeurigheid heeft gemaakt en TNO Industrie (het toenmalige TNO-Productcentrum) die de vattingdelen van titanium met zeer hoge precisie heeft vervaardigd. De optische configuratie van het lensstelsel is gegeven in figuur 6. De figuur toont ook het CCD venster. De kleinste lens heeft een diameter van slechts 7 mm! In figuur 7 is een overzicht van de lens gegeven, samen met een detail van de toegepaste lage tolerantie, vibratiebestendige lensmontage technologie. Overigens is de lensbehuizing robuust uitgevoerd om ook als deeltjesstralings afscherming voor het bijzonder stralingsgevoelige CCD te dienen.



Figuur 5
CCD, gemonteerd op drager structuur, gekoppeld aan de elektronica printborden

Detector

Voor de detector is niet een gewoon CCD gekozen op grond van de toch nog aanwezige donkerstroom bij temperaturen rond kamertemperatuur (de te verwachten operationele temperatuur). Er is na een uitgebreid meetprogramma gekozen voor CCD's, werkend volgens het zgn 'inverted mode principe', vaak aangeduid met de term 'Multi Phase Pinning mode' of MPP CCD's. Deze CCD's hebben een aanmerkelijk lagere donkerstroom, zodat ze bij hogere temperaturen gebruikt kunnen worden, hetgeen de eisen aan de passieve koeling minder stringent maakt. Een na deel van de door ons onderzochte CCD's (afkomstig van EEV in Engeland) was de beperkte ladingsopslag mogelijkheid, wat een probleem vormde voor zeer heldere sterren. Inmiddels zijn betere MPP detectoren geproduceerd.

Elektronica

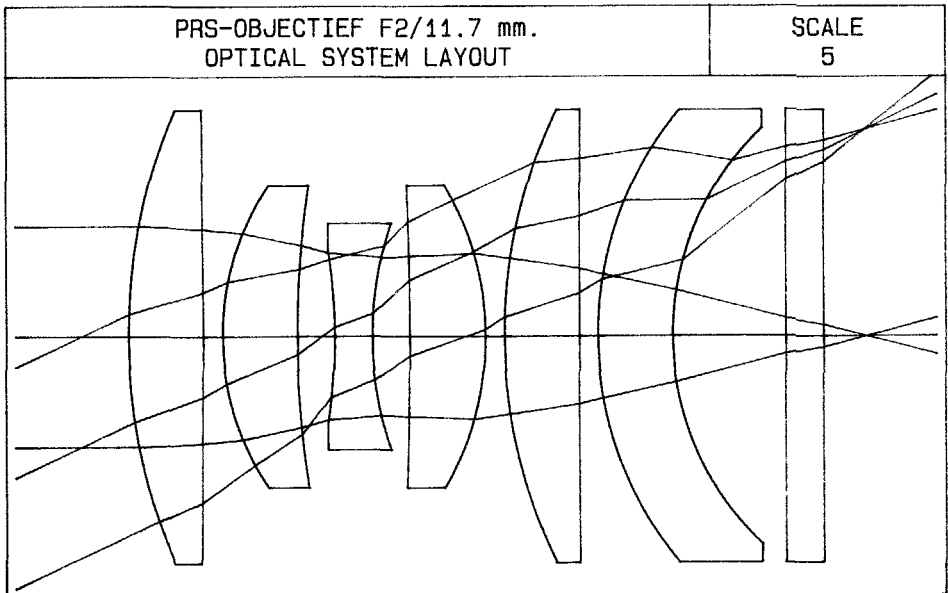
Om een compacte camera te realiseren, werd besloten tot een verregaande minia-

turisatie van de camera elektronica. Dit gebeurde enerzijds door toepassing van zoveel mogelijk miniatuur componenten, bedoeld voor de in de industrie al veel gebruikte 'Surface Mount Technology'. Daar kwamen we echter een tweetal problemen tegen. Ten eerste zijn lang niet alle componenten in een voor de ruimtevaart kwalificeerbare uitvoering verkrijgbaar.

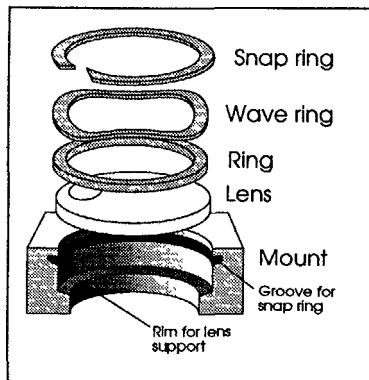
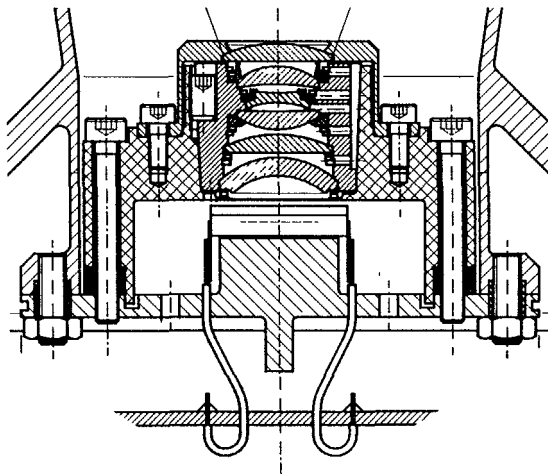
Ten tweede zijn de industriële montage-methoden voor de ruimtevaart niet betrouwbaar genoeg, en moesten alle componenten met de hand op de printborden gesoldeerd worden. Een andere miniaturisatie werd verkregen door 'large scale integration' van de digitale circuits in een zgn 'Application Specific Integrated Circuit' ofwel ASIC. Voor de gerealiseerde camera is een goedkopere versie van de ASIC, n.l. het Field Programmable Gate Array (FPGA) gebruikt.

Camera integratie

Een mechanisch overzicht van de camera wordt getoond in figuur 4.



Figuur 6
De optische configuratie van het lensstelsel



Figuur 7
Overzicht van het lensstelsel

Bij de samenbouw waren er een aantal kritische aspecten. Eén is er al genoemd, nl. de lens. Een ander aspect is de montage van het CCD exact in het brandvlak van de lens. De CCD chip bleek na meting in alle richtingen scheef in zijn behuizing te liggen. Onder een meetmicroscop, en met behulp van een manipulator en van dunne folies zijn we er in geslaagd om het gevoelige oppervlak samen te laten vallen met het brandvlak van de lens met een nauwkeurigheid beter dan de vereiste ± 0.005 mm. Figuur 5 toont het CCD, gemonteerd op zijn drager, die op zijn beurt weer is gekoppeld aan de twee elektronica printborden. Duidelijk zijn de FPGA en enige SMD componenten te zien.

Ook een kritisch aspect was de samenbouw van de baffle, die uit dunwandig aluminiumplaat bestaat, en waarop met hoge nauwkeurigheid vele OSR glastegeltjes geplakt moesten worden. Juist die nauwkeurigheidseis heeft ertoe geleid dat er een nieuwe lijmmethode bij TNO ontwikkeld is. De gebruikelijke methode voldeed niet uit het oogpunt van paralleliteit van de tegel-

tjes met de montagevlakken. Uit de strooilightanalyse was gebleken dat dit een bijzonder belangrijk criterium was.

Pre-kwalificatie testprogramma

De camera werd na de samenbouw aan een vrijwel volledig kwalificatie programma onderworpen. Dit programma bestond uit zgn. omgevingsconditie testen (Akoestische test, Vibratie test, Thermisch Vacuüm test en EMC test) en uit performance testen: sterdetectie, beeldkwaliteit, vervorming van de lens, resolutie en nauwkeurigheid en de mogelijkheid om sterren waar te nemen als de zon in de buurt staat. Tevens werd een zgn 'Thermal Balance test' uitgevoerd, waarmee de betrouwbaarheid van het thermisch rekenmodel aangetoond werd. Het uitgebreide test programma werd succesvol afgesloten.

Projectstatus en toekomst

Na de afronding van de in dit artikel beschreven camera ontwikkeling bleek dat voor ARTEMIS uiteindelijk toch gekozen werd voor een meer conventionele standregeling. Gesteund door het NIVR, is voor

het camera concept inmiddels echter een alternatieve vluchtmogelijkheid gevonden in de Israëlische TechSAT-1b; een kleine satelliet ontwikkeld door het Asher Space Research Center in Haifa. De lancering van TechSAT-1b wordt eind 1998 / begin 1999 verwacht. Daarnaast vindt samen met Austrian Aerospace de ontwikkeling van een kwalificatie model van de elektronica unit plaats, onder ESA contract.

Tenslotte wordt momenteel gewerkt aan een marktgerichte verbetering van de camera: samen met Delft Sensor Systems wordt een veel lichtsterkere lens ontworpen. Hierdoor zullen aanzienlijk meer sterren detecteerbaar worden en wordt het toepassen van moderne autonoom werkende sterpatroon identifikatie software in de elektronica unit mogelijk. Het ligt in de bedoeling om deze lens ook al toe te passen op de camera voor de TechSat-1b satelliet.

Dankwoord

Bij de uitvoering van de ontwikkeling van het pre-kwalificatie model van de camera werden waardevolle bijdragen geleverd door TNO Industrie (het toenmalige TNO-Produktcentrum: mechanisch ontwerp, onderdeelproductie en baffle integratie) en de Optische Slijperij van de TU-Delft (lensproductie en lensintegratie). Ook willen we het NIVR bedanken, voor de financiële ondersteuning, die onder meer werd aangewend om tot een gedegen miniaturisatie van de elektronica te komen.