

Cryogeen mechanisme in de infrarood spectrometer voor de Europese satelliet ISO

K.J. Wildeman, G. Ploeger, R. van der Schuur en J. Evers, Laboratorium voor Ruimteonderzoek, Groningen.

Het laboratorium voor Ruimteonderzoek te Groningen is verantwoordelijk voor het bouwen en testen van een cryogene spectrometer voor de wetenschappelijke satelliet ISO. ISO is een Europese satelliet die in 1993 zal worden gelanceerd. In dit artikel wordt een onderdeel van de spectrometer beschreven. Het is een mechanisme dat met grote precisie een spiegel kan verdraaien. De maximale slag is 13° , terwijl de gemiddelde elektrische dissipatie ongeveer 1 mW is. Het mechanisme is voorzien van een contactloze positie-sensor, waarmee een positiereproduceerbaarheid en stabiliteit van beter dan $3''$ wordt bereikt. Tijdens de lancering wordt het mechanisme blootgesteld aan hoge vibratie-niveaus. Zowel tijdens de lancering als tijdens de operaties in de ruimte heeft het mechanisme een temperatuur van ongeveer -270°C .

Inleiding

Het Laboratorium voor Ruimteonder-

zoek te Groningen ontwikkelt en bouwt in samenwerking met andere instituten een infraroodspectrometer waarmee spectra kunnen worden gemeten van 2,3 tot 45 micrometer. Het instrument is één van de vier wetenschappelijke instrumenten voor de Europese satelliet ISO (Infrared Space Observatory). Omdat zich onder deze vier instrumenten ook een spectrometer bevindt voor het golflengtegebied boven 45 micrometer, wordt het Groningse instrument "Short Wavelength Spectrometer" (SWS) genoemd. De ISO zal in 1993 met de Ariane worden gelanceerd en gedurende een jaar metingen verrichten aan sterrenstelsels. De SWS is een roosterspectrometer waarin de hoek van inval op het rooster moet worden gevarieerd over een hoek van ongeveer 25° . Door niet het rooster zelf maar een spiegel vóór het rooster te draaien kon de draaiingshoek worden gereduceerd tot ongeveer 13° . De spectrometer opereert bij een temperatuur van ongeveer 3,5 kelvin. Om deze lage temperatuur te bereiken is ISO voorzien van een met vloeibare helium gekoelde cryostaat waarin de instrumenten zijn geplaatst.

Dit artikel beschrijft het mechanisme dat de spiegel vóór het rooster in de ge-

wenste positie brengt⁽¹⁾. Het mechanisme is voorzien van een contactloze inductieve positie-sensor. De sensor is opgenomen in een regellus. Tijdens de lancering wordt het mechanisme blootgesteld aan hoge vibratie-niveaus. Omdat de cryostaat reeds vóór de lancering wordt gevuld met vloeibare helium, moet het mechanisme bestand zijn tegen deze vibraties terwijl het een temperatuur heeft van 3,5 kelvin. Tests op prototypes hebben aangetoond dat het mechanisme dit doorstaat. Met het prototype werd een positiereproduceerbaarheid van beter dan $3''$ bereikt, terwijl de gemiddelde elektrische dissipatie ongeveer 1 mW was.

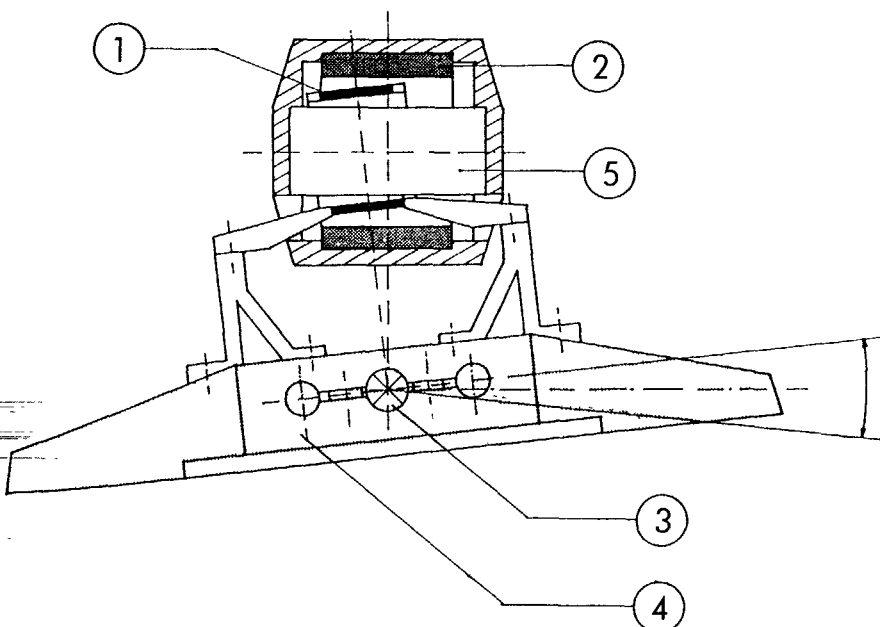
We beschrijven achtereenvolgens de eisen die aan het mechanisme worden gesteld en het principe van de gekozen oplossing. Vervolgens behandelen we een aantal aspecten die bij de materiaalkeuze een rol speelden. Tenslotte geven we de meest belangrijke testresultaten.

Aan het mechanisme gestelde eisen

De eisen die aan het mechanisme worden gesteld zijn in twee categorieën in te delen. In de eerste plaats legt de plaatsing van het mechanisme in een met vloeibaar helium gekoelde cryostaat aan boord van een satelliet ons speciale eisen op. De tweede categorie bevat de functionele eisen die aan het mechanisme worden gesteld.

De belangrijkste eisen uit de eerste categorie zijn:

- Er kan slechts een beperkte hoeveelheid koelmiddel (vloeibaar helium) worden meegenomen in verband met het maximaal toelaatbaar lanceergewicht. Dit dwong ons naar een ontwerp te streven met een geringe elektrische dissipatie, immers de dissipatie beïnvloedt direct de verdampingssnelheid van het helium en daarmee de levensduur van de satelliet. Voor de SWS is totaal 10 mW beschikbaar. Voor het mechanisme is slechts een klein deel (enige milliwatts) van dit budget beschikbaar.
- Het mechanisme moet betrouwbaar zijn bij een temperatuur van 3,5 kelvin.
- Om de lancering te overleven moet het mechanisme extreem hoge vibratie-



Figuur 1 Principe van het mechanisme. Een spoel [1] beweegt in een ringvormige radiaal gemagnetiseerde magneet [2]. De spoel is verbonden met de spiegel [4]. De spiegel is gelagerd met twee kruisveerscharniers en kan over een hoek van ongeveer 13° draaien. Het motorhuis (gearceerd) en de kern [5] zijn gemaakt van zacht magnetisch materiaal.

Cryogeen mechanisme

niveaus kunnen weerstaan bij deze lage temperatuur.

- Omdat we een hoge betrouwbaarheid eisen is een voorziening om het mechanisme tijdens de lancering te vergrendelen (om het te ontlasten) niet aantrekkelijk. De ontgrendeling zou na de lancering kunnen weigeren.

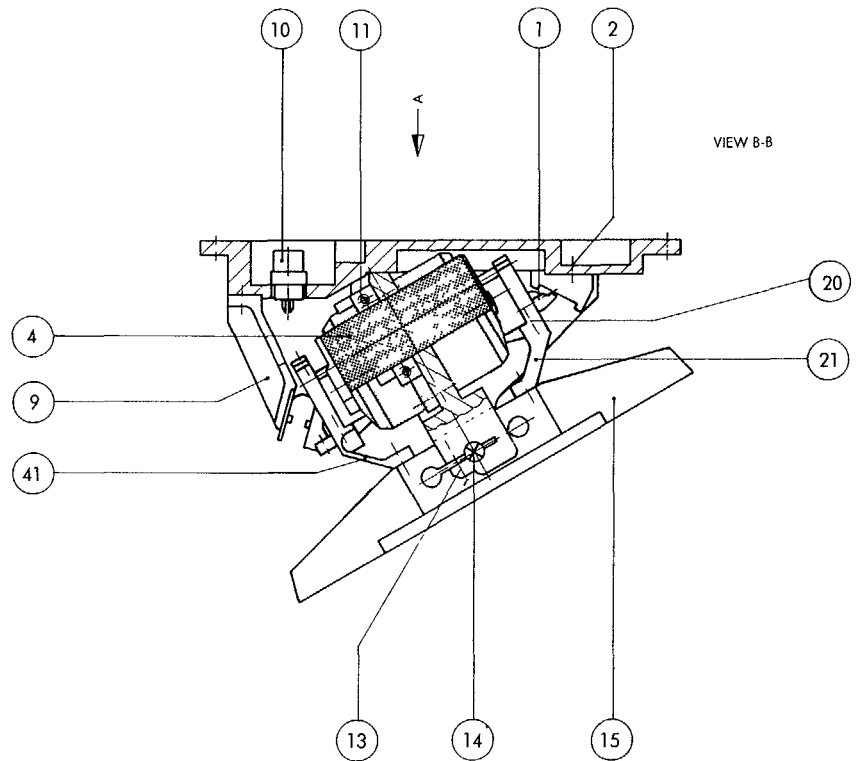
De belangrijkste eisen uit de tweede categorie zijn:

- Totale hoek van rotatie van de spiegel is ongeveer 13° .
- Positiereproduceerbaarheid en stabiliteit: beter dan $3''$.
- Geen mechanische ruis om verstoring van de zeer gevoelige detectoren te voorkomen. Zelfs een langzaam draaiend kogellager (bijvoorbeeld) zou al een ruisbron kunnen zijn.

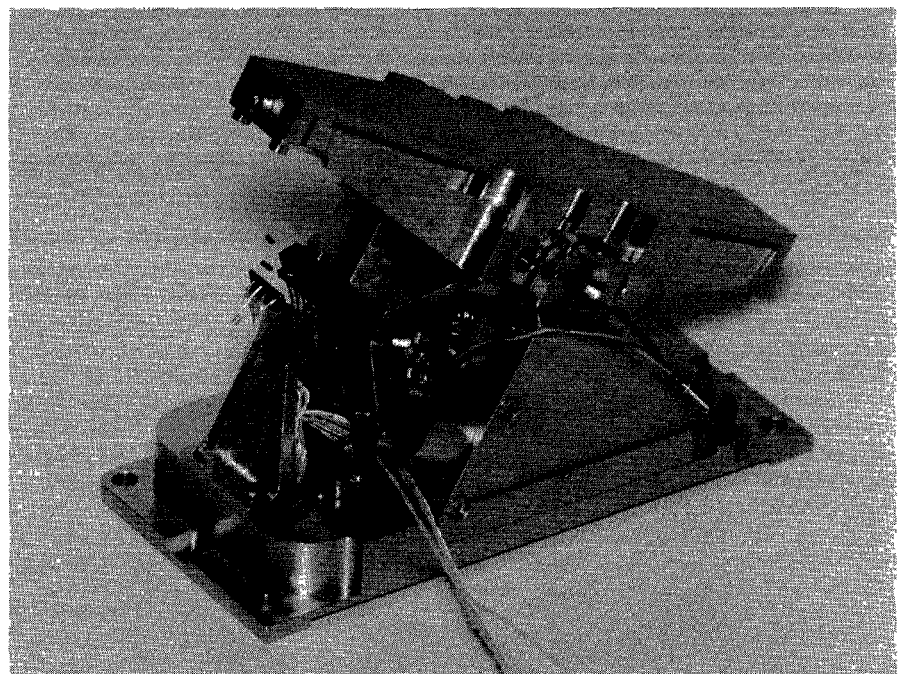
Ontwerp

In een oorspronkelijk ontwerp was de spiegel gelagerd met kogellagers en werd aangedreven door een stappenmotor via een schroefspil en zelfmerende schroef. Een in principe eenvoudig ontwerp dat wellicht zou kunnen werken. Het is een zelfblokkerend systeem, waardoor geen stroom nodig is om de spiegel in de gewenste positie te houden. Maar het heeft een aantal belangrijke nadelen, zoals de mechanische wrijving en slijtage in lagers en overbrenging. Dit zijn moeilijk voorspelbare processen die een uitgebreid kwalificatieprogramma noodzakelijk maken. Vooral als een foutloze operatie gedurende lange tijd moet zijn verzekerd, zoals in ruimtevaartprogramma's, zijn slijtage en wrijving ernstige nadelen.

We hebben daarom voor een andere weg gekozen. Het principe is een lineaire motor die direct de spiegel aandrijft; zie *figuur 1*. De spiegel is gelagerd met behulp van kruisveerscharnieren; de beperkte draaiingshoek staat zo'n toepassing toe. Aan de spiegel is de spoel bevestigd die zich in een magnetisch veld van een radiaal gemagnetiseerde ringmagneet bevindt; het magnetisch veld staat dus loodrecht op de bewegingsrichting van de spoel. Het mechanisme heeft een inductieve contactloze positie-sensor. Om aan de hoge eisen van stabiliteit en reproduceerbaarheid te kunnen voldoen is de positie-sensor opgenomen in een regellus. Het mechanisme is door het ontbreken van wrijving, slijtage en smering en door de toepassing van een contactloze sensor zeer betrouwbaar en eenvoudig te kwalificeren. Een nadeel is echter dat - behalve in de neutrale



Figuur 2 De praktische uitvoering van het mechanisme (ongeveer ware grootte). De spiegel [15] is gelagerd met kruisveerscharnieren [14], een produkt van Bendix Aerospace. In dit aanzicht zijn de motor (licht gerasterd) met daarvoor de positie-sensor (donker gerasterd) te zien. De armen [21] en [41] verbinden de motorspoel met de structuur van de spiegel en met de kern van de positie-sensor.



Figuur 3 Een prototype van het mechanisme. Op deze foto is de elektrische bedrading nog niet geheel geïnstalleerd. De spiegel is afgedekt met een beschermkap om beschadigingen tijdens werkzaamheden te voorkomen.

middenstand - voortdurend stroom door de spoel nodig is om de gewenste positie te handhaven. Maar het gedissipeerde vermogen is laag door de keuze van hoogwaardige materialen voor de permanente magneet. *Figuur 2* toont de praktische uitvoering van het mechanisme en *figuur 3* een prototype.

Materialen

De structuur en de spiegel zijn van aluminium 6082 gemaakt (de spiegel is vervaardigd door Ferranti, Schotland). Om interne spanningen in het materiaal te reduceren en daarmee vormveranderingen bij lage temperaturen te beperken, ondergaan kritische onderdelen vóór de laatste bewerking een warmtebehandeling. Voor het zacht magnetische materiaal in de motor is Vacoflux 50 van VAC, Hanau gebruikt. Een roestvast en goed te bewerken materiaal. Het materiaal verandert - althans in deze toepassing - niet merkbaar van eigenschappen bij cryogene temperaturen. De magneet is gemaakt van gesinterd kobalt-samarium (Vacomax 200, eveneens van VAC). Het is een hoogwaardig magnetisch materiaal waarvan de inductie bij 3,5 K nauwelijks anders is dan bij kamertemperatuur. Er is geen veroudering geconstateerd. De spoelhouder van de motor is ook vervaardigd uit aluminium 6082. De houder werd van een elektrisch isolerende laag voorzien door het aluminium te anodiseren (25 μm). Kunststof spoelhouders zouden een te groot verschil in uitzetting met het koper van de spoel kunnen geven, waardoor beschadiging van de spoel en vervorming van de spiegel zou kunnen ontstaan. De spoel is orthocyclisch gewikkeld op een mal; een wijze van wikkelen waarbij de windingen mooi sluitend tegen elkaar aan liggen^[2]. Pas daarna wordt de spoel op de uit twee helften bestaande spoelhouder geschoven. Beide helften van de spoelhouder en spoel worden verlijmd met 2216 van 3M (wellicht zijn er betere lijmsorten voor deze toepassing maar met 2216 hebben we de meeste ervaring). Om nog resterende verschillen in uitzetting op te vangen is aan één kant tussen spoel en spoelhouder een veerring opgenomen. Deze ring is vervaardigd uit het zeer goed te bewerken en vormvaste Vespel SP1 - een polyimide van Du Pont. Dit materiaal behoudt bij lage temperaturen voldoende veerkracht. Ook op andere plaatsen waar kunststof moet worden gebruikt is Vespel SP1 toegepast. Het draad voor de spoel is Posyn-Th van Pope met een koperdiameter van 50 μm . Als flexibele elektrische verbinding naar de motorspoelen zijn

bladveren van roestvaststaal met een dikte van 10 μm en een breedte van 1 mm gebruikt. Deze soepele verbinding is praktisch verliesvrij. Bovendien wordt bij dit principe geen kracht uitgeoefend in de richting waarin de spiegel beweegt. Er is dus geen extra stroom nodig.

Enige testresultaten

Van het mechanisme zijn nu drie prototypes gebouwd die uitvoerig zijn getest bij zowel kamertemperatuur als bij cryogene temperaturen. De gemiddelde dissipatie in de motor is ongeveer 0,5 mW en in de sensor ongeveer 0,7 mW bij 3,5K. De stroom voor volle uitslag is ongeveer 10 mA. Deze stroom hangt nauwelijks van de temperatuur af (minder dan 5% over het hele gebied van 300 kelvin tot 3,5 kelvin) doordat de eigenschappen van de magneten en de elasticiteitsmodulus van de kruisveerscharnieren nauwelijks van de temperatuur afhangen. Ook de output van de sensor is weinig afhankelijk van de temperatuur (ongeveer 10% over het hele temperatuurtraject). Dit is van groot voordeel; het mechanisme kan uitvoerig bij kamertemperatuur worden getest, waardoor het tijdrovend testen bij 3,5 kelvin kan worden beperkt. De kruisveerscharnieren vertonen enige hysteresis. Bij kamertemperatuur is de nulpositie ongeveer 2 minuten verschoven na een deflectie van 6°. Dit wordt echter - net als alle andere verstoringen op de positie - weggeregeld en heeft dus geen invloed op de nauwkeurigheid.

Tabel 1 Vibratietest voor het prototype van het mechanisme. De niveaus zijn door het ISO-project opgelegd.

Random vibraties: Testduur 2 minuten per as	
X, Y, Z	
gebied (Hz)	niveau
20- 150 Hz	+6 dB/oct
150- 300 Hz	0,09 g ² /Hz
300- 600 Hz	-9 dB/oct
600-2000 Hz	-3 dB/oct
globaal	6 g RMS

Sinus vibraties: 2 octaven per minuut	
X, Y, Z	
gebied (Hz)	niveau (0-piek)
5- 23	11 mm
23-100	22,5 g

Vibratietests

Het mechanisme is in tests blootgesteld aan hoge vibratie-niveaus om vast te stellen of een lancering kan worden overleefd. De kruisveerscharnieren bleken niet bestand tegen zo'n gesimuleerde lancering. Het was vooral de component boven 800 Hz in de "random vibraties" die de problemen veroorzaakte; zie *tabel 1*. Aanvankelijk gebruikten we een gesoldeerde kruisveerscharnier. In overleg met de fabrikant (Bendix Aerospace) hebben we nu gekozen voor een gelaste constructie, die wel bestand bleek tegen deze frequenties. De vibratietests worden uitgevoerd bij het NLR in een door ons ontwikkelde cryogene testopstelling^[3].

Conclusies

Tests hebben aangetoond dat het hier beschreven mechanisme zowel aan de eisen die het ISO-programma stelt als aan de functionele eisen kan voldoen.

Dat het produkt ook buiten Nederland vertrouwen geniet bleek toen ons instituut in een competitieve sfeer van een Frans-Duits consortium de opdracht wist te verwerven voor de bouw van een soortgelijk mechanisme voor één van de andere instrumenten in ISO.

Tenslotte

Een aantal mensen buiten ons instituut die op cruciale momenten een belangrijke rol in de verwezenlijking van het mechanisme speelden, willen we hier noemen. Klaas Dijkstra te Noordwolde en Bernard Winkel te Ter Apel hebben ons geholpen bij het oplossen van veel productieproblemen. De heer Lenders te Son heeft een belangrijke bijdrage geleverd in het vervaardigen van betrouwbare orthocyclisch gewikkelde spoelen. Tenslotte willen we de stagiaires van de Hogeschool Hilversum afdeling Fijnmechanisme Techniek (FMT) noemen. Sommige van hen hebben aangetoond dat nog niet geheel ontwikkelde kennis in belangrijke mate met enthousiasme en inzet kan worden gecompenseerd.

Literatuur

- [1] K.J. Wildeman, et al.; Grating drive for the short-wavelength spectrometer in ISO, Cryogenics, 1987, Vol 27, February, 68-72.
- [2] W.L.L. Lenders, The orthocyclic method of coil winding, Philips Technical Review, 1961/62, Vol 23, nr. 12, 365-404.
- [3] K.J. Wildeman, G. Ploeger; Cryogenic vibration test set-up for space qualification, Cryogenics 1989, Vol 29, May, 559-562. ■