



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Focal-plane wavefront sensors for direct exoplanet imaging: theory, simulations and on-sky demonstrations

Bos, S.P.

Citation

Bos, S. P. (2021, September 30). *Focal-plane wavefront sensors for direct exoplanet imaging: theory, simulations and on-sky demonstrations*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3214244>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3214244>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Nederlandstalige samenvatting

Inleiding

Het bestaan van werelden buiten ons zonnestelsel en hun bewoonbaarheid tart de fantasie van de mensheid al honderden jaren. Menig filosoof heeft gefilosofeerd over het bestaan van leven op planeten rondom andere sterren, ook wel genaamd exoplaneten. Dit intrigerende onderwerp heeft daarom velen mensen geïnspireerd om daadwerkelijk op zoek te gaan naar het bestaan van exoplaneten. Al in 1855 claimde de directeur van de sterrenwacht in Madras, William Stephen Jacob, een exoplaneet te hebben ontdekt rondom 70 Ophiuchi. Deze en vele andere claims die volgden in de 19^e en 20^e eeuw werden onderuit gehaald. Meestal omdat er een systematische fout over het hoofd was gezien.

Pas aan het einde van de 20^e eeuw was de technologie zover gevorderd dat de eerste exoplaneten konden worden gedetecteerd. In 1992 werden twee exoplaneten gevonden in een baan rondom een pulsar, het overblijfsel van een ster na een supernova explosie. Drie jaar later, in 1995, ontdekten Michel Mayor en Didier Queloz de eerste planeet in een baan rondom een ster vergelijkbaar met de zon. Sindsdien zijn er duizenden exoplaneten ontdekt en is onze kennis over exoplaneten enorm toegenomen. Er is echter nog veel onderzoek nodig voordat we kunnen bevestigen dat er ook daadwerkelijk exoplaneten bestaan die de benodigde ingrediënten hebben om leven te laten ontstaan en in stand te houden. Om dit te weten te komen moeten we onderzoeken wat de samenstelling van de atmosfeer is en of er vloeibaar water op het oppervlak voorkomt.

Er zijn verschillende methodes ontwikkeld om exoplaneten waar te nemen. Deze zijn te verdelen in indirecte en directe methodes. Indirecte methodes richten zich op de effecten die de exoplaneet heeft op de begeleidende ster. Bij de planeetovergangsmethode wordt heel precies de helderheid van de ster gedurende de tijd gemeten. Regelmatige dipjes in de helderheid van de ster duiden dan op de aanwezigheid van een of meerdere exoplaneten. De radiële-snelheid- en astrometriemethode richten zich op regelmatige bewegingen van de ster veroorzaakt door een exoplaneet die in een baan rondom de ster beweegt. De radiële-snelheidmethode richt zich specifiek op de radiële snelheid van de ster. Deze wordt gemeten door naar dopplerverschuivingen in het spectrum van de ster te kijken. De astrometriemethode gebruikt de tangentiële beweging van de ster om exoplaneten te vinden. Deze beweging wordt gemeten door heel erg nauwkeurig de positie van de ster aan de hemel vast te leggen gedurende de tijd. De planeetovergang- en radiële-snelheidmethode hebben samen al enkele duizenden exoplaneet detecties opgeleverd. Helaas kunnen indirecte methodes niet of maar in beperkte mate het oppervlak en de atmosfeer van exoplaneten in kaart brengen. De directe waarneemmethode is in dat opzicht veelbelovender, want bij deze methode wordt licht direct afkomstig van de exoplaneet opgevangen. Dit licht kan vervolgens worden geanalyseerd in intensiteit, spectrum, polarisatie en temporale variaties en daarmee kan veel informatie over de exoplaneet worden verzameld. Dit is extreem interessant voor het bepalen van de bewoonbaarheid van de exoplaneet en het detecteren van mogelijke tekenen van buitenaards leven.

Directe waarnemingen van exoplaneten

Directe waarnemingen van exoplaneten is de meest veelbelovende techniek om de atmosfeer en het oppervlak van exoplaneten te bestuderen en op zoek te gaan naar tekenen van leven. Maar voordat we op zoek kunnen gaan naar rotsachtige exoplaneten moeten er nog vele technische uitdagingen worden overwonnen. Er zijn twee fundamentele problemen in dit vakgebied: hoekscheiding en contrast. Deze problemen worden veroorzaakt door het golfachtige karakter van licht en de eindige grootte van de spiegels van telescopen. Dit zorgt ervoor dat het beeld van een waargenomen ster niet oneindig scherp is. Het ziet er uit als een centrale kern van licht, omringd door zwakkere ringen van licht. Deze structuur van licht wordt de puntspreidingsfunctie (*point spread function*; PSF) genoemd. De PSF is veel helderder dan een exoplaneet en beperkt de minimale hoekscheiding, ook wel hoekresolutie genoemd, die een telescoop kan waarnemen.

Een telescoop met een primaire spiegel diameter van 8 meter die waarneemt op een golflengte van 1 micron heeft een minimale hoekscheiding van 30 milliboogseconden. Stel dat we deze telescoop in de ruimte zouden plaatsen op een afstand van 10 parsec vanaf het zonnestelsel. Als we dan de Aarde zouden proberen waar te nemen, dan is de hoekscheiding tussen de Aarde en de Zon ongeveer 0.1 boogseconde en de verhouding in helderheid, ook wel het contrast genoemd, een factor 10 miljard. Door dit extreme contrast wordt direct waarnemen ook wel hoog-contrast afbeelden (*high-contrast imaging*; HCI) genoemd. De meeste telescopen staan op Aarde en hebben de extra uitdaging van turbulentie in de atmosfeer. Dit zorgt ervoor dat de PSF wordt uitgesmeerd tot een wolk van sterlicht en dat de hoekresolutie verslechtert.

Om de uitdagingen van het golfachtige karakter van licht en atmosferische turbulentie het hoofd te bieden zijn HCI instrumenten complexe optische systemen. Ze bestaan uit verschillende subsystemen die ontworpen zijn om golffrontfouten in het systeem te meten en corrigeren, sterlicht te onderdrukken en het licht van de exoplaneet te analyseren. Een schematisch overzicht van een HCI instrument voor een op de grond geplaatste telescoop is weergegeven in Figuur 8.2. Licht van de ster is verstoord door de atmosfeer van de Aarde voordat het wordt opgevangen door de telescoop. Dit soort verstoringen noemen we golffrontfouten of aberraties. Het eerste subsysteem van het instrument is het adaptieve-opticasysteem dat de golffront verstoring meet met een golffrontsensor en vervolgens corrigeert met een vervormbare spiegel. Daarna komt de coronagraaf; een optisch systeem dat sterlicht onderdrukt in een gebied dat we het donkere veld noemen. In het donkere veld kan naar exoplaneten worden gespeurd. Door golffrontfouten is de onderdrukking van de coronagraaf niet perfect en blijft een restant van sterlicht over. Om dit restant te scheiden van exoplaneet licht wordt dit doorgestuurd naar een of meerdere afbeeldingsystemen. Deze systemen gebruiken verscheidene waarnemstrategieën om het licht van de exoplaneet te onderscheiden van het overgebleven sterlicht. Deze waarnemstrategieën kunnen bijvoorbeeld gebruiken maken van verschillen in het spectrum, polarisatie of coherentie tussen het sterlicht en exoplaneet licht.

Naast de hierboven beschreven uitdagingen zijn nog andere factoren die directe waarne-

Een hoog contrast beeldvorming systeem

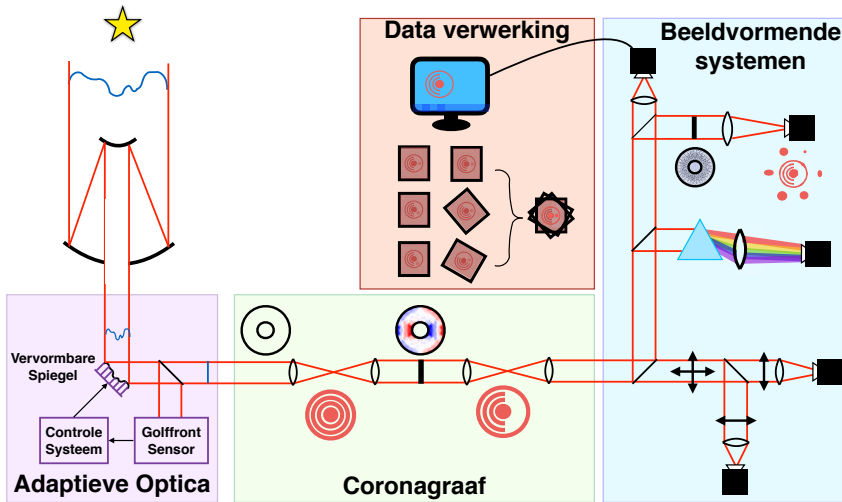


Figure 8.2: Schematisch overzicht van een hoog-contrast afbeeldinstrument. Het golffront van sterlicht wordt vervormd door de atmosfeer van de Aarde. De telescoop vangt het licht op en stuurt het door naar het adaptieve-opticasysteem. In dit systeem meet de golffrontsensor de golffront verstoring en geeft deze meting door aan het controlesysteem. Het controlesysteem berekent vervolgens hoe de vormbare spiegel moet worden vervormd om de golffront verstoring te corrigeren. De coronagraaf onderdrukt vervolgens het sterlicht door middel van optische manipulaties en stuurt het overgebleven sterlicht en exoplaneet licht door naar verschillende afbeeldsystemen. Deze systemen meten de verschillende eigenschappen van het licht om het exoplaneet licht te onderscheiden van sterlicht (bijvoorbeeld spectrum en polarizatie). Tijdens de data verwerking wordt zo veel mogelijk van het overgebleven sterlicht weggehaald om de exoplaneet zichtbaar te maken. Figuur gemaakt door David Doelman.

mingen van exoplaneten lastig maken. Een van deze factoren zijn golffrontfouten die niet worden gemeten door de primaire golffrontsensor in het systeem. Niet-gemeenschappelijk-pad aberraties (*non-common path aberrations*; NCPA) zijn aberraties die voortkomen uit de optica die na de primaire golffrontsensor zijn geplaatst. NCPA worden veroorzaakt door uitlijnfouten, productiefouten en turbulentie in het optische systeem. Deze aberraties zijn dynamisch en veranderen van vorm en sterkte gedurende tijdschalen van seconden, minuten en uren. Deze veranderingen worden veroorzaakt door temperatuur en luchtvochtigheid schommelingen gedurende de waarnemingen.

Het lage-windsnelheidseffect (*low-wind effect*; LWE) is een ander soort golffrontfout dat exoplaneet waarnemingen lastig maakt. De golffrontfouten van het LWE ontstaan door de telescoopstructuur vóór de primaire golffrontsensor, maar hebben een specifieke vorm die lastig te meten zijn door de gebruikelijke golffrontsensoren. Het LWE komt voor gedurende situaties dat de windsnelheid laag is (lager dan een paar meter per seconde), dit zijn omstandigheden die normaal gesproken tot de beste waarneem omstandigheden worden gerekend. Wanneer de koepel opengaat voor waarnemingen stelt het de telescoopconstructie bloot aan de nachtelijke hemel. Dit resulteert in een snelle straling gedreven koeling van de constructie tot een temperatuur onder die van de omgevingslucht. Als lucht dan met een lage windsnelheid over de koude telescoopstructuur stroomt dan koelt de lucht snel af en verandert de brekingsindex van lucht. Dit introduceert aberraties met scherpe stappen in het golffront aan weerszijden van de telescoopconstructie die veranderen op tijdschalen van seconden.

Golffrontfouten, onder andere veroorzaakt door NCPA en het LWE, veroorzaken structuren in het beeldvlak die erg lijken op exoplaneten. Deze structuren worden spikkels genoemd en zijn de voornaamste bron van ruis die directe waarnemingen van exoplaneten verhinderen.

Beeldvlak golffrontsensoren

Een beeldvlak golffrontsensor (*focal-plane wavefront sensor*; FPWFS) is een uitermate geschikte oplossing om de hierboven beschreven aberraties te meten. Een FPWFS is een sensor die gebruik maakt van afbeeldingen van de ster om golffrontfouten te meten. Afhankelijk van de vorm en sterkte van de golffrontfout ziet de afbeelding van de ster er anders uit. Helaas geven niet alle golffrontfouten een unieke vervorming van de ster. Golffrontfouten met een even puntsymmetrie van gelijke sterkte maar met een verschil in teken (plus of minus) geven dezelfde afbeelding. Door deze ambiguïteit is het lastig om accuraat de golffrontfout te meten. Er zijn verschillende optische technieken bedacht om de ambiguïteit te breken. Zo kan bijvoorbeeld een kunstmatige puntsymmetrische aberratie worden geïntroduceerd, bijvoorbeeld door de camera uit focus te plaatsen. Belangrijk voor dit soort technieken is dat het beeldvlak van de wetenschappelijke camera wordt gebruikt, want dit zorgt er voor dat het niet-gemeenschappelijke pad wordt geëlimineerd. Het is dan wel belangrijk dat de FPWFS de capaciteit heeft om simultaan met wetenschappelijk waarnemingen de golffront metingen te doen om de waarneem efficiëntie hoog te

houden. Dit betekent dat de FPWFS geïntegreerd moet worden in de coronagraaf en de afbeeldsystemen.

Exoplaneetvariabiliteit

We verwachten dat exoplaneten, net zoals de meeste planeten in het zonnestelsel, wolken in hun atmosfeer hebben. Het detecteren en bestuderen van wolken op exoplaneten zal ons begrip van de atmosferische samenstelling en weersystemen op deze andere werelden verbeteren. Wolkenstructuren uiten zich als helderheid variaties in de tijd terwijl de exoplaneet roteert rondom zijn as.

Het waarnemen van variabiliteit bij exoplaneten is niet triviaal, want de meeste coronagrafen schermen de ster af en die is meestal de fotometrische referentie. Dit maakt het een uitdaging om de variabiliteit van exoplaneten te onderscheiden van veranderingen in de atmosfeer die gelijkaardige helderheid variaties geven. Om dit probleem te verhelpen zijn diffractieve methoden ontwikkeld die kunstmatige spikkels genereren om te dienen als fotometrische referenties. Deze spikkels zijn kopieën van de ster en ontworpen om niet te worden afgedekt door de coronagraaf en hebben een vooraf bepaalde helderheid. Ze worden gevormd door statische fase- of amplitudemodulaties toe te passen in het pupilvlak vóór het beeldvlakoptiek van de coronagraaf. De beperkende factor van deze oplossingen is echter hun coherentie met de in de tijd variërende spikkelachtergrond. Dit resulteert in interferentie die de vorm en helderheid van de kunstmatige spikkels dynamisch vervormt. Uiteindelijk beperkt dit op zijn beurt de fotometrische precisie.

Het probleem van interferentie kan worden omzeild door snelle, temporele modulatie van de vervormbare spiegel te gebruiken om de fase van de kunstmatige spikkels binnen een milliseconde te schakelen tussen 0 en π . Hierdoor wordt de interferentie uitgemiddeld en worden de kunstmatige spikkels effectief incoherent met de spikkel achtergrond. Dit verhoogt de fotometrische precisie van de kunstmatige spikkels. Bij een geavanceerdere methode wordt ook de positie van de kunstmatige spikkels afgewisseld, waardoor een nauwkeurige schatting van de achtergrond mogelijk is en de fotometrische precisie nog meer wordt verbeterd. Belangrijk bij de techniek met temporale modulate van de vervormbare spiegel is dat de primaire golffrontsensor en de vervormbare spiegel goed gekalibreerd zijn, omdat anders de kunstmatige spikkels niet de verwachte fase krijgen en daarmee hun fotometrische precisie kan afnemen.

Overzicht proefschrift

Dit proefschrift presenteert en valideert nieuwe beeldvlak golffrontsensoren in theorie, numerieke simulatie en gedurende waarnemingen. Daarnaast wordt een nieuwe optische methode geïntroduceerd om exoplaneetvariabiliteit metingen te verbeteren. Het ultieme doel is om de directe waarneming van rotsachtige exoplaneten met toekomstige extreem grote telescopen mogelijk te maken. De belangrijkste focus van dit proefschrift ligt op het

ontwikkelen van geïntegreerde oplossingen van coronagrafen en beeldvlak golffrontsensoren om niet-gemeenschappelijk-pad aberraties te meten in hoog-contrast afbeeldinstrumenten (Hoofdstukken 2 – 5). De laatste twee hoofdstukken onderzoeken een beeldvlak golffrontsensor om de aberraties van het lage-windsnelheidseffect te meten (Hoofdstuk 6) en een nieuwe optische methode om de signaal-ruisverhouding van exoplaneetvariabiliteit waarnemingen te verhogen (Hoofdstuk 7).

Hoofdstuk 1: Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een algemeen beeld geschetst van het vakgebied en de belangrijkste problemen waarvoor dit proefschrift een oplossing poogt te bieden. Er wordt tevens een uitgebreide introductie gegeven over beeldvlak golffront detectie en de meest gebruikte beeldvlak golffront detectiemethodes in het vakgebied worden gecategoriseerd aan de hand van de optische manipulaties waarmee ze het teken ambiguïteit breken.

Hoofdstuk 2: Beeldvlak golffront detectie met de vector-apodiserende faseplaat

Dit hoofdstuk introduceert een nieuwe beeldvlak golffrontsensor door de vector-apodiserende faseplaat (*vector-Apodizing Phase Plate*; vAPP) coronagraaf te combineren met een asymmetrische-pupil golffrontsensor. Er wordt ook een niet-lineair, op een model gebaseerd algoritme voor het meten van golffronten gepresenteerd. We bestuderen de nauwkeurigheid van de vAPP en het golffront-detectiealgoritme in geïdealiseerde simulaties. Vervolgens worden deze getest op het SCE_xAO instrument met de interne bron en gedurende waarnemingen. Voor de tests gedurende waarnemingen rapporteren we een verbetering van het ruwe contrast van een factor ~ 2 tussen 2 en 4 λ/D door het meten en controleren van de dertig laagste zernikecoëfficiënten.

Hoofdstuk 3 en 4: Ruimtelijke lineaire donkerveldcontrole met de vector-apodiserende faseplaat

Deze twee hoofdstukken presenteren de succesvolle implementatie van ruimtelijke lineaire donkerveldcontrole (*Linear Dark Field Control*; LD_{FC}) voor het SCE_xAO instrument. LD_{FC} veronderstelt een lineair verband tussen intensiteitsveranderingen in sommige delen van het heldere veld van de coronagrafische PSFs van de vAPP en golffront aberraties. We laten zien dat, om LD_{FC} succesvol te laten werken met de vAPP zonder defocus, een amplitude-asymmetrie moet worden geïntegreerd in het vAPP-ontwerp.

Hoofdstuk 3 beschrijft de implementatie van LD_{FC} bij SCE_xAO, inclusief een ruis analyse van de prestaties van LD_{FC} met de SCE_xAO vAPP. Verder worden de resultaten van de tests met de interne bron gepresenteerd die temporeel gecorreleerde, evoluerende fase-aberraties simuleren met de vervormbare spiegel. We vinden dat, wanneer LD_{FC} als een controlesysteem met terugkoppeling opereert, er een factor van ongeveer 3 aan verbetering is in het ruwe contrast in het donkere veld tijdens de volledige duur van de test.

Hoofdstuk 4 beschrijft de resultaten van de eerste succesvolle LD_{FC} test gedurende waarnemingen. Er worden twee soorten tests gepresenteerd: (1) correctie van kunstmatig geïntroduceerde aberraties, en (2) correctie van golffrontfouten die afkomstig zijn van de telescoop, het instrument en de atmosfeer. Bij het introduceren van aberraties met de vervormbare spiegel, vinden we dat LD_{FC} het ruwe contrast verbetert met een factor 3–7

over het donkere veld door de resterende golffrontfout te verkleinen van ~ 90 nm naar ~ 40 nm kwadraatgemiddeld. Voor het tweede type tests laten we zien dat de huidige implementatie van LDFC in staat is om evoluerende aberraties te onderdrukken met tijdschalen $< 0.1 - 0.4$ Hz, en wordt beperkt door de huidige Python-implementatie. We vinden dat het vermogen bij 10 mHz wordt verminderd met een factor ~ 20 , 7 en 4 voor de ruimtelijke frequenties van respectievelijk 2.5, 5.5 en $8.5 \lambda/D$.

Hoofdstuk 5: De polarisatie-gecodeerde zelf-coherente camera

Dit hoofdstuk presenteert de polarisatie-gecodeerde zelf-coherente camera (*polarization-encoded self-coherent camera*; PESCC), een geïntegreerde beeldvlak golffrontsensor en coronagraaf, die een nieuwe en krachtige variant van de zelf-coherente camera (*self-coherent camera*; SCC) is. De PESCC implementeert een Lyot-stop met een referentiegat die een polarisator bevat en een stroomafwaartse polariserende bundelsplitser. We laten zien dat de PESCC de vereisten voor de grootte van de optica, de bemonstering van het beeldvlak door de detector en de spectrale resolutie versoepelt in vergelijking tot de SCC. Verder vinden we door middel van numerieke simulaties dat de PESCC effectief toegang heeft tot ~ 16 keer meer fotonen, waardoor de gevoeligheid van de golffront meting met een factor ~ 4 wordt verbeterd. We laten ook zien dat, zonder aanvullende metingen, coherente differentiële afbeelden (*coherent differential imaging*; CDI) gebruikt kan worden als contrastversterkende nabewerkingstechniek voor elke waarneming. In geïdealiseerde simulaties die representatief zijn voor instrumenten van ruimtetelescopen met een lading twee vortex coronagraaf, laten we zien dat golffront meting en -controle, gecombineerd met CDI, een 1σ ruw contrast kan bereiken van $\sim 3 \cdot 10^{-11} - 8 \cdot 10^{-11}$ tussen 1 en $18 \lambda/D$.

Hoofdstuk 6: Het lage windeffect controleren met Fast and Furious beeldvlak golffront detectie

Dit hoofdstuk presenteert de inzet van het *Fast and Furious* (F&F) beeldvlak golffront-detectiealgoritme op het SCEXAO instrument om het lage-windsnelheidseffect (*low-wind effect*; LWE) te meten en corrigeren. F&F is een sequentieel fase-diversiteitsalgoritme en een softwarematige oplossing voor het detecteren van golffronten in het beeldvlak. Tests met de interne bron laten zien dat F&F een breed scala aan LWE-achtige aberraties kan corrigeren en de PSF terug kan brengen naar een hoge Strehl-ratio ($> 90\%$) en hoge symmetrie. Verder presenteren we resultaten genomen gedurende waarnemingen die aantonen dat F&F in staat is om de PSF-kwaliteit te verbeteren onder zeer uitdagende atmosferische omstandigheden. Gelijktijdige waarnemingen van de PSF in het zichtbare golflengte bereik ($\lambda = 750$ nm, $\Delta\lambda = 50$ nm) laten zien dat we afwijkingen aan het corrigeren waren die gemeenschappelijk waren voor de optische en NIR-paden binnen SCEXAO.

Hoofdstuk 7: Zeer nauwkeurige astrometrie en fotometrie van direct in beeld gebrachte exoplaneten met het vectorspikkelraster

Dit hoofdstuk presenteert de theorie en simulaties van het vectorspikkelraster (*vector speckle grid*; VSG). Het VSG is een nieuw optisch element om kunstmatige spikkels te genereren die dienen als fotometrische en astrometrische referenties bij het bestuderen van direct in beeld gebrachte exoplaneten. We laten zien, door tegengestelde amplitude-

of fasemodulatie op te leggen aan de tegenovergestelde polarisatietoestanden in het pupilvlak, dat kunstmatige spikkels worden gegenereerd die incoherent zijn met de onderliggende spikkel achtergrond. Dit verhoogt de astrometrische en fotometrische precisie aanzienlijk. In simulatie vinden we dat, voor opnamen met een korte belichtingstijd, het VSG een prestatieverbetering levert van respectievelijk een factor ~ 20 voor fotometrie en ~ 5 voor astrometrie vergeleken met scalaire varianten. Verder schetsen we hoe VSGs kunnen worden geïmplementeerd met behulp van vloeibaar-kristaltechnologie om de geometrische fase aan de circulaire polarisatietoestanden op te leggen. Het voordeel van de VSG ten opzichte van methodes die kunstmatige, incoherente spikkels generen met de vervormbare spiegel is dat de VSG een statische oplossing is die onafhankelijk is van de kalibratie en de beperkingen van de vervormbare spiegel en primaire golffrontsensor.

Toekomst

De huidige generatie HCI-instrumenten zal zich na hun upgradeprogramma's blijven richten op het detecteren en karakteriseren van jonge, gigantische gasplaneten. Een van de belangrijkste upgrades zijn beeldvlak golffrontsensoren om niet-gemeenschappelijk-pad aberraties aan te pakken. Verschillende beeldvlak golffrontsensoren zijn met succes tijdens waarnemingen getest. Ze zijn echter nog niet gebruikt tijdens wetenschappelijke waarnemingen, een enkele uitzondering daargelaten, waardoor het moeilijk is om de impact te beoordelen wat de impact van beeldvlak golffrontsensoren op het nabewerkte contrast op dit moment is. Daarom, om de impact van beeldvlak golffrontdetectie op de end-to-end-systeemprestatie (inclusief nabewerking) te beoordelen, zouden tests tijdens wetenschappelijke observaties de hoogste prioriteit van de nabije toekomst moeten zijn.

De huidige op de grond gebaseerde HCI-instrumenten zijn er tot nu toe nog niet in geslaagd de variabiliteit van exoplaneten te detecteren door spikkelruis. Het VSG-concept, gepresenteerd in Hoofdstuk 7, is een nieuw concept om de signaal-ruisverhouding van exoplaneet variabiliteitsmetingen met HCI-instrumenten drastisch te verhogen. Door het VSG-concept te combineren met het afwisselen van de positie van de kunstmatige spikkels, door het VSG optiek tussen metingen te draaien, is dit een veelbelovende oplossing om de vereiste fotometrisch golffrontsensorhe precisie te bereiken. Wanneer dit wordt geïmplementeerd bij HCI-instrumenten, zal het een opwindende nieuwe manier zijn om de variabiliteit van reeds direct in beeld gebrachte exoplaneten te bestuderen.

Het langetermijndoel van hoog-contrast afbeelden is de detectie en karakterisering van rotsachtige exoplaneten in de bewoonbare zone van nabije sterren, en het zoeken naar tekenen van leven. Een belangrijk onderdeel van deze toekomst zijn de volgende generatie van gigantische gesegmenteerde-spiegel telescopen (*Giant Segmented Mirror Telescopes*; GSMTs). Deze telescopen hebben primaire spiegels met een diameter tussen de 25 en 39 meter, wat resulteert in een enorme toename in lichtopbrengst en hoekresolutie in vergelijking met de huidige telescopen. Daarom wordt verwacht dat GSMTs de eerste spectra van rotsachtige bewoonbare exoplaneten rond M-type hoofdreekssterren zullen verwerven door middel van directe waarnemingen.

Vanwege de enorme ondersteuningsconstructies die nodig zijn om de secundaire spiegels van GSMTs te ondersteunen, die de grootte kunnen hebben van een huidige telescoop van 4-meter klasse, wordt verwacht dat het lage-windsnelheidseffect een dominante golffrontfout zal zijn. Bovendien hebben deze telescopen gesegmenteerde primaire spiegels die zorgvuldig moeten worden gefaseerd om hun ultieme prestatie te kunnen bereiken. Beeldvlak golffrontsensoren behoren ze tot de belangrijkste oplossingen voor deze problemen. Vooral voor het Fast & Furious beeldvlak golffront-detectiealgoritme (F&F; Hoofdstuk 6) is er een grote kans om de golffrontsensor oplossing te bieden. We hebben tijdens waarnemingen met de Subaru telescoop bewezen dat F&F in staat is om met de LWE om te beheersen en hebben de eerste succesvolle tests met de gesegmenteerde Keck-telescoop tijdens waarnemingen gedaan.

GSMT's zullen hoog-contrast afbeeldinstrumenten bevatten die naar verwachting rotsachtige exoplaneten in de bewoonbare zone van nabije sterren in beeld zullen brengen en karakteriseren. Om de extreme contrasten te bereiken bij kleine hoekafstanden die nodig zijn om een rotsachtige exoplaneet in beeld te brengen, is het van het groot belang dat het hele HCI-instrument als geheel wordt geoptimaliseerd, en niet per afzonderlijk subsysteem. Het werk dat in dit proefschrift wordt gepresenteerd, biedt dergelijke geïntegreerde oplossingen. Dit biedt een unieke kans om coronagrafie, beeldvlak golffront detectie en beheersing, coherente differentiële afbeelden en polarimetrie te combineren, die de directe waarneming en karakterisering van rotsachtige exoplaneten in de bewoonbare zone mogelijk zal maken.

