

Adaptive tunable kernel-nulling interferometry for the direct detection of extrasolar planets

Frantz Martinache, David Mary & Rodolphe Krawczyk

Octobre 2023 - Octobre 2026

Kernel-nulling interferometry

Le nulling est un mode d'utilisation haut-contraste de l'interférométrie optique, dont l'utilisation est envisagée pour la détection directe et la caractérisation spectrale de planètes extrasolaires. Le nulling est une alternative à l'approche coronagraphique généralement mise en oeuvre au foyer d'un télescope imageur, capable aujourd'hui de détecter des planètes massives à des séparations orbitales de plusieurs dizaines d'unités astronomiques. Lorsqu'il observe des systèmes planétaires proches, grâce à sa résolution angulaire supérieure, un interféromètre à longue base équipé d'un nuller puissant, permettra de cibler des planètes sur des orbites comparables à celles de la Terre.

Comme toutes les fonctions interférométriques, le nulling peut avantageusement être mis en oeuvre en utilisant des composants d'optique intégrée monomode. Cette technologie présente l'intérêt d'être déployable dans le contexte interférométrie longue base (ex : l'instrument GRAVITY) ainsi qu'au foyer d'un télescope, après éclatement de la pupille d'entrée. Dans ce dernier scénario, le nulling permet de faire des détections en dessous de la limite de diffraction.

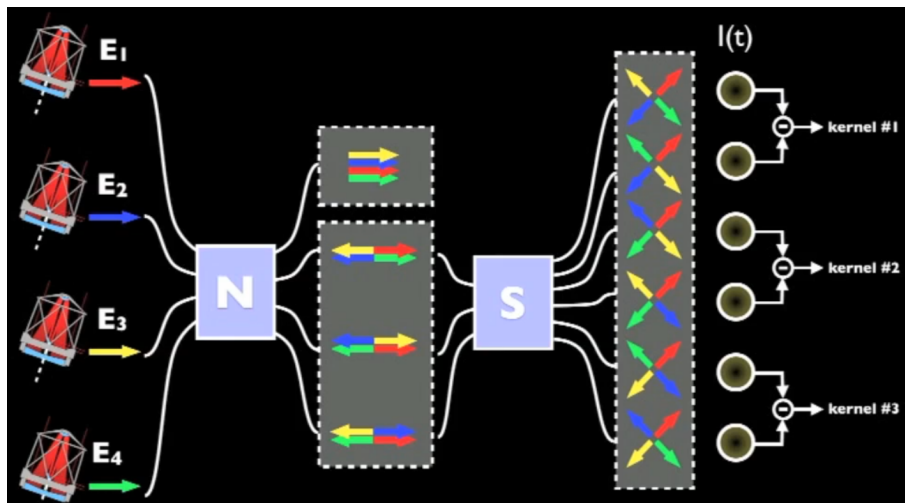


FIGURE 1 – Architecture d'un recombineur interférométrique kernel-nuller pour un réseau de quatre télescopes. L'étage de nulling N est suivi d'un étage de décodage S qui permet de distinguer les signaux astrophysiques des perturbations instrumentales.

Notre équipe a mis au point une architecture de nuller pour au moins 3 faisceaux appelée kernel-nuller (voir Fig. 1), qui contrairement au nulling "classique", est capable de distinguer les perturbations instrumentales des vrais signaux astrophysiques. Nous avons expérimentalement validé un tel kernel-nuller prototype pour 3 puis pour 4 faisceaux et confirmé ses propriétés avantageuses. Nous avons également pu confirmer que la plateforme photonique (SiN) que nous utilisons permet de contrôler activement le champ électrique à l'intérieur du composant, sans parties mobiles. Utilisant cette même plateforme, nous allons par conséquent fabriquer une version avancée, active, de kernel-nuller, qui sera accordable de façon à optimiser la performance (la réjection par le nuller), capable de s'adapter aux perturbations externes, et de sonder dans une bande spectrale plus large.

Le sujet de la thèse que nous proposons serait de prendre en charge la caractérisation en laboratoire de ce kernel-nuller et de développer les algorithmes de traitement spécifiques permettant son exploitation optimale.

Exploitation d'une innovation locale

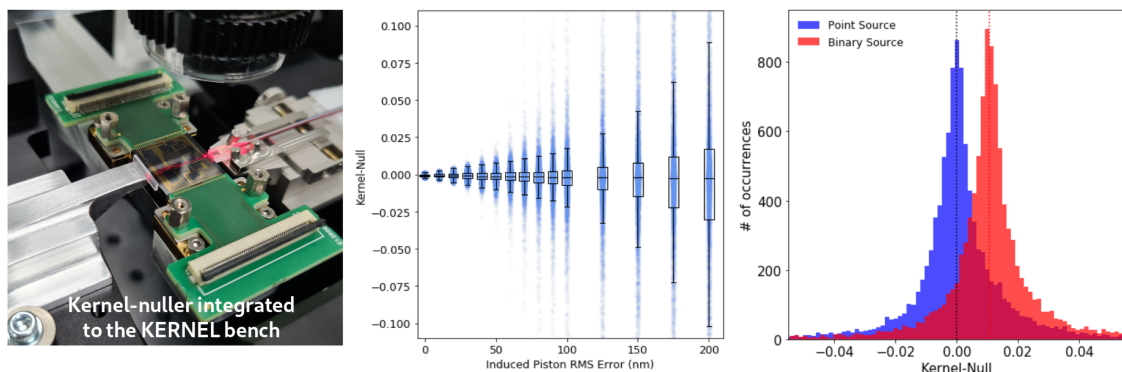


FIGURE 2 – Kernel-nuller fabriqué à partir d'un composant d'optique intégré (panneau de gauche), validé en laboratoire. La mesure de kernel-null, en présence de perturbation d'amplitude croissante (panneau central) reste à moyenne constante. Un signal astrophysique (panneau de droite) se distingue d'une perturbation instrumentale par un décalage global des mesures expérimentales, même en présence de turbulence : le kernel-null est une mesure auto-étalonnée.

La proposition combine deux innovations récemment mises en oeuvre sur un banc de caractérisation photonique du laboratoire Lagrange (voir Fig. 2), monté dans le cadre du projet ERC KERNEL :

1. Le kernel-nuller est une architecture répondant à une limite pratique de l'imagerie haut-contraste (nulling & coronagraphie), dont la performance est dominée par la qualité du contrôle de front d'onde amont. Le kernel-nuller produit des observables qui sont insensibles aux perturbations.
2. le contrôle de front d'onde implique d'habitude des éléments mobiles, comme des miroirs déformables ou des lignes à retard. L'optique intégrée permet de réaliser ces fonctions dans les composants sans parties mobiles, en utilisant un effet thermo-optique, compatible avec une fréquence de modulation de l'ordre du kHz.

Mettre ces deux idées en oeuvre va permettre de :

1. rendre le nuller accordable, pour optimiser la qualité de la réjection au point de fonctionnement.

2. rendre le nuller adaptatif, avec des actionneurs pour chaque faisceau entrant dans le composant, permettant de contrôler l'amplitude complexe du champ électrique.

La caractérisation d'un tel nuller accordable couvre beaucoup de degrés de liberté. Nous proposons de comparer la méthode de caractérisation utilisée jusqu'ici à une approche de type Machine-Learning pour gagner en vitesse et en efficacité. Dans la perspective d'une utilisation pour la détection de compagnons planétaires, une étude des limites de détection, exploitant une approche statistique dans laquelle on contrôle la probabilité de fausse alarme semble essentielle.

Perspectives scientifiques post-thèse

Le nulling interférométrique pour la détection de planètes extrasolaires revient en force sur le devant de la scène ! Pour les observations depuis le sol, un instrument nuller pour un interféromètre à quatre télescopes appelé NOTT, faisant partie de la suite instrumentale ASGARD (à laquelle l'OCA contribue), va en effet être installé dès 2025 au foyer du VLTI : le grand interféromètre de l'ESO (Observatoire Européen Austral). L'expertise acquise dans le cadre de cette thèse pourra être mise à profit dans les projets astrophysiques exploitant ce nouvel instrument.

A plus long terme, il est possible qu'un interféromètre annulant spatial finisse par voir le jour : c'est en effet l'objectif de l'initiative européenne LIFE, et cette ambition est intégrée à la feuille de route de l'ESA (l'Agence Spatiale Européenne), à l'horizon 2050.

Description des étapes anticipées du travail de la thèse

1. étude bibliographique et compréhension formelle du problème à traiter.
2. première exploration avec une simulation numérique existante du composant kernel-nuller. Simulation de défauts de fabrication et implémentation simulée des actionneurs internes au nuller pour accorder le composant.
3. formation aux techniques de travail avec un composant d'optique intégrée sur le banc "photonique KERNEL".
4. suivi de la fabrication+packaging et recette du composant actuel : caractérisation de la performance au point de fonctionnement pour la longueur d'onde centrale spécifiée. caractérisation de l'effet des actionneurs intégrée.
5. étude de l'évolution du point de fonctionnement en fonction de la longueur d'onde et démonstration de l'accordabilité du nuller.
6. mise en oeuvre de l'algorithme de détection en présence de turbulence résiduelle. Caractérisation de la performance dans différents régimes de résidus de contrôle de front d'onde et de fluctuations photométriques.
7. Utilisation en boucle fermée des actionneurs amont. Etude de l'impact sur les limites de détection.

Cadre de la thèse

La thèse se déroulera en co-encadrement entre l'Observatoire de la Côte d'Azur (direction de la thèse par F. Martinache, MCF HDR & D. Mary, PU) et l'entreprise Thales Alenia Space (co-direction par R. Krawczyk) : un cadre idéal pour acquérir la double culture académique & industrielle qui augmentera l'employabilité au sortir de la thèse !

Financement

Le design et la fabrication du composant intégré seront financés par le projet IO4OI (Integrated Optics for Optical Interferometry, porté par F. Martinache @ OCA), un sous-projet du PEPR Origins. Le projet IO4OI financera également la moitié de la thèse. L'autre moitié sera prise en charge par l'entreprise TAS-F, le sujet ayant été retenu par l'entreprise cette année. D'autres laboratoires partenaires (IPAG & LESIA) sont associés au projet IO4OI et pourront contribuer à l'enrichir. Les missions spatiales qui pourraient bénéficier d'un tel composant sont la mission d'interférométrie spatiale LIFE étudiée en Europe et les futures missions d'imagerie haut contraste côté US, utilisant maintenant l'acronyme générique HWO pour Habitable World Observer.

Références

Trois publications et une vidéo explicative sur youtube devraient vous en apprendre plus si vous êtes intéressés !

- [Publication: description du concept de kernel-nuller](#)
- [Publication: première validation en laboratoire d'un kernel-nuller 3T](#)
- [Publication: caractérisation spectrale préliminaire d'un kernel-nuller 4T](#)
- [Vidéo: le pourquoi et le comment du kernel-nuller](#)

Contactez : frantz.martinache@oca.eu pour plus d'information.