

# Tunable Kernel-Nulling for direct detection of exoplanets

## 1. Calibration and performance

V. Foriel<sup>1</sup>, F. Martinache<sup>1</sup>, D. Mary<sup>1</sup> and R. Laugier<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur Nice, CNRS, Laboratoire Lagrange, Nice, France

<sup>2</sup> KU Leuven university, Leuven, Belgium

Received —; accepted —

### ABSTRACT

*Context.* Lorem ipsum  
*Aims.* Lorem ipsum  
*Methods.* Lorem ipsum  
*Results.* Lorem ipsum  
*Conclusions.* Lorem ipsum

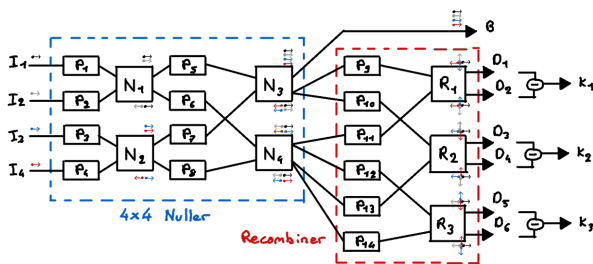
**Key words.** Lorem ipsum

## 1. Introduction

1. Nulling interferometry
2. Kernel nulling
3. Integrated optics & phase shifters

## 2. Materials and methods

1. VLT/ASGARD (/NOTT?)
2. Integrated optics & phase shifters
3. Studied architecture
4. Observation conditions (Vegga-like star, noise etc.)
5. Calibration methods (Fig 4 & 5)
  - Genetic Algorithm
  - Input obstruction
  - Machine Learning?



**Fig. 1.** Studied architecture

### 2.1. Algorithms

#### 2.1.1. Genetic

Le premier algorithme à avoir été mis au point repose sur le principe d'algorithme génétique déterministe. On définit une

métrique de performance  $M$ , qui va ici correspondre à la profondeur du kernel-null, puis on cherche à l'optimiser en faisant introduisant successivement une variation de phase  $\Delta\phi$  sur chacun des retardateurs  $P_i$ .

Le processus d'optimisation se fait en utilisant une source ponctuelle qui simule une étoile seule. Le but est alors d'annuler son signal. Toutefois, étant donné que les Kernels sont construit via la différence de deux sorties sombres, il est possible d'obtenir de très bon kernel-nulls sans pour autant avoir bien annulé la lumière de l'étoile. Pour palier à ce problème, on définit alors deux métriques, l'une mesurant la profondeur du kernel-null  $M_K$ , l'autre l'intensité obtenue sur la sortie brillante du coposant  $M_B$ . Ainsi, on a :

$$M_K = |D_1|^2 - |D_2|^2 + |D_3|^2 - |D_4|^2 + |D_5|^2 - |D_6|^2 \quad (1)$$

$$M_B = |B|^2 \quad (2)$$

Au regard de l'architecture de notre composant, on peut alors associer la métrique  $M_B$  à chacun des retardateurs qui influent sur la sortie brillante, soit  $P_{1 \rightarrow 5}$  ainsi que  $P_7$ . L'ensemble des autres retardateurs sont alors associé à la métrique  $M_K$ .

L'algorithme génétique se construit alors de la façon suivante :

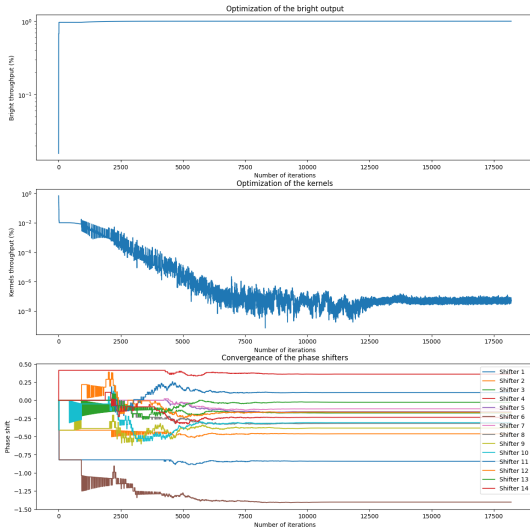
1. Initialisation : on initialise les phases de chacun des retardateurs à 0
2. Mutation : on introduit une variation de phase  $+\Delta\phi$  puis de  $-\Delta\phi$  successivement sur chaque retardateur  $P_i$  (toujours dans le même ordre).
3. Sélection : on conserve la configuration qui a le plus amélioré la métrique associé à ce retardateur.

Si  $i \in [1, 5] \cup 7$ , on conserve la variation qui a le plus augmenté la métrique  $M_B$  (redirection de l'ensemble du flux de l'étoile sur la sortie brillante)

Si  $i \in 6 \cup [8, 14]$ , on conserve la variation qui a le plus réduit la métrique  $M_K$  (symétrisation des sorties sombres pour creuser la profondeur des kernel-nulls)

4. Convergence : on répète les étapes 2 et 3 en réduisant à chaque fois la valeur de  $\Delta\phi$  d'un facteur  $\beta \in [0.5, 1[$ . Un facteur  $\beta$  proche de 1 permet une convergence lente mais plus précise, là où un facteur  $\beta = 0.5$  donnera la meilleur vitesse de convergence mais peut régulièrement manquer de précision.
5. Point d'arrêt : on s'arrête lorsque la variation de phase  $\Delta\phi$  introduite est inférieur à l'incertitude sur la phase injectée, qui doit être déterminé via une caractérisation préalable des retardateurs de phase.

Cet algorithme a pour avantages d'être très facile à adapter à d'autres architectures de Kernel-Nuller et ne fait intervenir aucune pièce mobile durant le processus de calibration ce qui permet une calibration automatisée et rapide. En revanche, il souffre d'une limitation liée au bruit de photon. En effet, les retards de phase à injecter sur les retardateurs des couches proches des sorties dépendent des retards de phase injectés sur les couches précédentes. Ainsi, la calibration des dernier retardateurs ne peut se faire finement qu'une fois les premiers retardateurs calibrés, ce qui a pour conséquence d'avoir très peu de flux sur les sorties sombres lors de la calibration et ainsi d'augmenter la sensibilité au bruit de photon. Numériquement, même en tenant compte du bruit de photon, il est toutefois possible d'atteindre des profondeurs de kernel-null de l'ordre de  $10^{-8}$ . [RAJOUTER LES RESULTATS EN LABO]. Un autre défaut de cet algorithme réside dans le fait que la convergence peut être sous-optimale. La fréquence de ce genre de cas décroît lorsque  $\beta$  est proche de 1, ce qui implique une convergence plus lente.



**Fig. 2.** Calibration using genetic algorithm [AJOUTER DESCRIPTION]

### 2.1.2. Input obstruction

Afin de palier aux limitations de l'algorithme génétique, une autre méthode de calibration a été mise en place. Cette méthode repose sur le principe d'obstruction des entrées du composant. On injecte toujours une source ponctuelle dans le composant mais l'on obstrue cette fois 2 de ses entrées. On s'intéresse alors à l'une de ses sorties dont la fonction de transfert se retrouve

grandement simplifiée, au point de n'avoir plus qu'un seul paramètre (retardateur de phase) influençant sur cette sortie.

L'algorithme se construit alors de la façon suivante :

1. On obstrue les entrées 3 et 4 puis on cherche à maximiser la sortie brillante. Etant donné qu'on est insensible à la phase globale, on peut utiliser la phase du champ électrique de la première entrée comme phase de référence. Ainsi, la sortie brillante peut être maximisée en jouant uniquement sur le retardateur  $P_2$ .
2. On obstrue les entrées 1 et 2 puis on cherche à maximiser la sortie brillante, cette fois ci en jouant sur le retardateur  $P_4$ . On utilise alors temporairement la phase du champ électrique de la troisième entrée comme phase de référence.
3. On obstrue les entrées 2 et 4 puis on cherche à nouveau à maximiser la sortie brillante. Cette fois, on joue sur le retardateur  $P_3$ , qui va correspondre à la différence de phase en sortie de la première couche de Nullers (Figure 1). On rajoute alors la phase introduite sur  $P_3$  à celle introduite sur  $P_4$  afin de changer la phase commune de  $I_3$  et  $I_4$ .
4. Toujours en obstruant  $I_2$  et  $I_4$ , on cherche à minimiser les sorties sombres 3 et 4 qui sont supposé avoir les entrées  $I_1$  et  $I_3$  en parfaite opposition de phase. Pour cela, on joue alors sur le retardateur  $P_8$ .
5. On obstrue  $I_3$  et  $I_4$  et on va chercher à minimiser le kernel 3. Etant donné que les retards injectés jusque là redirigent le flux vers la sortie brillante, on introduit une phase  $+\frac{\pi}{2}$  sur  $P_2$ , transformant ainsi la sortie brillante en sortie sombre et les sorties sombres associé au kernel 3 en sorties brillante. On joue alors sur le retardateur  $P_{10}$  afin de symétriser les sorties sombres (ce que l'on constate par l'annulation du kernel malgré la présence de flux).
6. De la même façon, on obstrue  $I_2$  et  $I_4$  et on cherche à minimiser le kernel 2 en introduisant une phase  $+\frac{\pi}{2}$  sur  $P_3$ . On joue alors cette fois-ci sur le retardateur  $P_{10}$ .
7. Enfin, on obstrue  $I_2$  et  $I_3$  et on cherche à minimiser le kernel 1 en introduisant une phase  $+\frac{\pi}{2}$  sur  $P_4$ . On joue alors sur le retardateur  $P_9$ .

Pour chaque étape, la bonne phase à injecter sur le retardateur considéré peut être obtenue soit de façon dichotomique, soit de façon formelle en effectuant une série de mesures. En effet, pour chaque étape, le problème se simplifie suffisamment pour être résolu analytiquement. Par exemple, pour la première étape, on cherche à maximiser la sortie brillante  $B$  qui s'écrit alors :

$$B = \left| \left( a_1 e^{i(\theta_1 + \sigma_1 + \phi_1)} + a_2 e^{i(\theta_2 + \sigma_2 + \phi_2)} \right) e^{i(\sigma_5 + \phi_5)} \right|^2 \quad (3)$$

Où  $a_n$  et  $\theta_i$  représentent respectivement l'amplitude et la phase des signaux d'entrée.  $\sigma_i$  correspond à la perturbation de phase (inconnue) associé au retardateur  $i$  et  $\phi_i$  est la phase que l'on inject volontairement via le retardateur pour tenter de compenser cette perturbation.

La calibration se faisant en laboratoire, on peut supposer une intensité totale fixée à 1 (unité arbitraire) et que chaque entrée reçoit le même flux soit  $a_1 = a_2 = 1/\sqrt{2}$ , et parfaitement cophasé, soit  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ . Etant donné que l'on a accès qu'à l'intensité du signal, nous sommes insensible à la phase globale, ce qui permet de simplifier l'équation précédente :

$$B = \frac{1}{2} \left| e^{i(\sigma_1 + \phi_1)} + e^{i(\sigma_2 + \phi_2)} \right|^2 \quad (4)$$

En maximisant  $B$ , on devrait alors trouver 1 ce qui implique que

$$\sigma_1 + \phi_1 = \sigma_2 + \phi_2 \quad (5)$$

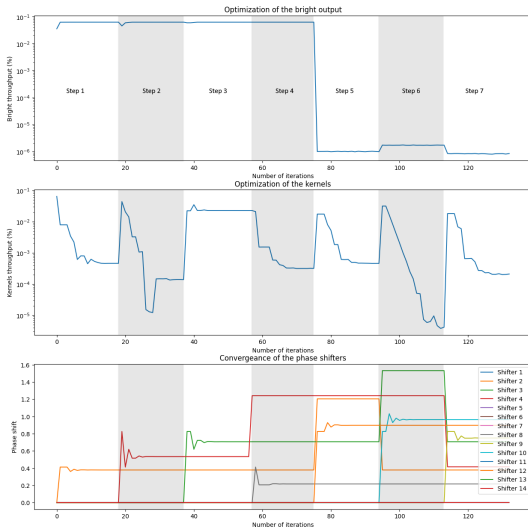
On peut utiliser  $\phi_1$  comme référence (phase globale) et ainsi le fixer à 0, ce qui donne alors

$$\phi_2 = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (6)$$

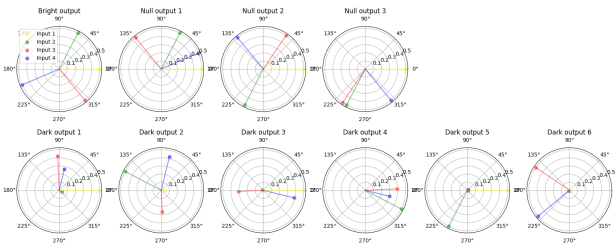
On peut effectuer différentes mesures de  $B$  à  $\phi_2$  fixé et en déduire  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  par résolution d'un système d'équation.

Cette seconde méthode de calibration a pour avantages de ne pas souffrir de la sensibilité au bruit de photon étant donné que l'on s'assure à chaque étape d'avoir du flux sur les sorties qui nous intéressent. En revanche, elle est adaptée à notre architecture et peut être complètement repensée pour être adaptée à une autre architecture de Kernel-Nuller. De plus, elle nécessite l'action de pièce mobile pour obstruer les entrées du composant, ce qui peut être un inconvénient pour une calibration automatisée.

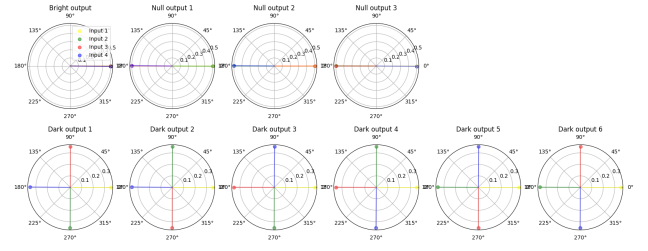
Grâce à cette méthode, on obtient numériquement une profondeur de nulle également de l'ordre de  $10^{-8}$ . Grâce à la simplification successive du problème, on se retrouve toutefois dans un cas où la convergence vers une solution optimale est assurée. [RAJOUTER LES RESULTATS EN LABO]



**Fig. 3.** Calibration using input obstruction [AJOUTER DESCRIPTION]



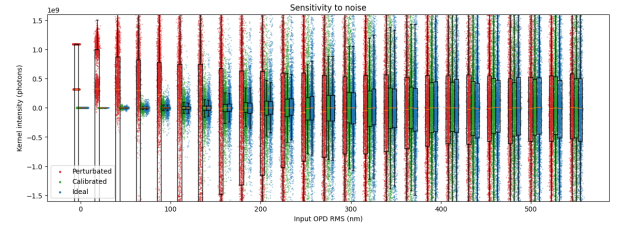
**Fig. 4.** Perturbed phases



**Fig. 5.** Calibrated phases

### 3. Results and limitations

1. Numerical results
  - Kernel-Null depth (Fig 2 & 3)
  - Kernel inversion and swapping
2. Laboratory results
3. Laboratory limitations (ex. crosstalk)



**Fig. 6.** Sensitivity to input noise

### 4. Conclusions and prospects

1. Conditions for noticing a performance gain
2. Need of a post calibration characterization process to identify the outputs
3. Deeper statistical analysis is required to truly characterize performance gain (the null depth is not the only relevant parameter)
4. Architecture limitations (ex. no amplitude modulation, no photometric outputs)

*Acknowledgements.* Lorem ipsum

### References

Lorem ipsum