Astronomy & Astrophysics manuscript no. aanda
October 10, 2024

Tunable Kernel-Nulling for direct detection of exoplanets

1. Calibration and performance

V. Foriel[1], F. Martinache[1], D. Mary[1] and R. Laugier[2]

[1] Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur Nice, CNRS, Laboratoire Lagrange, Nice, France
[2] 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. VLTI/ASGARD (/NOTT?)
2. Integrated optics & phase shifters
3. Studied architecture
4. Observation conditions (Vegga-like star, noise etc.)
5. Calibration methods (Fig 4 & 5)
   Genertic Algorithm
   Input obstruction
   Machine Leaning?

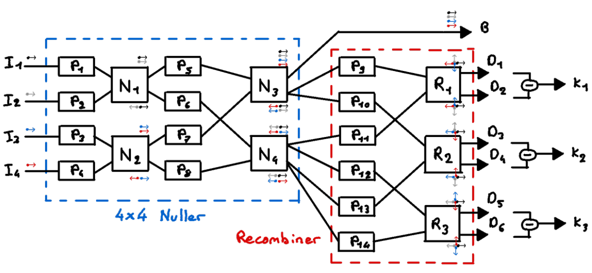

Fig. 1. Studied architecture

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 :

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

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

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 $P_{1\to5}$ 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 létoile 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 β proche de 1 permet une convergeance lente mais plus précise, là où un facteur $\beta = 0.5$ donnera la meilleur vitesse de convergeance 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.

Algorithm 1: Genetic algorithm

Inputs : ϵ, β

Output: $\boldsymbol{P}$

$\boldsymbol{P} \leftarrow \boldsymbol{0}$;

$\boldsymbol{\psi} \leftarrow \boldsymbol{1} \times \frac{1}{\sqrt{4}}$;

$\boldsymbol{PM_K} \leftarrow [1, 5] \cup [7]$; $\boldsymbol{PM_B} \leftarrow [6] \cup [8, 14]$;

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 lié 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 finament qu'une foit 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 profondeur 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 convergeance peut être sous-optimale. La fréquence de ce genre de cas décroit lorsque β est proche de 1, ce qui implique une convergeance plus lente.

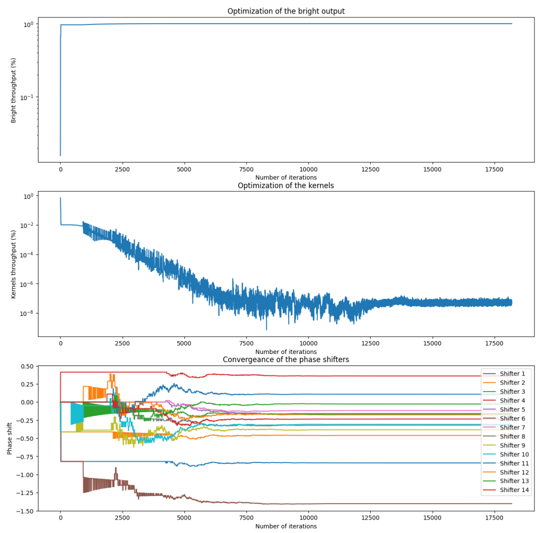

Fig. 2. Calibration using genetic algorithm [AJOUTER DESCRIPTION]

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 fontion de transfert se retrouve grandement simplifiée, au point de n'avoir plus qu'un seul paramètre (retardateur de phase) influencant sur cette sortie.

L'algorithme se construit alors de la façon suivante :

1. On obstrue les entrées 3 et 4 puis on chercher à maximiser la sortie brillante. Etant donné qu'on est insensible à la phase globale, on peut utiliser la phase du champ élctrique 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 élctrique 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 comune 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 $P_1 0$ 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 $P_1 0$.
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 suffisament 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 θ_i représentent respectivement l'amplitude et la phase des signaux d'entrée. σ_i correspond à la perturbation de phase (inconnue) associé au retardateur i et ϕ_i est la phase que l'on inject volontairement via le retardateur pour tenter de compenser cette perturbation.

La calibration se faisant en laboatoire, on peut supposer une intensité totale fixée à 1 (unité arbitraire) et que chaque entrée reçoi 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'a l'intensité du signal, nous sommes insensible à la phase globale, ce qui permet de simplifier l'équation précédente :

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

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

$$\sigma_1 + \phi_1 = \sigma_2 + \phi_2 \tag{5}$$

On peut utiliser ϕ_1 comme référence (phase globale) et ainsi le fixer à 0, ce qui donne alors

$$\phi_2 = \sigma_1 - \sigma_2 \tag{6}$$

On peut effectuer différentes mesures de B à ϕ_2 fixé et en déduire σ_1 et σ_2 par résolution d'un système déquation.

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 adapté à notre architecture et peut doit 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 convergeance vers une solution optimale est assurée. [RAJOUTER LES RESULTATS EN LABO]

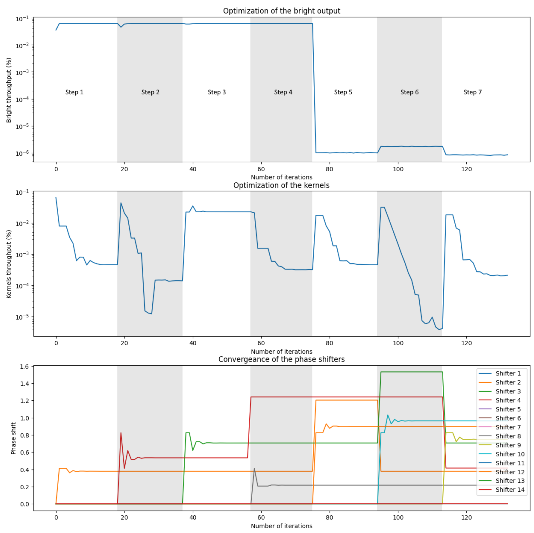

Fig. 3. Calibration using input obstruction [AJOUTER DESCRIPTION]

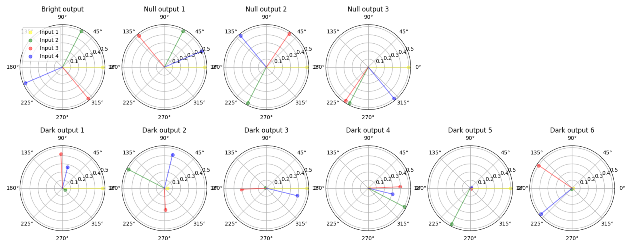

Fig. 4. Perturbed phases

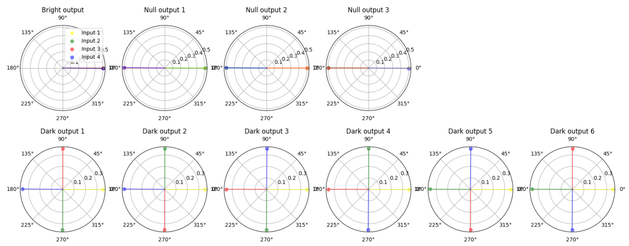

Fig. 5. Calibrated phases

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)

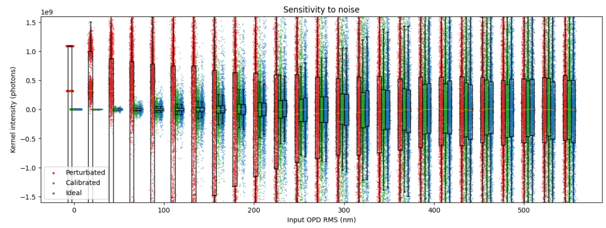

Fig. 6. Sensitivity to input noise

4. Conclusions and prospects

1. Conditions for noticing a performance gain
2. Need of a post calibration caracterization process to identify the outputs
3. Deeper statistical analysis is required to truely caracterize 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