Algorithme Multi-canaux pour la détection d'exoplanètes en imagerie différentielle angulaire

L. M. Mugnier[1], J.-F. Sauvage[1], A. Woelffle[1], T. Fusco[1] and G. Rousset[2,1]
1: ONERA/DOTA, BP 72, 92322 Châtillon cedex, France.
2: Observatoire de Paris / LESIA, 5, place Jules Janssen 92195 Meudon Cedex.
Les auteurs sont membres du Groupement d'Intérêt Scientifique PHASE.
Tel: +33-1 46 73 47 47. Fax: +33-1 46 73 41 71. E-mail: lastname@onera.fr

Résumé

Nous proposons une méthode novatrice pour la détection efficace d'exoplanètes depuis le sol. Cette méthode utilise l'imagerie différentielle angulaire, et conserve l'information temporelle de la trajectoire du compagnon en effectuant une corrélation multi-canaux. Cette méthode est ensuite validée par simulations.

1 Introduction

La détection directe d'exoplanètes et leur caractérisation spectrale est l'une des problématiques majeures aujourd'hui en astronomie, et représente un défi technologique important. SPHERE [1](pour Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch) et GPI (pour Gemini Planet Imager) sont deux projets instrumentaux développés pour répondre à cette problématique. Le principal écueil consiste à distinguer le flux de deux objets de flux très différents comme une étoile et une planète (appelée « compagnon »). Pour résoudre ce problème, ces instruments utilisent conjointement une Optique Adaptative extrême, un coronographe et un imageur différentiel, dans le but d'atténuer la lumière émise par l'étoile dans la région d'intérêt où le compagnon est recherché. La technique de l'imagerie différentielle consiste à réaliser la différence de deux images obtenues simultanément dans deux bandes spectrales ou à différentes polarisations, et tirer parti des signatures spectrales ou en polarisation de l'étoile et du compagnon. Les aberrations optiques différentielles sont le facteur limitant de cette technique. En effet l'acquisition simultanée nécessite différents trajets optiques qui ont leur propres aberrations statiques et celles-ci limitent l'efficacité de la soustraction de l'étoile. Il existe cependant un degré de liberté supplémentaire pour les instruments qui, comme SPHERE, utilisent une pupille stabilisée : la rotation de champ. En effet la stabilisation de la pupille assure que l'image de l'étoile reste identique pendant la durée d'observation (à condition que les aberrations soient bien statiques et que la force de la turbulence ne varie pas), alors que le champ de vue - et donc le compagnon - tourne à mesure que le temps passe. Cette utilisation du déplacement du compagnon (ou « Imagerie différentielle angulaire » (IDA)) a été récemment proposée par Marois *et al.* [2]. Dans cet article, nous proposons une amélioration de cette méthode en utilisant l'information temporelle, ce qui s'avère plus efficace pour filtrer le bruit que l'implémentation originale de cette idée.

2 Description de l'algorithme

Supposons que nous disposons d'une série de N images « élémentaires ». Ces images sont supposées de durée suffisamment longues vis-à-vis de la turbulence, mais suffisamment courtes pour considérer que l'image d'un compagnon dans la région d'intérêt n'a pas bougé de plus d'une fraction de LMH (Largeur à Mi-Hauteur, correspondant à un angle λ/D) entre deux images successives. Supposons également que le temps écoulé entre la première et la dernière image est suffisamment long pour avoir un déplacement de l'ordre de plusieurs LMH entre ces images pour n'importe quel compagnon dans la région d'intérêt (et ce également à proximité de l'étoile). Dans l'approche proposée par Marois [2], une estimée de l'image de l'étoile est calculée par filtrage médian de toutes les images[1]. Cette estimée de l'image est ensuite soustraite à chaque image élémentaire, afin de supprimer dans chaque image la composante de l'étoile. Chaque image est ensuite tournée et coadditionnée. Le filtrage médian est connu pour sa robustesse, c'est à dire sa capacité à rejeter les points aberrants. Dans cette approche, les points aberrants sont de fortes valeurs d'intensité causées par la présence d'un compagnon. Cette robustesse a un prix : un filtre médian est moins efficace qu'un filtre moyenneur pour filtrer le bruit. Pour cette raison, nous suggérons une méthode qui supprime l'image de l'étoile plutôt que de l'estimer. De plus, additionner toutes les images après les avoir tournées compense la rotation du compagnon, mais la somme des images ne contient plus l'information temporelle de la trajectoire du compagnon potentiel. Dans la méthode que nous proposons, nous combinons les images deux à deux de façon à supprimer l'image de l'étoile mais nous traitons conjointement une série de différence d'images de façon à conserver l'information temporelle.

Nous recherchons le compagnon dans une couronne d'épaisseur δr située à une distance r de l'étoile. La distance r doit varier pour couvrir toute la région d'intérêt. Pour simplifier les explications, la couronne est prise égale à toute la région d'intérêt par la suite. Les N images élémentaires sont moyennées en $N' \leq N$ images (appelées images « individuelle » dans la suite) et notées $i_1, i_2, \ldots, i_{N'}$, chaque image individuelle correspondant à une rotation d'au plus une LMH. Bien sûr, N' est plus élevé si la couronne considérée est loin de l'étoile, et est moins élevé à proximité de l'étoile.

[1]Pour la clarté de cet exposé, nous considérons ici que les speckles quasi-statiques sont parfaitement statiques pendant la durée d'acquisition des N images élémentaires, de façon à ne pas avoir à prendre en compte de filtrage médian local.

Nous construisons ensuite une série de différences d'images $i_n^d = i_n - i_{n-p}$, où p est un entier fixé. p doit être choisi tel que la séparation angulaire entre les images n et $n-p$ assure que chaque différence $i_n - i_{n-p}$ soit entièrement constructive, dans le sens où aucun photon du compagnon n'est perdu dans la différence. Pour raison de simplicité, nous prenons $p = 1$ dans les simulations présentées ici, bien que cette valeur ne soit pas optimale *a priori*.

Le signal de l'étoile est supprimé dans chaque différence d'image. Si un compagnon est présent, chaque différence d'image comporte également la signature de sa présence, sous la forme de deux taches d'Airy à des positions relatives connues. Notre méthode consiste à détecter la présence du compagnon par un traitement conjoint de toutes les différences d'images successives dans la couronne considérée. Il existe différentes façons de réaliser ce traitement conjoint. Une façon relativement consiste à (a) ré-échantillonner les différences d'image $i_n^d(x, y)$ sur une grille polaire de façon à obtenir des images « déroulées » $i_n^d(\rho, \theta)$ dans lesquelles la trajectoire du compagnon est linéaire, et (b) de réaliser un filtrage adapté multi-canaux sur ces images déroulées. Ce filtre adapté multi-canaux dérive de la théorie de la détection et est l'estimateur de Maximum de Vraisemblance pour la position du compagnon dans le cas d'un bruit blanc gaussien et stationnaire (voir par exemple [3]).

3 Validation par simulations

Nous avons développé un code de simulation réaliste qui prend en compte de nombreux paramètres optiques et astronomiques. En particulier, les simulations prennent en compte un télescope de huit mètres installé à la latitude de Paranal (site du Very Large Telescope européen), le système d'optique adaptative extrême de SPHERE (41x41 actionneurs, 40x40 sous-pupilles), un front d'onde résiduel statique de 100 nm simulé sur 1500 polynômes de Zernike (spectre de puissance en f^{-2}). Les images sont bruitées (photon et détecteur, écart-type de 25e-/trame pour le bruit de lecture). L'étoile de magnitude 10 est observée de -2h à +2h. Le contraste (rapport entre le flux total de l'étoile et le flux total du compagnon) est pris égal à 3.10^5 pour tous les compagnons. 4 compagnons sont situés à l'intérieur de la région d'intérêt.

L'étendue angulaire de la région d'intérêt dépend des performances du système d'OA, et plus précisément de la densité d'actionneurs. Pour le système d'OA considéré dans les simulations, cette région s'étend de $4\lambda/D$ (IWA, pour Inner Working Angle) à $20\lambda/D$ (OWA, pour Outer Working Angle). Les simulations ne prennent pas en compte de coronographe, mais la méthode développée ici peut facilement être étendue à l'imagerie coronographique, en particulier à l'instrument IRDIS (pour Infra-Red Dual-beam Imaging and Spectroscopy) de SPHERE.

La durée totale d'observation (4 heures) est divisée en 8 images individuelles de 28 minutes chacune, assurant ainsi que le déplacement d'un éventuel compagnon au IWA est de l'ordre d'une LMH entre deux images individuelles. Chaque image individuelle est composée d'une accumulation de 10 images élémentaires de 17 secondes chacune. Le champ de vue est supposé fixe pendant une image élémentaire, mais varie d'une image à l'autre. Ainsi, l'image d'un compagnon au OWA s'étale sur plusieurs pixels comme illustré sur la Figure 1. La Figure 3 [haut] montre la somme des images déroulées. La variable radiale ρ s'étend du IWA (en bas de la figure) au OWA (en haut de la figure). La variable angulaire θ a été ré-échantillonnée sur une grille régulière. Les trajectoires des compagnons sont linéaires et parallèles.

Le code de simulation est également utilisé pour produire le filtre adapté multi-canaux. Ce filtre est constitué de l'image d'une différence i_n^d simulée dans la région d'intérêt. Ce filtre est ensuite utilisé pour calculer le produit de corrélation multi-canaux comme illustré Figure 3. Le produit de corrélation total est la somme des N' produits de corrélation individuels et est montré Figure 3 [bas gauche]. Il montre clairement la présence des quatre compagnons. La Figure 3 [bas droite], présentant la carte de corrélation seuillée à 3σ du bruit montre que ces compagnons sont détectés sans ambiguité. Quantitativement, le rapport signal à bruit (RSB) de cette détection (rapport de la hauteur du pic de corrélation à l'écart-type du bruit mesuré) est de 20 pour le compagnon proche de l'étoile et de 5 pour celui situé au bord extérieur du halo. Soit un RSB au moins deux fois plus élevé que celui donné par notre implantation de la méthode de Marois.

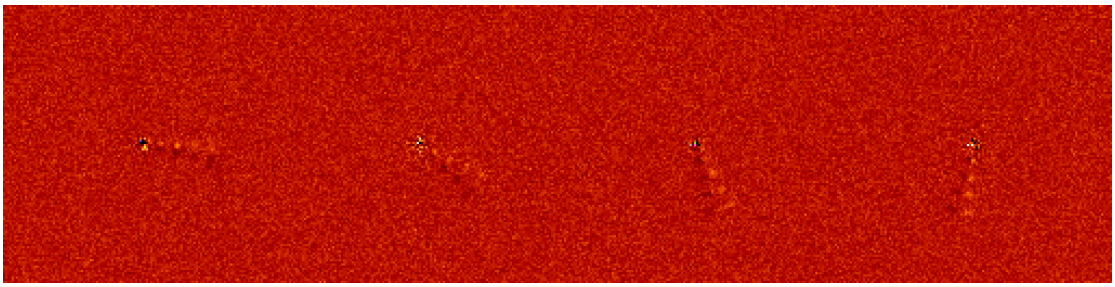

FIG. 1 – Quatre différences consécutives d'images individuelles, contenant chacune 4 compagnons. Échelle linéaire.

4 Conclusion

Nous avons proposé une méthode nouvelle, fondée sur la théorie de la détection, pour la détection efficace de planètes utilisant l'imagerie différentielle angulaire, et l'avons validée par simulation. En l'état actuel de nos travaux, il semble que notre méthode est, comme attendu, plus efficace vis-à-vis de la suppression du bruit que la méthode de référence [2]. Des études supplémentaires sont cependant nécessaires pour tester cette méthode sous différentes conditions.

Références

[1] K. Dohlen, J.-L. Beuzit, M. Feldt, D. Mouillet, P. Puget, J. Antichi, A. Baruffolo, P. Baudoz, A. Berton, A. Boccaletti, M. Carbillet, J. Charton, R. Claudi, M. Downing, C. Fabron, P. Feautrier, E. Fedrigo, T. Fusco, J.-L. Gach, R. Gratton, N. Hubin, M. Kasper, M. Langlois, A. Longmore, C. Moutou, C. Petit, J. Pragt, P. Rabou, G. Rousset, M. Saisse, H.-M. Schmid, E. Stadler, D. Stamm, M. Turatto, R. Waters, and F. Wildi. SPHERE : A planet finder instrument for the VLT. In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy. Edited by McLean, Ian S. ; Iye, Masanori. Proceedings of the SPIE, Volume 6269, pp. 62690Q (2006).*, July 2006.

[2] C. Marois, D. Lafrenière, R. Doyon, B. Macintosh, and D. Nadeau. Angular Differential Imaging : A Powerful High-Contrast Imaging Technique. *Astrophys. J.*, 641 :556–564, April 2006.

[3] M. Guillaume, Ph. Réfrégier, J. Campos, and V. Lashinr. Detection theory approach to multichannel pattern location. *Opt. Lett.*, 22(24) :1887–1889, December 1997.

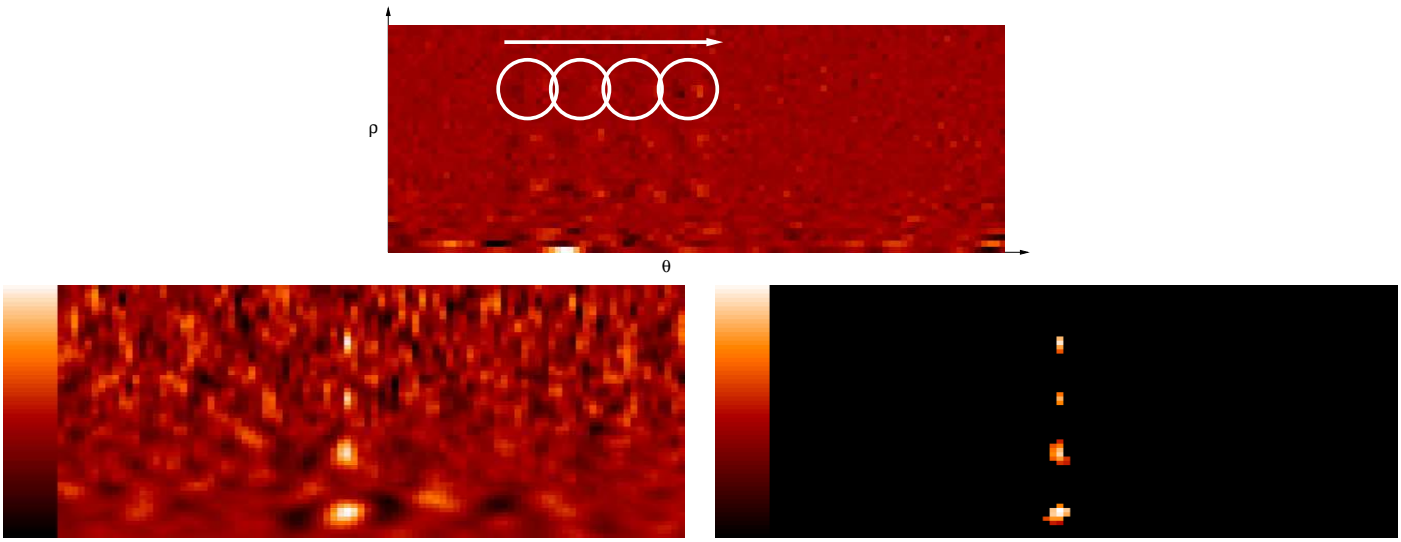

FIG. 2 – [haut] Somme des images déroulées $i_n^d(\rho, \theta)$ sur une grille polaire. Les trajectoires des compagnons sont linéaires, et difficilement visibles. Les cercles blancs montrent 4 alternances positives-négatives $i_{1\ldots4}^d$ du compagnon proche de l'OWA. [bas gauche] Somme des produits de corrélation multi-canaux. La présence des compagnons de contraste 3.10^5 est clairement visible. [bas droite] Carte de détection à 3σ.

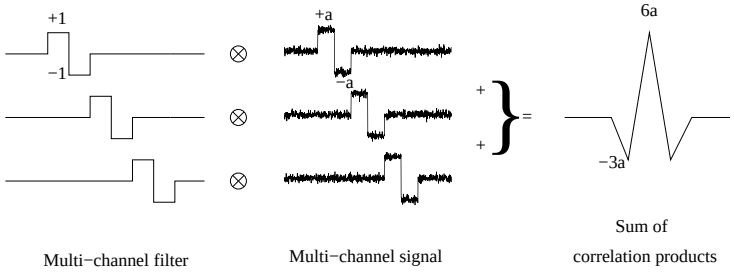

FIG. 3 – Principe du filtrage adapté multi-canaux. Toutes les contributions des produits de corrélation individuels sont sommées en phase.