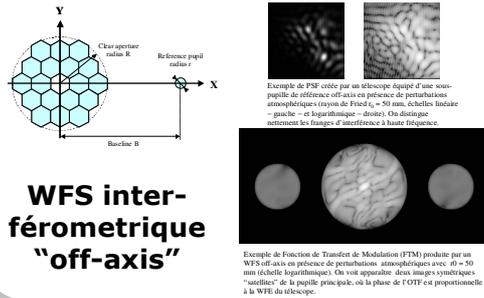


Un senseur de surface d'onde en plan image et à décalage de phase

F. Hénault

Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble, Université Joseph Fourier, CNRS, B.P. 53, 38041 Grenoble – France

"Analysis of stellar interferometers as wavefront sensors," Appl. Opt. **44**, 4733-4744 (2005)



WFS interférométrique "off-axis"

"Conceptual design of a phase shifting telescope-interferometer," Optics Communications **261**, 34-42 (2006)

WFS à décalage de phase

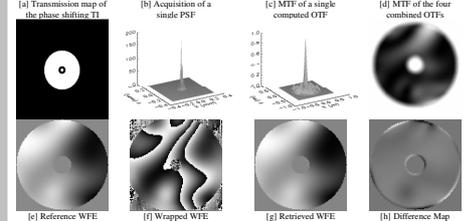
Introduction de 4 décalages de phase dans la pupille de référence:

$$\phi = 0, \pi/2, \pi \text{ et } -\pi/2$$

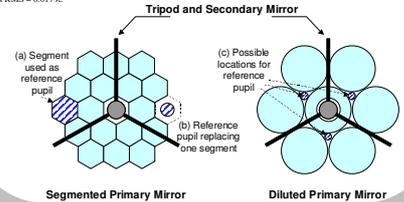
$$A(\vec{P}) = B_R(\vec{P}) \exp[ik\Delta(\vec{P})] + B_r(\vec{P}) \exp[i\phi]$$

$$OTF_p(\vec{P}) = OTF_R(\vec{P}) + C \times OTF_r(\vec{P}) + C \times B_R(-\vec{P}) \exp[-ik\Delta(-\vec{P}) + i\phi] + C \times B_R(\vec{P}) \exp[ik\Delta(\vec{P}) - i\phi]$$

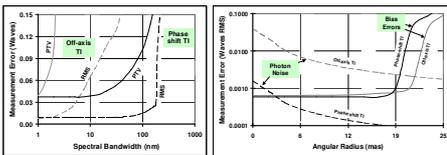
$$B_R(\vec{P}) \exp[ik\Delta(\vec{P})] = [OTF_r(\vec{P}) + i \times OTF_{\pi/2}(\vec{P}) - OTF_{-\pi/2}(\vec{P}) - i \times OTF_{\pi}(\vec{P})] / 4C$$



Cas du WFS à décalage de phase en présence de perturbations atmosphériques ($r_0 = 50$ mm). (a) Carte de transmission du télescope avec sous-pupille de référence centrale. (b) Acquisition d'une PSF individuelle. (c) MTF associée à cette PSF. (d) MTF synthétique obtenue après combinaison linéaire des 4 PSF mesurées. (e) WFE originale. PTV = 3.395 Å et RMS = 0.943 Å. (f) WFE mesurée avant déphasage. (g) WFE mesurée après déphasage. PTV = 3.281 Å et RMS = 0.937 Å. (h) Différence entre les WFE originale et mesurée. PTV = 0.251 Å et RMS = 0.017 Å.



"Signal-to-noise ratio of phase sensing telescope interferometers," J. Opt. Soc. Am. A **25**, 631-642 (2008)

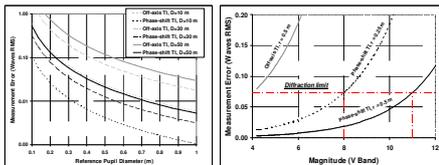


A gauche, la précision de mesure en fonction du diamètre de la pupille de référence $d = 2r$, pour différents diamètres de télescope $D = 2R$ (traits noirs: WFS à décalage de phase; traits gris: WFS interférométrique off-axis; traits continus: valeur PTV; traits pointillés: valeur RMS). A droite, précision de mesure en fonction du rayon angulaire de l'étoile guide (traits continus: erreur RMS; traits pointillés: contribution du bruit de photons). On suppose une longueur d'onde centrale $\lambda = 0.5$ µm et un temps d'intégration $t = 10$ msec. Les courbes montrent un clair avantage du WFS à décalage de phase sur le WFS interférométrique off-axis.

Performance limitées par le bruit de photons du capteur CCD

$$|\delta\Delta(\vec{P})| \leq S_R / (k \times \text{SNR} \times S_s)$$

Relation théorique



A gauche, la précision de mesure en fonction du diamètre de la pupille de référence $d = 2r$, pour différents diamètres de télescope $D = 2R$ (traits noirs: WFS à décalage de phase; traits gris: WFS interférométrique off-axis; traits continus: valeur PTV; traits pointillés: valeur RMS). A droite, précision de mesure en fonction de la magnitude l'étoile guide pour $D = 30$ m (traits: $r = 0.25$ m; traits continus: $r = 0.5$ m). On suppose une longueur d'onde centrale $\lambda = 0.5$ µm et un temps d'intégration $t = 10$ msec. Ici encore l'avantage du WFS à décalage de phase est évident.

Criteria	OFF-AXIS TI	PHASE-SHIFTING TI
Allowed spectral bandwidth	< 0.4 %	Between 20 and 30 %
Limiting star magnitude for $D = 30$ m	4	11
Minimal number of pixels	1024 x 1024	256 x 256
Hardware complexity and costs	High, requires manufacturing of dedicated auxiliary telescope and associated delay line	Moderate, can be implemented with small and simple optical components located at the telescope focal plane

Trade-off WFS off-axis/à décalage de phase

Principe de la méthode

- Ajouter un signal de référence dans la pupille:

$$A(\vec{P}) = B_R(\vec{P}) \exp[ik\Delta(\vec{P})] + B_r(\vec{P} - \vec{P}_0) \quad k = 2\pi/\lambda$$

- Mesurer une ou plusieurs PSF

- Calculer les OTFs par TF inverse

- Combiner les OTFs linéairement

- Utiliser une "approximation Delta" pour retrouver les phases dans la pupille

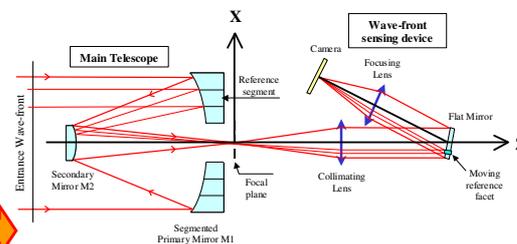
$$OTF_r(\vec{P} - \vec{P}_0) \times B_{R,r}(\vec{P}) = C \times B_R(\vec{P}) \exp[ik\Delta(\vec{P})] * B_r(\vec{P}) / S_r$$

$$B_R(\vec{P}) \exp[ik\Delta(\vec{P})] = OTF_r(\vec{P} - \vec{P}_0) \times B_r(\vec{P}) / C$$

où $C = S_r/S_R$ facteur de contraste
 S_R aire pupille télescope
 S_r aire pupille de référence

→ Mesure directe de la WFE (avec ambiguïté de 2π)

Schéma optique



Conclusion

- Le WFS à décalage de phase est beaucoup plus efficace que le WFS off-axis:

$$(\Delta\lambda/\lambda \approx 20\%, \text{ Magnitude limite} = 11 \text{ en régime d'optique adaptative})$$

- L'ambiguïté de 2π peut être levée en combinant trois canaux spectraux différents

(F. Hénault, Pure and Applied Optics 2009)

- Suites possibles:

- Déconvolution pour éliminer

"l'approximation Delta"

- Implémentation sur un banc de test

francois.henault@obs.ujf-grenoble.fr