

FICHE DE MODULE

TITRE du MODULE : HAUTE RESOLUTION ANGULAIRE : OPTIQUE ADAPTATIVE, TURBULENCE ATMOSPHERIQUE, INTERFEROMETRIE ET TRAITEMENT DE DONNEES

Coordinateur: Jean TABOURY

Enseignants : Gérard ROUSSET (Obs. de Paris), Marc SÉCHAUD
Jean-Marc CONAN et Laurent MUGNIER (ONERA)

Objectifs : Introduction à la physique de la turbulence atmosphérique, à l'optique adaptative, à l'interférométrie optique multi-télescope et aux problèmes de traitement de données associés.

Le cours comprend deux parties :

- 1) Turbulence atmosphérique, optique adaptative et interférométrie optique multi-télescope (Gérard ROUSSET et Marc SÉCHAUD, 18h).
- 2) Problèmes inverses en imagerie à travers la turbulence (Laurent MUGNIER et Jean-Marc CONAN, 12h).

Résumé :

1) Présentation des effets de la turbulence atmosphérique sur la propagation et l'imagerie optique, des problématiques de la formation d'images en longue pose et courte pose, de la technique de correction par optique adaptative, dont les principes de l'analyse de front d'onde et de sa reconstruction. Présentation de la technique d'interférométrie optique multi-télescope pour accéder à la très haute résolution angulaire dans l'esprit de l'interféromètre stellaire de Michelson.

2) Présentation des problèmes de traitement de données (dits « problèmes inverses ») associés aux techniques d'imagerie à haute résolution angulaire et de méthodes pour les traiter :

Le traitement des données est aujourd'hui un maillon essentiel de la chaîne d'acquisition et de traitement des systèmes d'observation à haute résolution actuels et futurs pour obtenir l'information recherchée sur l'objet observé. Lorsque ces données sont des images, leur restauration numérique permet d'améliorer, parfois de manière spectaculaire, leur exploitation. Lorsque les données ne sont pas des images, comme en interférométrie optique, elles sont tout simplement inexploitable sans un traitement approprié.

Applications : reconstruction de fronts d'onde turbulents, restauration d'images corrigées par optique adaptative, reconstruction d'images en interférométrie. Illustration sur des images récemment enregistrées sur des grands télescopes (VLT, Keck, CFHT, etc).

Objectif du cours :

1) L'objectif du cours est d'abord de décrire physiquement l'origine de la turbulence atmosphérique et les perturbations apportées à la propagation et à l'imagerie optique. Il est aussi de fournir l'expression des paramètres caractéristiques et leurs ordres de grandeur. Il est enfin de présenter le principe et les composants des techniques permettant de corriger ces perturbations, en particulier l'optique adaptative pour l'astronomie, et leurs perspectives d'évolution.

La résolution des instruments observant depuis le sol est en effet souvent limitée par l'effet de la turbulence atmosphérique. Cet effet résulte des inhomogénéités aléatoires de température de l'atmosphère. Il induit des fluctuations de phase et d'amplitude sur la propagation d'une onde optique. Il se manifeste par un élargissement, instantané ou moyen, d'une image ou d'un faisceau.

L'optique adaptative permet de corriger en temps réel ces dégradations, par réflexion du faisceau optique sur un miroir déformable. Le système comprend également un calculateur capable de déduire instantanément les commandes à appliquer au miroir à partir des mesures faites par un analyseur de front d'onde. Plusieurs principes d'analyseur de front d'onde sont utilisables ayant des propriétés parfois similaires parfois spécifiques. Les mesures fournies sont les dérivées du front d'onde, il faut donc le reconstruire. Différents types d'approches sont possibles, celles utilisant les polynômes de Zernike permet une interprétation des propriétés de la turbulence en terme d'aberrations classiques.

Des techniques connexes de l'optique adaptative sont aussi utilisées pour accéder à la correction des aberrations lentement évolutives qui peuvent apparaître dans un instrument optique de grand diamètre.

FICHE DE MODULE

Des solutions pour surmonter certaines limitations actuelles des performances sont en cours de développement : optique adaptative à grand champ, à haute dynamique...

Enfin l'interférométrie multi-télescope permet d'accéder à la très haute résolution angulaire. Cette technique permet de dépasser la limite de résolution des télescopes actuels les plus grands, elle est utilisée au VLT par exemple pour coupler plusieurs 8m. Au delà de la mesure de la cohérence spatiale, si l'on dispose de suffisamment de télescopes (minimum 3) on peut même synthétiser une image de l'objet.

Des systèmes opérationnels s'appliquent depuis deux décennies au domaine de l'astronomie. Ils sont envisagés aujourd'hui pour répondre à d'autres problématiques : imagerie de la rétine, télécommunications laser,

2) Le cours propose ensuite une introduction aux problèmes inverses. Il aidera l'étudiant à se retrouver dans les multiples approches présentes dans la littérature: on verra les liens entre Wiener, Maximum a posteriori [MAP], maximum de vraisemblance [MV], moindres carrés, filtrage inverse, etc...

Le cours est constitué de 4 séances de 3 heures. La première séance traite des notions théoriques nécessaires en les illustrant à travers quelques exercices. Les trois séances suivantes donnent des exemples d'applications. Chaque cours est alors associé à une mise en pratique sous IDL.

Plan du cours :

Première partie :

Effets de la turbulence atmosphérique sur la propagation optique

Introduction

Phénoménologie de la turbulence atmosphérique

Description statistique, spectre de Kolmogorov

Diamètre de Fried

Domaine isoplanétique

Scintillations

Evolution temporelle

Spécificités de la propagation des faisceaux laser

Imagerie optique à haute résolution à travers la turbulence

Fonction d'étalement de point, fonction de transfert optique

Imagerie = Interférométrie

Image longue pose et fonction de transfert associée

Image courte pose et fonction de transfert associée

Reconstruction des images (interférométrie des tavelures)

Images corrigées par optique adaptative

Interférométrie optique multi-télescope

Principes

Corriger la turbulence

Mesures par interférométrie

Analyse de front d'onde et fonction de transfert associée

Principes de l'analyse de front d'onde

Différents analyseurs

Reconstruction de front d'onde

Polynômes de Zernike et spectre de Kolmogorov

Bruit de mesure

Application à la déconvolution

Optique adaptative et optique active

Principe et domaines d'application comparés

Principaux paramètres d'une optique adaptative

Composants

Application à l'astronomie

Etat de l'art et perspectives

Optique active

Conclusion

Deuxième partie :

Cours I : introduction aux problèmes inverses

- notion de problème mal posé, régularisation ;

FICHE DE MODULE

- interprétation probabiliste [MV/MAP].

Cours II : exemple de problème direct : formation des images en astronomie

Rappel des notions de base en imagerie à travers la turbulence.

TD : Simulation sous IDL d'images longue pose corrigées ou non par optique adaptative.

Cours III : résolution du problème inverse pour deux applications :

- Reconstruction de front d'onde à partir de mesures Shack-Hartmann

- Déconvolution d'images longue pose corrigées par optique adaptative

TD : déconvolution sous IDL des images du cours II, par filtrage inverse et par MAP sous hypothèse gaussienne.

Cours IV : déconvolution avancée : cas du bruit non gaussien, *a priori* non gaussiens (positivité, préservation des bords francs), déconvolution « myope ».

Illustration sur des données astronomiques récentes : VLT-NAOS, Keck, ...

TD : utilisation sous IDL d'algorithmes de déconvolution avancés (logiciel Onera) pour évaluer le gain apporté par les concepts vus dans le cours.

Bibliographie sommaire :

F. Roddier "The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy", Progress in Optics XIX, North Holland 1981, E. Wolf Editor.

R.E. Hufnagel "Propagation through atmospheric turbulence", IR Handbook, chapitre 6, Wolfe Zissis Editor.

F. Roddier, J. Beckers, P. Léna, P.-Y. Madec, M. Northcott, G. Rousset, D. Sandler, M. Séchaud "Adaptive optics in astronomy", Cambridge University Press, F. Roddier Editor, 1999.

L. Mugnier « Des données à la connaissance de l'objet : le problème inverse », chap. 9, sec. 6 de « L'observation en astrophysique », pp. 591-613, de P. Léna, D. Rouan, F. Lebrun, F. Mignard & D. Pelat, EDP Sciences, Les Ulis, France, 2008.

L. M. Mugnier, G. Le Besnerais & S. Meimon « Inversion in optical imaging through atmospheric turbulence », chap. 10 de « Bayesian Approach to Inverse Problems », pp. 243-283, sous la direction de Jérôme Idier, ISTE / John Wiley, London, 2008.

Pré requis :

Formation d'image dans un instrument optique et fonction de transfert optique.

Diffraction de Fresnel.

Variables aléatoires gaussiennes.

Connaissances de base en imagerie optique et en statistique, notions en IDL