

Universidad de Cantabria

Tesis Doctoral

# FORMACIÓN DE IMÁGENES EN ÓPTICA ADAPTATIVA

Vidal Fernández Canales

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un modelo del proceso físico de formación de imágenes en los telescopios astronómicos dotados de sistemas de óptica adaptativa. El estudio se centra en los sistemas de compensación parcial (aunque gran parte de los resultados son generalizables a los de corrección total en la mayoría de condiciones de observación).

En primer lugar, se ha desarrollado un modelo de la estadística del frente de onda parcialmente compensado. Se ha comprobado que la función densidad de probabilidad de la fase es gaussiana, y, por tanto, su estadística se determina de forma completa a partir de la función de estructura. Se ha analizado el comportamiento de esta función y se han introducido los conceptos de longitud de correlación y parámetro generalizado de Fried. La longitud de correlación no depende de las condiciones atmosféricas por lo que se ha obtenido un ajuste en función del número de modos corregidos. De esta curva se deduce una expresión teórica del parámetro generalizado de Fried. A partir de estas magnitudes

se han ofrecido expresiones aproximadas de la función de estructura y de la función de transferencia óptica.

A continuación se utiliza el modelo de frente de onda para generalizar el modelo de formación de imágenes de Goodman al caso de corrección parcial. De esta forma, se ha obtenido la intensidad en el punto central del plano imagen y se ha demostrado la analogía entre  $\rho_0$  y el parámetro de Fried. Al igual que  $r_0$ ,  $\rho_0$  permite calcular la función de estructura (en el caso de corrección parcial hasta la longitud de correlación), describe el tamaño de las celdas coherentes en la atmósfera y proporciona la resolución y anchura del halo. Por último se ha presentado una expresión aproximada para la *PSF*, que se deduce de la expresión anterior de la función de transferencia óptica. Esta forma aproximada de la *PSF* podría ser de gran utilidad en los procesos de deconvolución.

A partir de la generalización del modelo de Goodman, se ha descrito la estadística de la intensidad luminosa en el punto central del plano imagen en el caso de corrección parcial. Se ha obtenido una función densidad de probabilidad cuyos parámetros se obtienen de la varianza residual en el frente de onda y del parámetro generalizado de Fried. Se ha aproximado esta distribución por una distribución modificada de Rice explotando la analogía física entre el caso de corrección parcial y la suma de un patrón de *speckle* más un fondo coherente. A continuación se han obtenido diversas aproximaciones de esta distribución y se ha realizado la generalización a todo el plano imagen. Se ha demostrado que el cociente señal-ruido es función tanto del nivel de corrección como de la posición en el plano imagen. Este hecho es fundamental en el análisis de los sistemas de óptica adaptativa en aplicaciones como la búsqueda de exoplanetas. Por fin, se ha explicado una serie de técnicas semiempíricas para estimar la estadística a partir de medidas experimentales cuando existen fuentes de error importantes.

Se ha obtenido la función densidad de probabilidad del número de fotones en el punto central del plano imagen como la transformada de Poisson de la distribución de la intensidad luminosa. Se ha desarrollado una expresión en el caso de la distribución exacta de la  $P(I)$ , que requiere realizar una doble integración por métodos numéricos. Para evitar este inconveniente se utiliza la distribución de Rice para la intensidad, con lo que se deduce que el número de fotocuentas sigue una distribución de Laguerre. Su forma es muy similar a la distribución de Bose-Einstein en el halo de *speckle*, y se asemeja a una función de corte gaussiano al acercarse al centro del pico de la mancha de Airy. Idéntica evolución se obtiene al aumentar el grado de compensación en un punto fijo. Además se

ha desarrollado una aproximación de la distribución de Laguerre para el caso de baja compensación.

Se han explicado algunas aplicaciones prácticas en que se ha trabajado utilizando el modelo de formación de imágenes en óptica adaptativa. En primer lugar se ha obtenido la varianza residual real en el frente de onda compensado, lo que permite calibrar el sistema y obtener la estadística de la imagen. También se han analizado diversos métodos para detectar exoplanetas.

Los resultados teóricos han sido comprobados comparándolos con valores procedentes de simulación y con datos experimentales. El proceso de simulación se examinó previamente, con resultados plenamente satisfactorios: se consiguió repetir los resultados de otros autores (por ejemplo la función de estructura y la *FTO*) y reproducir varias funciones teóricas (como la varianza residual en el frente de onda y la función de transferencia de *speckle*). Una vez comprobado su correcto funcionamiento, el programa de simulación se ha utilizado para contrastar los modelos teóricos presentados. Los datos simulados concuerdan con gran precisión con los predichos por los modelos.

Asimismo, se ha desarrollado un sistema experimental para crear frentes de onda distorsionados y parcialmente corregidos. Se basa en la utilización de pantallas de cristal líquido extraídas de un videoprojector comercial. Se ha calibrado el dispositivo y estudiado sus limitaciones. Los datos teóricos coinciden de forma precisa con los experimentales en las condiciones en que no se ponen de manifiesto las limitaciones del dispositivo: en alta corrección o en el halo de *speckle*. Cuando la modulación de intensidad asociada y el limitado rango de desfases de la celda hacen que el dispositivo no reproduzca con exactitud el frente de onda, los valores obtenidos aún coinciden cualitativamente con lo predicho por el análisis teórico. Por tanto, los modelos teóricos se confirman al ser contrastados tanto con datos procedentes de simulación como con valores experimentales.

En resumen, las contribuciones originales más importantes de este trabajo son los modelos propuestos para la fase del frente de onda compensado y la formación de la imagen, la introducción del parámetro generalizado de Fried para describir tanto el frente de onda compensado como la imagen, el ajuste de la longitud de correlación en función tan sólo del grado de corrección, la aproximación de la *PSF* instantánea, la derivación de la estadística de la intensidad luminosa y de la estadística de fotones, la expresión del cociente señal ruido en función del grado de corrección y del punto de observación, la estimación correcta de la varianza residual en el frente de onda a partir de la medida

experimental del cociente de Strehl para cualquier grado de corrección, el desarrollo de nuevos métodos para la búsqueda de exoplanetas y la puesta en marcha de un dispositivo experimental que simula la atmósfera y el sistema de óptica adaptativa utilizando pantallas de cristal líquido de un videoprojector comercial.

### *Perspectivas*

El estudio teórico del proceso físico de formación de imágenes en corrección parcial presenta un evidente interés teórico y práctico. Puede permitir una mejor comprensión de las prestaciones de los sistemas, su caracterización o el desarrollo de mejores técnicas de adquisición de imágenes. Se abren por tanto nuevas vías de trabajo que se apoyan en el trabajo realizado.

Estos nuevos objetivos pueden permitir la definitiva confirmación de la teoría con datos procedentes de sistemas instalados en telescopios astronómicos y ayudar a perfeccionar y completar el modelo. Una posibilidad es determinar de forma completa la estadística de la intensidad en el plano imagen, calculando la función densidad de probabilidad conjunta de la intensidad en dos puntos cualesquiera.

Las aplicaciones del modelo no se limitan al campo de la astronomía óptica. Existen muchos casos en los que existe un medio inhomogéneo que perturba el frente de onda, susceptible de ser tratado con el modelo presentado en esta memoria.

Dos aplicaciones concretas que se ha previsto estudiar son la velocimetría en un fluido inhomogéneo y la caracterización del área de coherencia y de la estadística de las distorsiones en sistemas como el ojo humano.