

Universidad de Cantabria

Tesis Doctoral

FORMACIÓN DE IMÁGENES EN ÓPTICA ADAPTATIVA

Vidal Fernández Canales

Capítulo 3

SISTEMAS DE ÓPTICA ADAPTATIVA

Un frente de onda que se propaga a través de la atmósfera se distorsiona. Esta distorsión puede responder a diferentes esquemas predeterminados de perturbación que se denominan aberraciones de onda. Las condiciones de la atmósfera se pueden describir por un único parámetro: r_0 , el parámetro de Fried. Un r_0 pequeño indica un grado de turbulencia alto y aberraciones importantes en la imagen. Un r_0 mayor es señal de una atmósfera más reposada, y por tanto de imágenes menos distorsionadas. Si el diámetro del telescopio con que observamos es menor que r_0 , los efectos de la atmósfera no son importantes, porque la difracción por la abertura del telescopio limita más la resolución que la propia atmósfera. El único efecto destacable es un movimiento aleatorio de la imagen. Sin embargo, en los grandes telescopios el límite de resolución que impone la atmósfera es muy inferior al que teóricamente podría ofrecer la abertura. La abertura de

un telescopio de la última generación (unos 10 m de diámetro) tiene un límite difraccional de una centésima de segundo de arco. En circunstancias normales en un buen observatorio astronómico, el parámetro de Fried ronda la decena de cm, por lo que la resolución que se obtiene es dos órdenes de magnitud inferior a la teórica del telescopio. El objetivo de los sistemas de óptica adaptativa es corregir a tiempo real las aberraciones que la atmósfera introduce en el frente de onda, para obtener imágenes con mejor resolución. El incremento de información que se obtiene es enorme, como se puede apreciar en la figura 3.1.

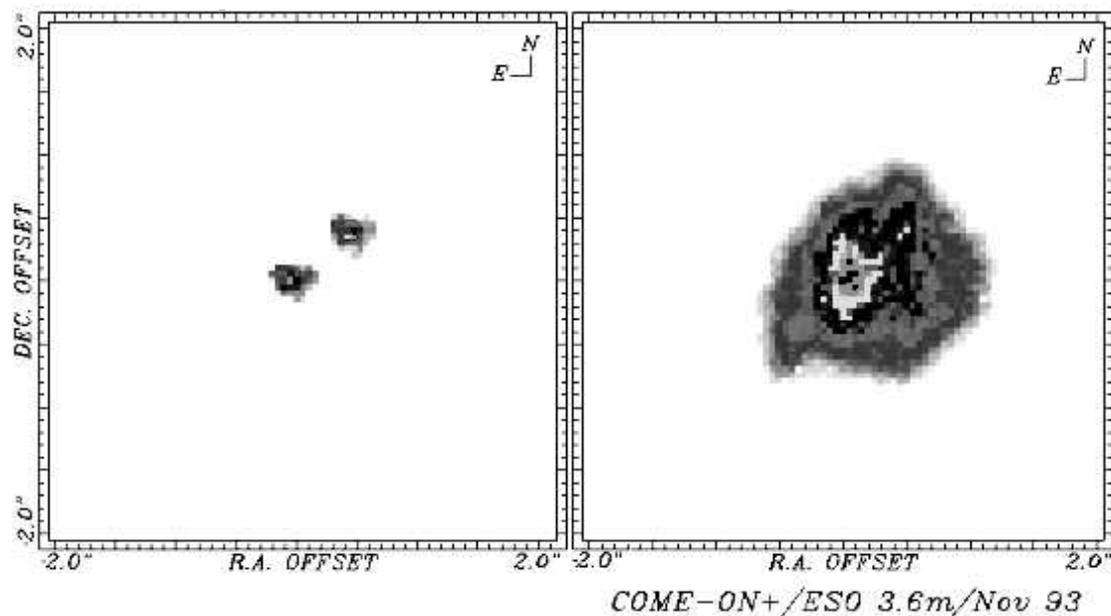


Figura 3.1 A la derecha se observa una imagen astronómica de una estrella binaria tomada en un telescopio de 3.6 m de diámetro (del Observatorio Sur Europeo en La Silla, Chile) en el infrarrojo (1680 nm). Las aberraciones introducidas por la atmósfera no se han corregido y no se distinguen las dos estrellas que componen la binaria. La figura tiene una resolución cercana a dos segundos de arco. La imagen de la izquierda corresponde al mismo objeto; en este caso, se añade al telescopio un sistema de óptica adaptativa (COME-ON). Se observa que la resolución ha mejorado hasta 0.12". Las dos componentes de la binaria aparecen perfectamente diferenciadas y se puede obtener su separación.

Es importante definir con exactitud el tipo de sistemas a que nos vamos a referir, porque en la literatura se suelen confundir los conceptos de óptica activa y óptica adaptativa. Se adopta en este texto el criterio más difundido entre la comunidad astronómica (Tyson 1991, Wilson et al. 1987). Ambos tipos de sistemas corrigen aberraciones que cambian con el tiempo. Es evidente que tales sistemas no pueden ser estáticos, como una lente divergente que corrige las aberraciones fijas de un ojo miope, sino que han de tener elementos que varíen con el tiempo, igual que las aberraciones que corrigen. Los sistemas de óptica activa corrigen distorsiones que varían con frecuencia inferior a 0.1 Hz. Los sistemas de óptica adaptativa compensan distorsiones cuya frecuencia es superior a 0.1 Hz.

En este capítulo se realiza una breve descripción de los componentes y funcionamiento de los sistemas de óptica adaptativa. Los principales componentes de un sistema de óptica adaptativa son el sensor de frente de onda, que mide las aberraciones que crea la atmósfera, y el elemento que corrige las aberraciones. Además se requiere un sistema para analizar la información del sensor y dirigir el elemento compensador. En la figura 3.2 se muestra el esquema de un sistema de óptica adaptativa.

En el último apartado se analizan las limitaciones que impiden a los sistemas de óptica adaptativa lograr una total compensación de las distorsiones del frente de onda como la limitación en la señal y el ruido en el sensor de frente de onda, el muestreo espacial finito de las aberraciones, el número limitado de grados de libertad en el elemento compensador o los retrasos entre la medida de las aberraciones y su compensación.

A pesar de estas limitaciones, los sistemas cuyas subaberturas en el sensor de frente de onda y actuadores en el elemento corrector tienen un tamaño del orden del parámetro de Fried, se suelen denominar sistemas de compensación total. Para telescopios de varios metros de diámetro en el visible, estas condiciones implican cientos o miles de subaberturas en el sensor y un número similar de grados de libertad en el elemento compensador. Los sistemas han de funcionar de forma muy estable a decenas o cientos de Hz. Esto requiere sistemas de gran complejidad técnica y precio elevadísimo. Los sistemas con un número menor de subaberturas en el sensor de frente de onda y de actuadores, se denominan sistemas de corrección parcial. Ofrecen unas prestaciones excelentes en muchas aplicaciones y su costo es muy inferior.

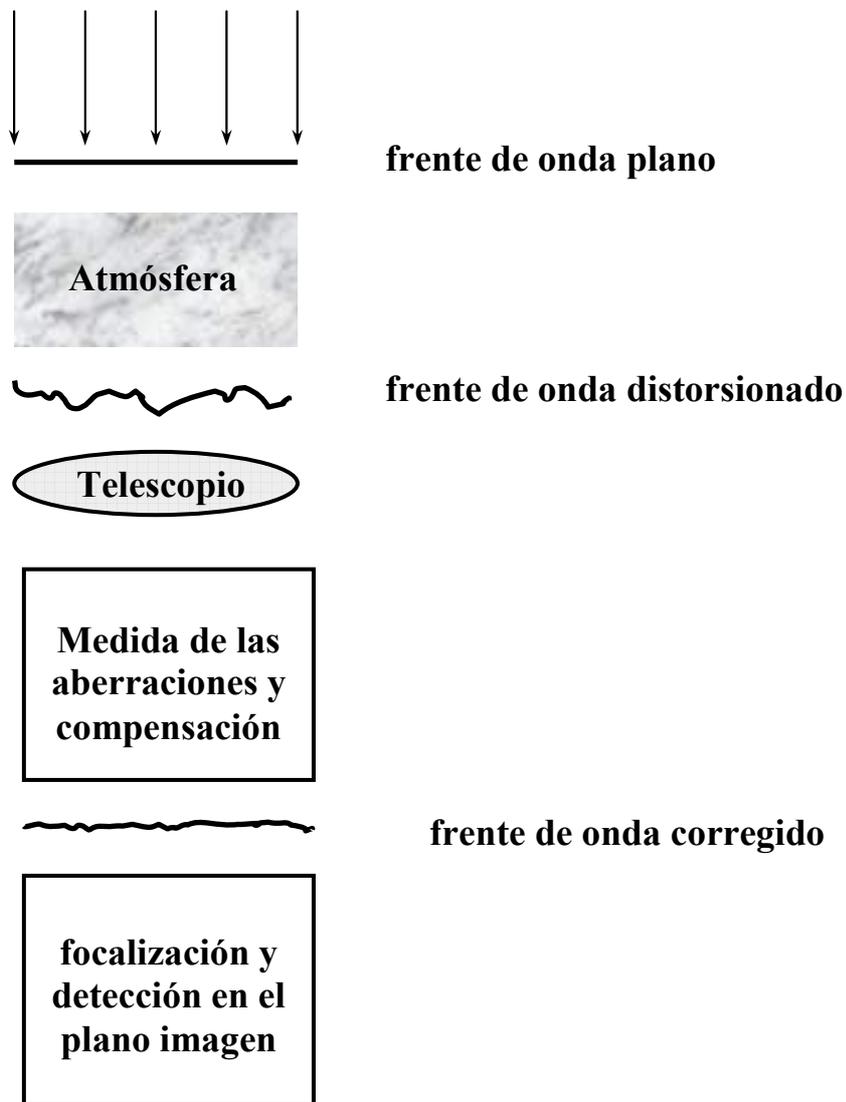


Figura 3.2 Esquema de un sistema de óptica adaptativa. Los frentes de onda provenientes de objetos astronómicos se distorsionan al atravesar la atmósfera y llegan a la pupila del telescopio. A continuación se realiza el proceso de medición y compensación de sus aberraciones, siguiendo un bucle que dirige el sistema de control. El último paso consiste en la detección de la imagen.

Este trabajo se centra en estos últimos (aunque gran parte de los resultados son generalizables a los primeros en la mayoría de condiciones de observación), porque son los más numerosos, apenas existen descripciones sobre su comportamiento y sin embargo su utilización reporta innumerables beneficios. Además, los sistemas de corrección total para una longitud de onda funcionan en corrección parcial para longitudes de onda más cortas. Por ejemplo, los sistemas que están funcionando actualmente para el infrarrojo se pueden utilizar para longitudes de onda del visible, y en tal caso trabajan en corrección parcial¹. La descripción del proceso de formación de la imagen que se desarrolla en este trabajo permite la comprensión de las prestaciones de los sistemas, su caracterización o el desarrollo de mejores técnicas de adquisición de imágenes.

3.1 Sensor de frente de onda

El sensor de frente de onda es el dispositivo encargado de medir las distorsiones que la atmósfera produce en el frente de onda. Aunque la atmósfera perturba tanto la amplitud como la fase de la onda, las variaciones de la fase son las que más contribuyen a la degradación de la imagen. Por esta razón los sistemas actuales de óptica adaptativa no miden ni corrigen las variaciones en la amplitud (*scintillation*). Cuando los sistemas alcancen una corrección de la fase tan alta que las variaciones en la amplitud sean importantes, será necesario corregir estas. De hecho, se han propuesto aplicaciones como la detección de planetas en estrellas distintas al Sol en las que se requiere la corrección de las variaciones de la amplitud (Angel 1994). La medida de estas variaciones consiste simplemente en la formación de una imagen de la pupila.

En cualquier caso, los sistemas actuales sólo miden las aberraciones de la fase. A continuación se describen de forma esquemática los diversos tipos de sensores de frente

¹ En el capítulo sobre la turbulencia atmosférica se explicó que el parámetro de Fried crece al aumentar la longitud de onda λ . Si un sistema está diseñado para trabajar en corrección total para el infrarrojo, sus subaberturas y actuadores son del tamaño del r_0 para esa λ . Sin embargo para el visible el r_0 es menor y el sistema funciona en corrección parcial.

de onda que existen. Una discusión detallada se puede encontrar en Tyson (1991) o Geary (1995).

Por último se trata la reconstrucción del frente de onda a partir de los datos del sensor.

3.1.1 Medida de las curvaturas locales del frente de onda

Roddier (1988, 1990, 1991) desarrolló la teoría que permite conocer la curvatura del frente de onda a partir de imágenes fuera de foco. Se ha aplicado en combinación con un espejo adaptativo de curvatura variable (Forbes 1989, Forbes y Roddier N. 1991) en el sistema de óptica adaptativa desarrollado por la Universidad de Hawaii (Graves y McKenna 1991, Roddier N. 1991, Roddier y Roddier 1988, Roddier et al. 1987, 1991a,b). La ventaja de este sistema es que la información del sensor puede ser enviada directamente a los actuadores del espejo corrector.

3.1.2 Redes neuronales

Muchos expertos en tratamiento de imágenes pueden reconocer a simple vista las aberraciones dominantes en una imagen. De forma similar, se pueden desarrollar redes neuronales que “aprendan” a reconocer las aberraciones (Angel et al. 1990, Sandler et al. 1991a,b). Se han realizado experimentos numéricos en los que las redes neuronales ofrecían resultados análogos a los de los sensores tradicionales para los primeros ocho modos del desarrollo del frente de onda en polinomios de Zernike (con $D/r_0 \approx 7$) (Sandler et al. 1991a). Algunos sistemas experimentales basados en las técnicas de redes neuronales han logrado medir y compensar parcialmente frentes de onda (Wizinovich et al. 1991, Lloyd-Hart et al. 1992a,b).

3.1.3 Medida de las pendientes locales del frente de onda

A continuación se describen diversos tipos de sensores basados en la medida de las pendientes locales del frente de onda; se presta especial atención al más utilizado de los sensores de frente de onda, el Hartmann-Shack.

A. Sensor de Foucault

Se coloca un segmento muy delgado en una imagen intermedia. La distribución de intensidades en el siguiente plano imagen de la pupila representa aproximadamente los gradientes en la dirección perpendicular al segmento. Esta técnica, ya propuesta por Babcock (1953) en su artículo seminal sobre la óptica adaptativa, apenas se utiliza a pesar de haber sido mejorada por Goad (1986).

B. Sensores interferométricos por desplazamiento lateral

Se desplaza lateralmente el frente de onda y se mezcla consigo mismo. Del patrón de interferencias se puede extraer la pendiente del frente de onda (“tilt”) en la dirección del desplazamiento del frente de onda (Hardy 1978, 1982, Hardy y McGovern 1987, Hardy et al. 1977, Koliopoulos 1980).

C. Sensor de Hartmann-Shack

Estos sensores son los más comúnmente utilizados en los sistemas de óptica adaptativa. En la figura 3.3 se muestra un esquema. En un plano conjugado de la pupila se coloca una matriz de microlentes. Cada microlente forma una imagen en su plano focal. La pendiente media del frente de onda en el área de la microlente se obtiene de la posición del centro de gravedad x_G de esta imagen: (Allen et al. 1987, Gaffard y Boyer 1989, Rousset et al. 1987, Séchaud et al. 1991):

$$x_G = \frac{\lambda f}{2\pi} \frac{1}{S} \int_S \frac{\partial \phi}{\partial x}(\vec{r}) d\vec{r} \quad (3.1)$$

donde λ es la longitud de onda, f la focal de la microlente y S la superficie de la pupila de una microlente. La pendiente local es el promedio de la derivada primera de la fase.

Es importante destacar que la posición del centro de gravedad de la imagen depende de la diferencia de camino óptico $\lambda\phi/2\pi$, que en primera aproximación es independiente de la longitud de onda. Así pues este sensor es un instrumento acromático. Esta propiedad es esencial pues permite aprovechar la luz de forma mucho más eficiente que en el resto de sensores. Aun así la intensidad de la señal es un límite fundamental para las prestaciones del sistema de óptica adaptativa. Si el diámetro de las microlentes es del orden de r_0 y los tiempos de exposición de milisegundos, la mayor parte de los objetos en el cielo son demasiado débiles para obtener niveles de ruido aceptables en el sensor (Beckers 1993). El porcentaje de cielo observable (es decir las regiones en las que existe una fuente de brillo suficiente dentro del campo isoplanático) aumenta al emplear longitudes de onda más largas: del 2.6 $10^{-4}\%$ en 550nm, al 1.32% en 2200 nm, hasta el 100% en 10^4 nm (Beckers 1993). En el rango del visible el porcentaje aumenta rápidamente al mejorar las condiciones atmosféricas, aproximadamente como r_0^5 .

Un método para conseguir señales para el sensor con suficiente intensidad aunque el objeto esté en las zonas de cielo donde no existe una fuente natural adecuada, consiste en usar una estrella de referencia artificial, creada con un láser (Fugate et al. 1991, Gardner et al. 1990). El haz láser se focaliza en el centro del campo de visión y a gran altura sobre el telescopio. Parte de la luz es dispersada en dirección al telescopio y se utiliza en el sensor de frente de onda para medir las aberraciones. Esta técnica aún presenta diversos problemas que impiden utilizarla de forma habitual, aunque existen importantes programas destinados a su desarrollo (Foy 1998).

Una limitación asociada de las prestaciones de los sistemas es el anisoplanatismo: se miden las aberraciones de un frente de onda que proviene de una fuente de referencia próxima al objeto, no las del propio frente de onda del objeto, lo que impide una compensación perfecta.

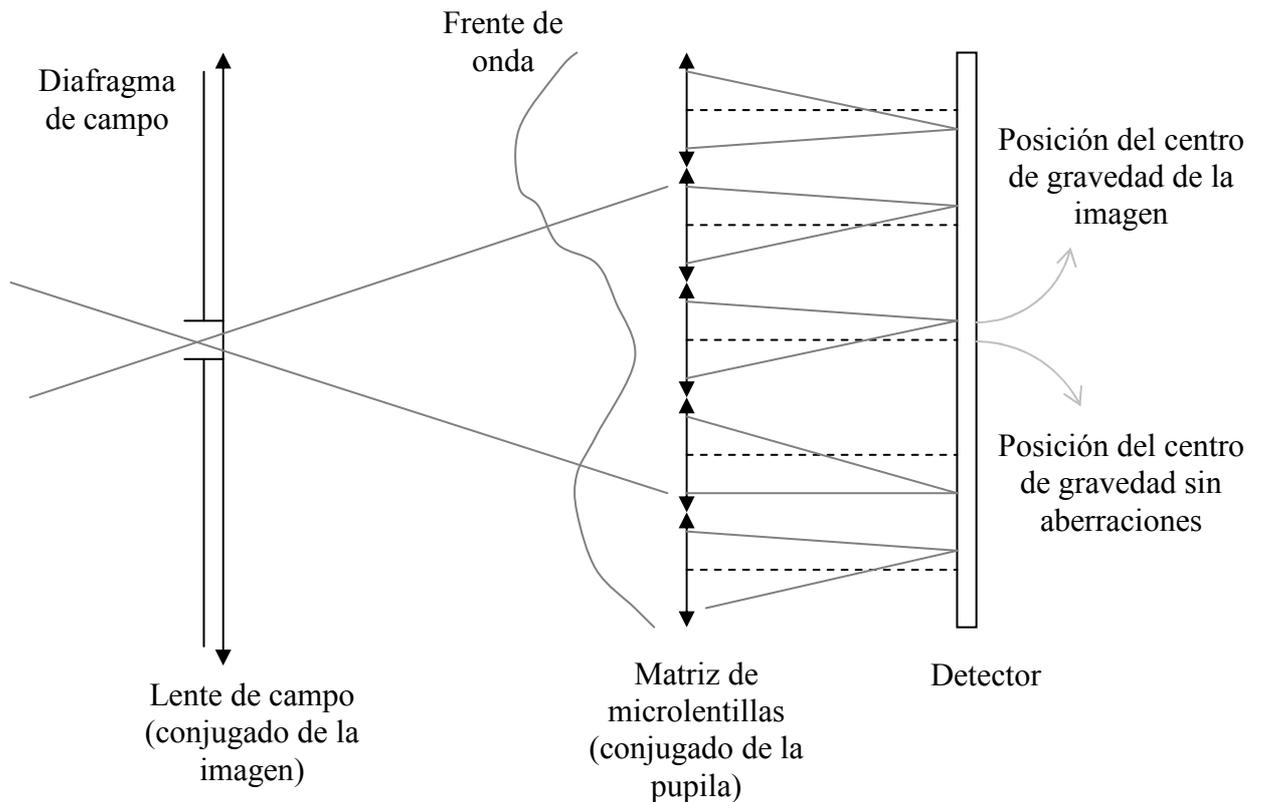


Figura 3.3 Esquema de un sensor de frente de onda tipo *Hartmann-Shack*. Los frentes de onda provenientes de objetos astronómicos se distorsionan al atravesar la atmósfera y llegan a la pupila del telescopio. En un plano conjugado de la pupila se coloca una matriz de microlentes. Cada microlente forma una imagen en su plano focal. La pendiente media del frente de onda en el área de la microlente se obtiene de la posición del centro de gravedad de esta imagen.

3.1.4 Reconstrucción del frente de onda

Los sensores de frente de onda no ofrecen una medida directa de la fase del frente de onda, que es la magnitud física a corregir. Es, pues, necesario reconstruir la fase a partir de los datos obtenidos en el sensor. En esta sección se estudia el caso del sensor Hartmann-Shack. La información que este sensor proporciona es la pendiente media local del frente de onda en el área de cada una de las microlentes. Para reconstruir la fase se

suele descomponer el frente de onda según una base. Se escoge la base de los polinomios de Zernike Z_i (Noll 1976), pues son ortonormales en una pupila circular:

$$\phi(\vec{r}) = \sum_{i=2}^{i_{\max}} a_i Z_i(\vec{r}) \quad (3.2)$$

En el siguiente capítulo se describe esta descomposición con mayor detalle. No aparece el coeficiente que corresponde al primero de los polinomios (*piston*). Este término corresponde a un factor constante que se suma a todo el frente de onda y no puede ser determinado a partir de derivadas primeras. No tiene repercusión en la calidad de la imagen así que puede obviarse.

Para hallar la fase basta pues determinar los coeficientes a_i . Sea \vec{p} el vector de las pendientes locales que ofrece el sensor y \vec{a} el vector de los coeficientes del frente de onda. Se pueden relacionar por:

$$\vec{p} = D \vec{a} \quad (3.3)$$

donde D es la matriz que caracteriza al analizador de frente de onda. Su columna i -ésima corresponde a la medida que se obtiene cuando el frente de onda es igual a Z_i . Es necesario invertir esta ecuación para hallar los coeficientes del frente de onda a partir de las medidas. Es evidente que el número de coeficientes que se pueden estimar ha de ser menor que el número de pendientes locales medidas para que el problema esté bien determinado. Se trata pues de encontrar la mejor aproximación al vector \vec{a} considerando la medida \vec{p} (es decir, que pertenezca al subespacio que definen los coeficientes que se toman en cuenta). Puede ser interesante en este caso incluir la estadística de la fase y del ruido en la medida (Sasiela 1985). Si no se conoce la estadística de los coeficientes y se toma ruido gaussiano incorrelado se obtiene la solución clásica de los mínimos cuadrados (Herrmann 1980):

$$\vec{a}_{\text{estim}} = [D^T D]^{-1} D^T \vec{p} \quad (3.4)$$

Otra posibilidad es definir un procedimiento que minimice la varianza media de la fase sobre la superficie de la pupila entre la fase real y la reconstruida (Wallner 1983), que es un parámetro de singular importancia.

No debe confundirse este proceso teórico de reconstrucción de la fase con el control del elemento corrector. Este impone nuevas limitaciones, pues es evidente que no se puede representar en su superficie la fase reconstruida de forma perfecta. En un sistema real se ha de buscar una base óptima teniendo en cuenta la estadística de la turbulencia (Cho y Petersen 1989, Gendron 1993), las características del elemento corrector (Gaffard y Ledanois 1991) y la geometría del sensor (Marais et al. 1991).

3.2 Elemento corrector

Una vez que se conoce el frente de onda el elemento corrector compensa sus aberraciones. Los elementos correctores son por lo general espejos. Su diseño ha de permitir variar la forma de su superficie de forma que se pueda ajustar a la distorsión instantánea del frente de onda. Esto se consigue generalmente usando materiales piezoeléctricos que deforman su superficie al aplicarles una tensión eléctrica. Se caracterizan por su tamaño, el número de subáreas ajustables, el número de actuadores y su velocidad. Como la aberración más importante es el *tilt* (inclinación media del frente de onda) suelen dividirse en dos subsistemas: un espejo que cubre toda la apertura y que corrige la inclinación media del frente de onda y un espejo adaptativo que corrige distorsiones de orden superior. Se ha de destacar que los espejos se suelen situar antes del divisor de haz que distribuye parte de la energía al sensor de frente de onda y el resto al detector de la imagen; la figura 3.4 ofrece un esquema de la situación de los componentes del sistema.

A. Espejos segmentados

Los sensores tipo Hartmann-Shack miden la pendiente local del frente de onda. Los espejos segmentados consisten en una matriz de espejos equivalentes a la del sensor de frente de onda. De esa forma se simplifica el control de los actuadores, que ajustan su inclinación directamente con el dato de la pendiente local en su correspondiente microlente (Dunn 1987, 1989, 1990, Smithson 1987, Smithson et al. 1984, 1988). El problema surge para ajustar el *piston* de cada uno de los espejos y asegurar la continuidad del frente de onda. Otro inconveniente son los huecos entre los distintos espejos que producen pérdida de señal y difracción de la luz.

B. Espejos continuos

Al ser continuos mantienen automáticamente la continuidad del frente de onda. Sin embargo, la inclinación de los espejos ha de calcularse, no se utiliza directamente la información del sensor de frente de onda como en los anteriores. Es importante optimizar las funciones respuesta de los actuadores para que se reproduzca con fidelidad el frente de onda detectado en el sensor.

Existe un tipo de espejos continuos en que los actuadores producen curvaturas en lugar de desplazamientos en el frente de onda (Roddier et al. 1991a,b). Esto se consigue por técnicas bimorfas usando materiales piezoeléctricos opuestamente polarizados (Forbes 1989, Jagourel et al. 1990a,b, Kokorovski 1979, Steinhaus y Lipson 1979). Estos sistemas aúnan las ventajas de ambas clases de espejos: mantienen la continuidad del frente de onda de forma automática y la medida del sensor se usa directamente para dirigir los actuadores.

C. Otros dispositivos

Existen muchas otras maneras de variar el camino óptico. Babcock (1953, 1958) propuso usar una película de aceite como elemento deformable. Los espejos de membrana aprovechan la deformación de una membrana fina al aplicarle fuerzas electrostáticas (Clampin et al. 1991, Durrance y Clampin 1989, Grosso y Yellin 1977, Merkle et al. 1982); son frágiles y se usan para corregir órdenes bajos. También se ha propuesto el

empleo de dispositivos de cristal líquido (Bonaccini et al. 1990, 1991). En este trabajo se propone utilizar las pantallas de cristal líquido tanto para simular la atmósfera como el elemento corrector (capítulos 10 y 11).

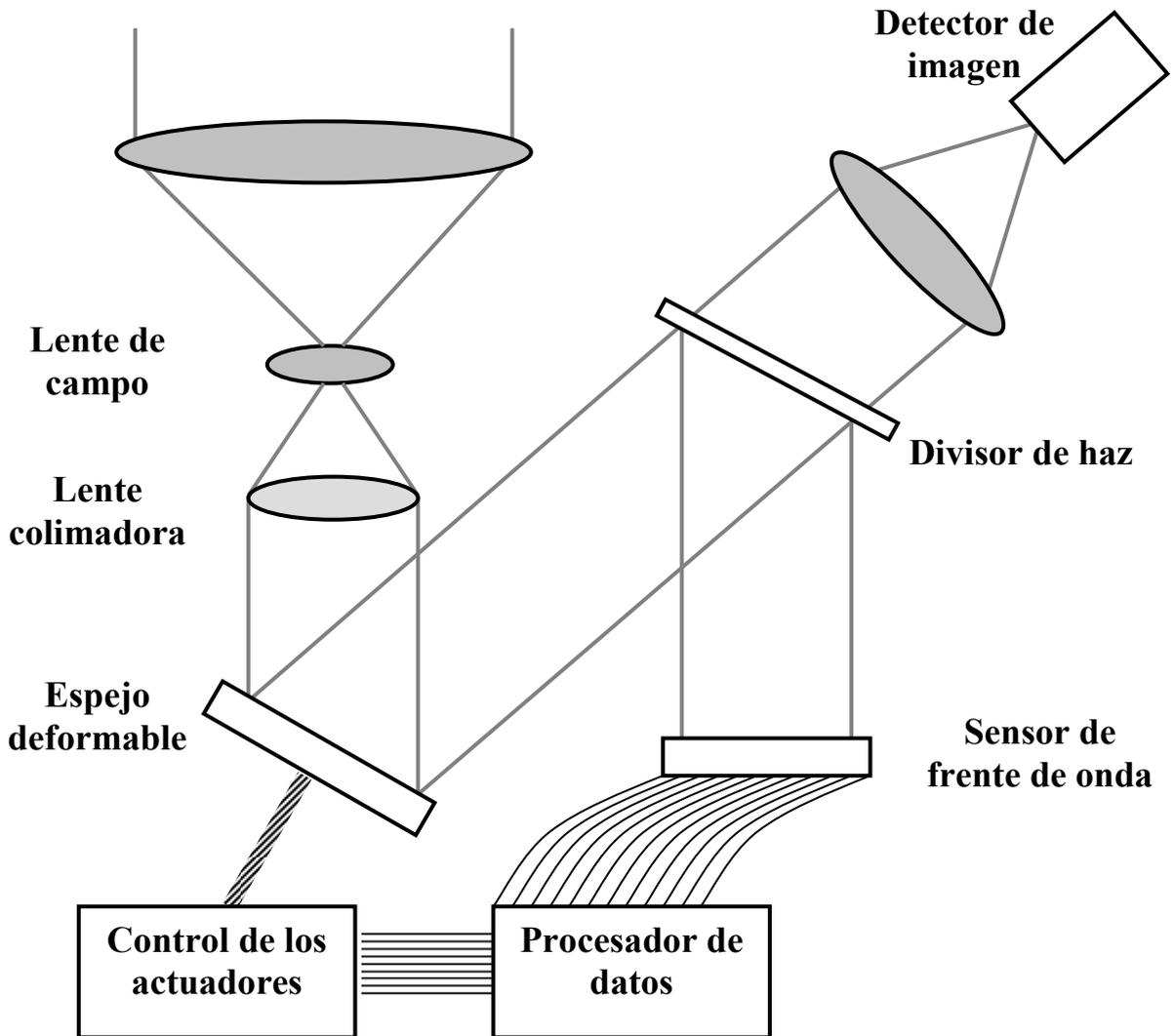


Figura 3.4 Situación de los componentes de los sistemas de óptica adaptativa.

3.3 Control del sistema

Los sistemas que dirigen los actuadores de los espejos adaptativos utilizando la información del frente de onda son muy complejos (Boyer 1991, 1990 a,b). Excepto los más simples, que sólo corrigen aberraciones de bajo orden, reciben un gran número de señales muy ruidosas que se procesan para reducir la influencia del ruido en la corrección del frente de onda. Estos procesos se han de llevar a cabo más rápido que el tiempo característico de la atmósfera, del orden de los milisegundos, lo que explica la complejidad de los sistemas de control.

La mayoría de los sistemas funciona con control modal. Las señales del frente de onda se combinan para expresar el frente de onda como combinación lineal de una serie de modos, generalmente los polinomios de Zernike. También se utilizan otras bases como los polinomios de Karhunen-Loève (Wang y Markey 1978) o los autovectores de un determinado sistema. El sistema de actuadores se calibra de forma que pueda reproducir estos modos y combinaciones lineales de ellos. Las constantes temporales se pueden ajustar de forma que se efectúe un control lento de las aberraciones de bajo orden y un control rápido de las aberraciones de mayor orden.

En ocasiones se utilizan sistemas analógicos para lograr las grandes velocidades de procesamiento necesarias; en otras se emplean controladores digitales para aplicar algoritmos que sean fiables ante cambios en condiciones como el flujo, el ruido, el parámetro de Fried o el tiempo característico de la atmósfera.

El control se simplifica cuando existe una correspondencia biunívoca entre cada señal de una microlente del sensor y cada actuador (control zonal), como en el caso de los espejos segmentados y los de curvatura. Sin embargo, este control requiere señales con buen cociente señal-ruido. En la mayoría de observaciones astronómicas dicha condición no se cumple y se necesita filtrar espacialmente las señales.

3.4 Fuentes de error

Se resume en este apartado la influencia de los distintos factores que limitan las prestaciones del sistema, aunque este trabaje en corrección total (tamaño de las microlentes y de los actuadores similar al parámetro de Fried).

A. Resolución espacial finita

La resolución espacial finita en el sensor de frente de onda y en el espejo adaptativo para un sistema con control zonal produce una varianza residual en el frente de onda igual a:

$$\Delta_{\text{espacial}} \approx 0.34 \left(\frac{r_E}{r_0} \right)^{5/3} \text{ rad}^2 \quad (3.5)$$

donde r_E es el tamaño de las microlentes del sensor de frente de onda o de los elementos en el espejo deformable.

B. Resolución temporal finita

Este error se denomina a menudo error por retraso temporal. Se debe a los cambios que se producen en el frente de onda durante el tiempo que transcurre entre su detección y su compensación. Produce en el frente de onda una varianza residual que se puede expresar como:

$$\Delta_{\text{temporal}} \approx \left(\frac{f_G}{f_s} \right)^{5/3} \text{ rad}^2 \quad (3.6)$$

donde f_s representa la anchura de banda del ciclo de corrección y es aproximadamente $0.3/\tau_d$, siendo τ_d la diferencia de tiempo entre la medición del frente de onda y su corrección; f_G es la frecuencia de Greenwood que se usa a menudo para describir los sistemas de control de óptica adaptativa (Greenwood 1977, Greenwood y Fried 1976):

$$f_G = \frac{0.43V_w}{r_0} \quad (3.7)$$

donde V_w es la velocidad del viento.

C. Ruido de fotones

En general la señal que llega al sensor de frente de onda es muy débil y tiene bajo cociente señal-ruido, SNR . Esto provoca una varianza residual en el frente de onda:

$$\Delta_{\text{fotones}} = 4 \text{SNR}^{-2} \text{ rad}^2 \approx \frac{4}{N_p} \text{ rad}^2 \quad (3.8)$$

donde N_p es el número de fotones detectados. Cuando el número de fotones es muy bajo ($\ll 100$) el ruido de fotones limita seriamente el comportamiento del sistema; sólo se pueden corregir los modos de menor orden por lo que el sistema trabaja en corrección parcial.

D. Aproximación policromática

El índice de refracción atmosférico varía con la longitud de onda; sin embargo esta variación en general se ignora en óptica adaptativa. Podría ser compensada porque se conoce con gran exactitud el perfil del índice en función de la longitud de onda. Sin embargo, el efecto sólo es importante si se usan longitudes de onda largas para medir el frente de onda y más cortas en la compensación (Hogge y Butts 1982), que no es un caso habitual en astronomía. Por el contrario, es común medir en el visible y compensar en el infrarrojo; en este caso la varianza residual es del orden de 0.005 rad^2 , que puede ser ignorada en todas las aplicaciones reales.

E. Anisoplanatismo

En general, se miden las aberraciones del frente de onda que proviene de una fuente de referencia próxima al objeto (sea una estrella real, sea una estrella creada artificialmente con un láser), no las del propio frente de onda del objeto, lo que introduce distorsiones en el frente de onda compensado. El anisoplanatismo puede provocar que el cociente de Strehl descienda hasta un 40% para D/r_0 grandes en el límite del campo isoplanático.

F. Variaciones de la amplitud

Las variaciones de la fase de la onda al atravesar la atmósfera contribuyen en mucho mayor medida que las de la amplitud a la degradación de la imagen. Por esta razón los sistemas actuales de óptica adaptativa ignoran en general las variaciones de amplitud. En los sistemas que trabajan en corrección total pueden conducir a una reducción del cociente de Strehl del 10 o 15% en el visible. Sin embargo, en los sistemas de corrección parcial su efecto es despreciable.