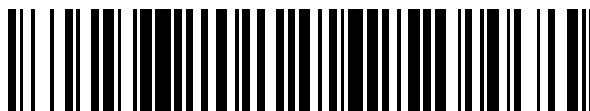


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 532 264**

51 Int. Cl.:

**G02B 23/04** (2006.01)

**G01B 9/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.03.2007** **E 07715933 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.01.2015** **EP 2002200**

54 Título: **Interferometría de anulación por polarización**

30 Prioridad:

**24.03.2006 EP 06075694**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**25.03.2015**

73 Titular/es:

**NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR  
TOEGEPAST- NATUURWETENSCHAPPELIJK  
ONDERZOEK TNO (100.0%)  
Anna van Buerenplein 1  
2595 DA 's-Gravenhage, NL**

72 Inventor/es:

**SPRONCK, JULIEN FELIX PAUL**

74 Agente/Representante:

**LAZCANO GAINZA, Jesús**

**ES 2 532 264 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Interferometría de anulación por polarización

5 La invención se refiere a un método y un sistema óptico para proporcionar interferencia destructiva sobre un eje de la luz recibida desde un objeto a lo largo de un eje predeterminado del sistema óptico. En particular, la invención se refiere a un sistema óptico para proporcionar interferencia destructiva sobre un eje de la luz recibida desde un objeto a lo largo de un eje predeterminado del sistema óptico, que comprende una estructura óptica de recepción y de guiado para recibir y guiar al menos tres haces de la luz recibida desde dicho objeto, la estructura óptica de recepción y de guiado se dispone para proporcionar una diferencia relativa del camino óptico entre los al menos tres haces; y una estructura óptica de combinación para combinar los al menos tres haces para proporcionar interferencia destructiva sobre un eje.

10 El primer exoplaneta se descubrió en 1995 por Mayor y Queloz. Desde ese momento, más de ciento cincuenta planetas se han detectado en diez años. Todos estos planetas fueron encontrados mediante métodos indirectos, lo cual significa que se detectaron solo algunos efectos que el planeta tiene sobre su estrella y no radiación directa desde el planeta.

15 La detección directa de exoplanetas similares a la Tierra no es una tarea fácil. Ciertamente, si nuestro sistema solar se observara desde una distancia de 10 pc, la separación angular entre la Tierra y el Sol sería igual a  $0.5 \mu\text{rad}$  y el contraste de brillo entre la estrella y el planeta sería, en el mejor caso,  $10^6$ .

20 La interferometría por anulación parece hasta ahora una técnica muy prometedora. Esta consiste en observar un sistema de estrella y planeta con un arreglo de telescopios, y combinar después la luz desde estos telescopios de tal manera que, simultáneamente, se produce interferencia destructiva para la luz de la estrella e interferencia (parcialmente) constructiva para la luz del planeta. La relación entre las intensidades correspondientes a las interferencias constructiva y destructiva se denomina la relación de rechazo. Para poder detectar un planeta, esta relación es, preferentemente, del orden de al menos  $10^6$ .

25 Otra dificultad importante es que esta relación de rechazo se logra, preferentemente, en una banda espectral ancha (6-18  $\mu\text{m}$  o incluso más ancha). Esta banda ancha se requiere para obtener información espectral del planeta y para aprovechar óptimamente el flujo de fotones desde el planeta.

30 Para alcanzar esta alta relación de rechazo en una banda espectral ancha, la mayoría de los interferómetros de anulación actuales usan un desplazador de fase (acromático).

35 Sin embargo, las modalidades de desplazadores de fase son problemáticas dado que para más de dos haces por lo general resultan en configuraciones asimétricas donde múltiples haces de entrada se retardan de diferentes maneras a fin de desplazar las fases de los mismos. Estas configuraciones generalmente son difíciles de manejar.

40 El artículo de D. Mawet, J. Baudrand, C. Lenaerts, V. Moreau, P. Riaud, D. Rouan y J. Surdej "Birefringent achromatic phase shifters for nulling interferometry and phase coronagraphy", Actas de Towards Other Earths: DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets, Heidelberg, Alemania, 22-25 de abril de 2003, se dirige a desplazadores de fase acromáticos birrefringentes para interferometría de anulación. En J. Spronck, S. F. Pereira y J. J. M. Braat, "Chromatism compensation in wide-band nulling interferometry for exoplanet detection", Appl. Opt., (2005), se describe el principio de compensación de cromatismo para interferometría de anulación. La patente US6,882,427 se dirige a un anulador coherente dinámico.

45 La invención tiene como uno de sus objetos proporcionar un nuevo tipo de interferómetros de anulación que proporcionan una alternativa a los sistemas de la técnica anterior, en particular, proporcionar un nuevo tipo de interferómetro de anulación en donde puedan eliminarse estas asimetrías. Para este fin, la invención proporciona un sistema y método de acuerdo con las reivindicaciones adjuntas.

50 La invención proporciona el sistema óptico de acuerdo con el preámbulo, y que comprende, además, las características de la reivindicación 1. En particular, de acuerdo con la invención el sistema óptico comprende una estructura óptica de variación de la polarización dispuesta entre la estructura óptica de recepción y de guiado y la

55 estructura óptica de combinación, para variar un estado de polarización de unos haces con respecto a los otros con el objetivo de proporcionar la interferencia destructiva sobre un eje.

60 Mediante el uso del concepto de la invención, en lugar del desplazamiento de fase, los estados de polarización de la fase de los haces luminosos recibidos se varían para proporcionar la anulación de múltiples haces. Donde para una disposición de dos haces, esto puede equivaler a la misma aplicación práctica; para tres o más haces, este concepto es

de una naturaleza completamente diferente y equivale a variar las orientaciones relativas de los vectores de polarización; en lugar de variar las fases relativas de los múltiples haces.

La invención se describirá adicionalmente con referencia a los dibujos:

5

En los dibujos:

La Figura 1 muestra una ilustración esquemática de una configuración óptica de tres haces de acuerdo con la invención;

10

La Figura 2 muestra una intensidad detectada normalizada como función de las diferencias de camino óptico entre los tres haces;

La Figura 3 muestra una ilustración esquemática de una disposición de láminas de onda de acuerdo con la invención;

15

La Figura 4 muestra una modificación adicional de la disposición de láminas de onda de acuerdo con la Figura 3;

La Figura 5 muestra una ilustración esquemática de un arreglo de telescopios (puntos) situados en el plano  $z = 0$  y orientados en la dirección  $z$ .

La Figura 6 muestra una pluralidad de mapas de transmisión de tres telescopios correspondientes a diferentes orientaciones de las láminas de onda; y

20

La Figura 7 muestra una respuesta espectral de un interferómetro de anulación de acuerdo con la invención, que usa varios tipos de láminas de onda.

Con referencia a la Figura 1 se proporciona una ilustración esquemática como una configuración óptica de acuerdo con la invención. En particular, la Figura 1 ilustra un sistema óptico 1 para proporcionar interferencia destructiva sobre un eje 2 de la luz recibida desde un objeto 3 a lo largo de un eje predeterminado del sistema óptico 4. En particular, el objeto 3 representado aquí es una estrella, que tiene un posible exoplaneta 5 que orbita alrededor de ella. El sistema comprende una estructura óptica de recepción y de guiado 6 que es para recibir y guiar al menos tres haces 7 de la luz recibida desde dicho objeto 3.

25

La estructura óptica de recepción y de guiado 6 por lo general comprende tres telescopios separados 8, dispuestos, preferentemente, en un único plano ortogonal al eje óptico (aunque esto no es necesario dado que las variaciones relativas del camino óptico pueden compensarse). De esta manera la estructura óptica de recepción y de guiado 6 se dispone para proporcionar una diferencia relativa del camino óptico entre los al menos tres haces 7 como también se ilustra adicionalmente con referencia a la Figura 5.

30

Aunque en esta descripción, por propósitos ilustrativos, se discute un sistema óptico de tres haces 1, debe quedar claro que los principios de la invención pueden aplicarse a más de tres configuraciones de haces, en particular, configuraciones de cuatro y cinco haces o incluso mayor cantidad de telescopios combinados.

35

Además, el sistema óptico comprende las estructuras ópticas 9 para combinar la luz de los telescopios 8 para proporcionar interferencia destructiva sobre un eje. Al proporcionar interferencia destructiva sobre un eje, la luz sobre un eje del objeto estelar 3 se elimina del haz luminoso recibido, de manera que puede detectarse la luz de los objetos alrededor de la estrella 3, en particular, de un posible planeta 5. Antes de combinar los haces luminosos 7 una estructura óptica de variación de la polarización 10 se dispone entre la estructura óptica de recepción y de guiado 6 y la estructura óptica de combinación 9, para variar un estado de polarización de unos haces con respecto a los otros con el objetivo de proporcionar la interferencia destructiva sobre un eje. En particular, en la modalidad ilustrativa representada en la Figura 1, la estructura óptica de variación de la polarización 10 se dispone de manera simétrica ópticamente con respecto a cada uno de los haces luminosos recibidos, esto es, preferentemente, que la estructura óptica de variación de la polarización 10 comprende, para cada haz luminoso recibido, idénticos elementos de variación de la polarización 12. Aunque las modalidades asimétricas también pueden usarse, tales asimetrías deben corregirse lo cual equivale a complicaciones que no están presentes en esta configuración preferida del sistema.

40

45

50

Además, se ilustra esquemáticamente que se usa solo una fracción filtrada por polarización de la luz, mediante el uso de filtros de polarización lineal 11 para proporcionar luz polarizada linealmente. La invención puede llevarse a cabo convenientemente para la luz polarizada linealmente, sin embargo, la invención también es aplicable con otros tipos de estados de polarización, tales como polarización elíptica, etc., siempre que la suma de los estados de polarización equivalga a su cancelación. En la modalidad de la Figura 1 los polarizadores lineales 11 proporcionan una polarización predeterminada a los haces 7 antes de variar el estado de polarización de los haces 7 en la estructura óptica de variación de la polarización 10. Para usar toda la intensidad de la luz recibida la cual es por lo general muy baja, de manera favorable, la otra fracción (polarizada) de la luz recibida se usa también mediante una configuración de divisor del haz por polarización (no mostrada).

55

60

Para discutir en más detalle la estructura óptica de variación de la polarización 10 esta estructura 10 (en la Figura 1 mostrada convenientemente como interconectada para ilustrar la acción efectiva en la misma sobre cada uno de los

haces luminosos recibidos pero en la práctica esto no es necesario) comprende, para cada haz luminoso recibido, una lámina de onda 12 para variar, en particular, rotar el estado de polarización del haz luminoso recibido 7. Como un ejemplo, alternativamente, un rotador de pupila, conocido en la técnica, puede usarse para el propósito.

5 Para rotar el estado de polarización del haz luminoso recibido 7, la lámina de onda 12 (por lo general un cristal birrefringente que tiene un eje óptico) se dispone que tenga su eje óptico transversal a una dirección de propagación del haz luminoso 7. Además, para proporcionar un efecto de anulación, cada una de las respectivas láminas de onda 12 se dispone que tenga un ángulo predeterminado una con respecto a las otras, en el dibujo se ilustra esquemáticamente como el ángulo  $\alpha$ . Para la modalidad de tres haces que usa haces polarizados linealmente, como se ilustrará adicionalmente con referencia a la Figura 6, los ángulos entre los ejes ópticos, preferentemente, son iguales.

10 Para obtener la interferometría de anulación por polarización en un amplio intervalo óptico, lo cual es especialmente necesario en el análisis espectral de la luz que viene del exoplaneta 5 la lámina de onda 12 es, preferentemente, una lámina de onda acromática. Sin embargo, como se mostrará con referencia a la Figura 7, ya para una lámina de onda de orden cero (cromática), es posible obtener un ancho de banda espectral de 3 veces una longitud de onda deseada a la vez que mantiene una aceptable intensidad de transmisión de 0.5.

20 Además, preferentemente, las láminas de onda 12 pueden rotarse, preferentemente, con respecto al eje óptico 4. De esta manera la estructura óptica de variación de la polarización 10 se modula y, junto con una estructura de filtro por pospolarización 13, el peso relativo de cada uno de los tres haces 7 puede variarse para proporcionar la combinación ponderada de los al menos tres haces que tienen un estado de polarización variado. Esto se explica adicionalmente con referencia a la Figura 6.

25 Se considera un arreglo de N telescopios (ver la Figura 5) que reciben y guían haces luminosos que tienen fases y amplitudes independientes  $\phi_j$  y  $A_j$  para cada haz antes de la recombinación. Para cancelar la luz desde la estrella, se necesita interferencia destructiva sobre un eje. La condición para tener esta interferencia destructiva (condición de anulación) se da por

30 
$$f_{\phi}(0) = \sum_{j=1}^N A_j \exp(i\phi_j) = 0, \quad \text{(Ecuación 1)}$$

mientras se dividen ambos miembros de esta ecuación por el factor  $A_1 \exp(i\phi_1)$ , de tal manera que las amplitudes  $A_j$  y las fases  $\phi_j$  se definen de manera relativa a la amplitud y la fase del primer haz. Se hace notar que aquí se asume que las amplitudes relativas  $A_j$  no dependen de la longitud de onda pero no se supone nada acerca de los espectros absolutos de los haces. Se hace notar, además, que estas amplitudes  $A_j$  y fases  $\phi_j$  relativas podrían depender de la longitud de onda. Una condición más general puede derivarse al asumir estados independientes de polarización para cada haz. Mediante el uso del formalismo de Jones para describir la polarización la condición generalizada se da entonces por

40 
$$\vec{f}_{\phi}(0) = \sum_{j=1}^N \vec{A}_j \exp(i\phi_j) = \sum_{j=1}^N \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix} \exp(i\phi_j) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \text{(Ecuación 2)}$$

45 Para un interferómetro de anulación de dos haces, la condición generalizada de anulación en la Ec. (2) simplemente equivale a

$$\vec{A}_1 \exp(i\phi_1) = -\vec{A}_2 \exp(i\phi_2) \quad \text{(Ecuación 3)}$$

En la mayoría de los interferómetros de anulación actuales, esta condición se satisface al aplicar un desplazamiento de fase de  $\pi$  entre los dos haces ( $\phi_2 = \phi_1 + \pi$ ). La condición en la (Ecuación 3) podría cumplirse también sin ningún desplazamiento de fase sino al considerar una rotación de la polarización de  $\pi$  ( $A_1 = -A_2$ ). Esta es una estrategia básicamente diferente, como se verá más claramente en el ejemplo para un interferómetro de anulación de tres haces. En este caso, la siguiente condición de anulación se satisface:

$$\vec{A}_1 \exp(i\phi_1) + \vec{A}_2 \exp(i\phi_2) + \vec{A}_3 \exp(i\phi_3) = 0 \quad \text{(Ecuación 4)}$$

10

Si todos los haces tienen la misma fase, se tiene

$$\vec{A}_1 + \vec{A}_2 + \vec{A}_3 = 0, \quad \text{(Ecuación 5)}$$

15

Esta condición puede cumplirse mediante la rotación de la polarización de los haces. Por ejemplo, si se impone un estado de polarización lineal horizontal al primer haz, la condición en la (Ecuación 5) se satisface mediante el uso de

$$\phi_1 = \phi_2 = \phi_3, \quad \vec{A}_1 = A_0 \begin{pmatrix} \cos 0 \\ \text{sen } 0 \end{pmatrix}, \vec{A}_2 = A_0 \begin{pmatrix} \cos \frac{2\pi}{3} \\ \text{sen } \frac{2\pi}{3} \end{pmatrix}, \vec{A}_3 = A_0 \begin{pmatrix} \cos \frac{4\pi}{3} \\ \text{sen } \frac{4\pi}{3} \end{pmatrix} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

20

Esto muestra que la condición de anulación puede satisfacerse sin ningún desplazador de fase, solo mediante la rotación de la polarización. La luz que viene de una estrella en un eje se cancela entonces.

25

Si un planeta órbita alrededor de esa estrella, entonces la luz del planeta que viene de los diferentes telescopios tendrá diferentes longitudes de camino óptico. Por esa razón, es interesante mirar la intensidad detectada como función de las diferencias de camino óptico entre los tres haces. Primero se considera un caso monocromático. La amplitud detectada como función de las diferencias de camino óptico se da, dentro de un factor de fase, mediante

30

$$\vec{A}_{tot} = \vec{A}_1 + \vec{A}_2 \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} OPD_{21}\right) + \vec{A}_3 \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} OPD_{31}\right) = 0 \quad \text{(Ecuación 7)}$$

35

donde  $OPD_{21}$  y  $OPD_{31}$  son respectivamente las diferencias de camino óptico entre los haces 2 y 1 y entre los haces 3 y 1. La intensidad detectada se da entonces por el módulo al cuadrado de la amplitud en la (Ecuación 7).

40

En el caso del ejemplo de la (Ecuación 6) la intensidad detectada se representa en la Figura 2. La relación de rechazo, definida como la relación entre las intensidades máximas y mínimas del patrón de interferencia, es teóricamente infinita.

Comúnmente se piensa que los haces con diferentes estados coherentes de polarización no pueden interferir con un alto contraste. Sin embargo, este ejemplo muestra que puede hacerse que tres haces coherentes polarizados de manera diferente interfieran con un contraste teóricamente perfecto. Esto es válido también para N haces siempre que N

> 2. La segunda consecuencia es que, dado que la intensidad depende de las diferencias de camino óptico, debe ser posible tener una interferencia constructiva para la luz que viene desde el planeta. El hecho importante es que la interferencia destructiva tiene lugar en la posición de ODP cero. En ese caso, no hay diferencia de fase dependiente de la longitud de onda entre los haces.

5

Una posible implementación para lograr las amplitudes en la (Ecuación 6) para cada longitud de onda en la banda espectral usa rotadores de polarización acromáticos.

10

A continuación, se discute otra implementación. Se supone un sistema de N haces, inicialmente polarizado linealmente de manera horizontal. Cada polarización se cambia después mediante el uso de una lámina de onda simple cuyo eje principal forma un ángulo  $\alpha$  con la horizontal (ver la Figura 3). Si  $T_r$  y  $T_\alpha$  son los coeficientes complejos de transmisión de la lámina de onda en sus direcciones principales ( $T_r = |T_r|$  y  $T_\alpha = |T_\alpha| \exp(i \phi_{o-e})$ , donde  $\phi_{o-e}$  es la diferencia de fase entre los ejes ordinario y extraordinario), el estado de polarización después de la lámina de onda se da por

15

$$\vec{A} = R_\alpha^{-1} \begin{pmatrix} T_r & 0 \\ 0 & T_\alpha \end{pmatrix} R_\alpha \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_r \cos^2 \alpha + T_\alpha \sin^2 \alpha \\ \frac{1}{2}(T_r - T_\alpha) \sin 2\alpha \end{pmatrix} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

20

donde  $R_\alpha$  es una matriz de rotación sobre el ángulo  $\alpha$ .

Para la interferencia destructiva sobre un eje sin ninguna diferencia de fase entre los haces, mientras que, en una modalidad preferida, que tiene todas las láminas de onda exactamente iguales pero con orientaciones diferentes del eje óptico de las mismas, se satisface la siguiente relación:

25

$$\sum_j A_j \begin{pmatrix} T_r \cos^2 \alpha_j + T_\alpha \sin^2 \alpha_j \\ \frac{1}{2}(T_r - T_\alpha) \sin 2\alpha_j \end{pmatrix} = 0 \quad \text{(Ecuación 9)}$$

30

Dado que en esta modalidad se usa una lámina de onda simple que tiene una banda espectral ancha,  $T_r$  y  $T_\alpha$  pueden depender de la longitud de onda de tal manera que la primera componente del vector en la (Ecuación 9) no puede ser igual a cero para cada longitud de onda. La segunda componente, por otro lado, puede cancelarse acromáticamente mediante una buena selección de las amplitudes  $A_j$  y de los ángulos  $\alpha_j$ . Si para cada haz, se añade un polarizador lineal vertical perfecto después de la lámina de onda; la amplitud del j-ésimo haz se da entonces por

35

$$\vec{A}_j = A_j \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{2}(T_r - T_\alpha) \sin 2\alpha_j \end{pmatrix} \quad \text{(Ecuación 10)}$$

40

y la condición de anulación entonces simplemente equivale a

$$\sum_j A_j \sin 2\alpha_j = 0 \quad \text{(Ecuación 11)}$$

En este tipo ilustrativo propuesto de interferómetros de anulación, cada haz encuentra un polarizador lineal horizontal, una lámina de onda y un polarizador lineal vertical (ver la Figura 4). Debe ser posible entonces lograr una alta relación de rechazo en una banda espectral ancha con componentes simples disponibles comercialmente. Por ejemplo, en el caso de un interferómetro de anulación de tres haces, puede proporcionarse una anulación acromática mediante la selección de  $A_1 = A_2 = A_3$ ,  $a_1 = \pi/4$ ,  $a_2 = 7\pi/12$  y  $a_3 = 11\pi/12$ . Se hace notar que pueden obtenerse resultados similares si los haces inicialmente se polarizan linealmente de manera vertical. Después un divisor del haz por polarización puede usarse en lugar del primer polarizador lineal y aplicar el mismo principio a las dos salidas del divisor del haz con el objetivo de usar la intensidad entrante completa.

Se consideran  $N$  telescopios coplanarios orientados en la misma dirección  $z$  (ver la Figura 5). La posición del  $j^{\text{ésimo}}$  telescopio se da en coordenadas polares por  $(L_j, \delta_j)$ . La luz que viene de una fuente puntual localizada en una separación angular del eje óptico  $\theta$  y en un ángulo acimutal  $\phi$  y recolectada por un telescopio determinado tendrá una determinada longitud del camino, la cual depende de la posición de la fuente puntual en el cielo y de la posición del telescopio. Dado que cada telescopio tiene una posición diferente, cada haz tendrá una longitud diferente del camino óptico  $OPL_j$  y por lo tanto una fase diferente  $\phi_j$ .

$$OPL_j = L_j \theta \cos(\phi - \delta_j) \quad \text{y} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

$$\phi_j = \frac{2\pi}{\lambda} OPL_j = \frac{2\pi}{\lambda} L_j \theta \cos(\phi - \delta_j)$$

La amplitud compleja detectada del campo eléctrico después de la combinación se da simplemente por la suma de las amplitudes complejas de los diferentes haces. Para fases  $\phi_j$  y amplitudes  $A_j$  independientes antes de la recombinación, la amplitud compleja detectada se da por

$$f_\phi(\theta) = \sum_{j=1}^N A_j \exp(i\phi_j) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} L_j \theta \cos(\phi - \delta_j)\right), \quad \text{(Ecuación 13)}$$

En la interferometría de anulación, con el objetivo de detectar un planeta apenas visible que orbita alrededor de una estrella brillante, la luz que viene de los  $N$  telescopios se combina, preferentemente, de tal manera que se obtiene interferencia destructiva en un eje ( $\theta = 0$ ). La condición para obtener una interferencia destructiva para  $\theta = 0$  (condición de anulación) se da entonces por

$$f_\phi(0) = \sum_{j=1}^N A_j \exp(i\phi_j) = 0. \quad \text{(Ecuación 14)}$$

El campo eléctrico es un vector y puede descomponerse, mediante el uso del formalismo de Jones, en dos componentes (los dos estados de polarización ortogonales). Para considerar la polarización, deben considerarse cantidades vectoriales en lugar de escalares y sustituirse después en las ecuaciones anteriores las amplitudes  $A_j$  por el vector  $A_j$ . La condición de anulación sería entonces

$$\vec{f}_\phi(0) = \sum_{j=1}^N \vec{A}_j \exp(i\phi_j) = \sum_{j=1}^N \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix} \exp(i\phi_j) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \text{(Ecuación 15)}$$

donde  $A_x$  y  $A_y$  son números complejos que representan el estado de polarización.

Para una fuente puntual localizada en una separación angular del eje óptico  $q$  y en un ángulo acimutal  $j$ , la amplitud compleja detectada  $f_\phi(\theta)$  se da por

$$\vec{f}_\varphi(\theta) = \sum_{j=1}^N \vec{A}_j \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} L_j \theta \cos(\varphi - \delta_j)\right) = \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{2}(T_r - T_\alpha)\right) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} L_j \theta \cos(\varphi - \delta_j)\right)$$

(Ecuación 16)

5 Se hace notar que esta expresión no es general en el sentido de que la estrella que se analiza, se encuentra en el eje z. Si este no es el caso, habría retardos adicionales que no se consideran aquí.

El mapa de transmisión  $T_\varphi(\theta)$  se define como la intensidad detectada normalizada:

$$T_\varphi(\theta) = \frac{|\vec{f}_\varphi(\theta)|^2}{\max[|\vec{f}_\varphi(\theta)|^2]}$$

10 En lo que sigue se discute la dependencia del mapa de transmisión de  $\theta$ . Una estrella no es una fuente puntual sino que tiene un cierto tamaño finito significativo. Por ejemplo, el diámetro angular de nuestro Sol, visto desde una distancia de 10 pársecs, es del orden de 5 nrad. Para detectar un exoplaneta, se necesita, además, una alta relación de rechazo para  $\theta=0$  pero también para separaciones angulares  $\theta$  de unos pocos nrad. Mientras más plano sea el mapa de transmisión alrededor de  $\varphi = 0$ , más fácil será lograr esta relación de rechazo "extendida". Por eso se prefiere un mapa de transmisión proporcional a  $\theta^4$  o, aún mejor, a  $\theta^6$ .

En el trabajo anterior (J. Spronck, S. F. Pereira y J. J. M. Braat, "Chromatism compensation in wide-band nulling interferometry for exoplanet detection", Appl. Opt., (2005)) se mostró que, con el objetivo de tener un mapa de transmisión  $\theta^4$ , además de la condición de anulación en la (Ecuación 11), se satisface la siguiente relación:

$$20 \quad \sum_j A_j \sin 2\alpha_j L_j \theta \cos(\varphi - \delta_j) = 0 \quad \text{(Ecuación 17)}$$

Dado que esta condición se cumple para todos los ángulos  $\theta$ , la Ec. (17) puede dividirse en dos condiciones diferentes

$$25 \quad \sum_j A_j \sin 2\alpha_j L_j \cos \delta_j = 0 \quad \text{(Ecuación 18)}$$

$$30 \quad \sum_j A_j \sin 2\alpha_j L_j \sin \delta_j = 0 \quad \text{(Ecuación 19)}$$

35 Estas condiciones son diferentes de las condiciones de  $\theta^4$  para otros tipos de interferómetros de anulación. Sin embargo, en el caso de una configuración de tres telescopios, la única configuración que puede cumplir estas condiciones es la lineal, como es el caso para otros interferómetros de anulación. Para la detección de exoplanetas, una configuración lineal no es sin embargo muy interesante debido a que solo da información en una dirección.

Otra dificultad para detectar directamente un exoplaneta similar a la Tierra puede ser una posible emisión del polvo



exozodiacal cerca del plano orbital del planeta, como en nuestro propio sistema solar. A priori puede asumirse que tiene simetría central. Debido a esta simetría central, este problema podría manejarse mediante el uso de técnicas de modulación. Una solución posible es usar la modulación externa, la cual consiste en rotar el arreglo de telescopios completo alrededor de su centro, pero esto da lugar a una muy pequeña modulación y disminuirá considerablemente el número de objetivos que pueden observarse durante una misión espacial. Una solución más conveniente es la modulación interna. Con esta técnica, no se cambian las posiciones de los telescopios. Por medio de instrumentos ópticos, se crean diferentes mapas de transmisión que se combinan con el objetivo de crear los mapas de modulación.

Al cambiar el ángulo  $\alpha_j$ , se cambia el "peso" de la amplitud  $A_j$ . Así, la relación entre las amplitudes de los diferentes haces puede cambiarse simplemente mediante la rotación de las láminas de onda, siempre que se satisfaga la condición de anulación en la (Ecuación 11). Esto tiene dos consecuencias. La primera consecuencia es que, con este tipo de interferómetro de anulación, no se necesitan dispositivos adicionales de emparejamiento de amplitudes, como es el caso en la mayoría de los interferómetros de anulación actuales. El emparejamiento de amplitudes es inherente al diseño y se produce simplemente mediante una rotación de la lámina de onda. La segunda y mucho más importante consecuencia es que, dado que la relación entre las amplitudes de los haces puede cambiarse, puede obtenerse un conjunto continuo de mapas de transmisión, que podrían usarse para la modulación rápida.

La Figura 6 muestra un ejemplo de un conjunto de seis mapas de transmisión en el caso de tres telescopios que se han obtenido solo mediante la rotación de las láminas de onda. En estos mapas de transmisión, la intensidad máxima se ha normalizado a un valor dado por

$$\sum_j |A_j \sin 2\alpha_j|^2$$

Todos estos mapas se han calculado con los siguientes parámetros:  $A_1 = A_2 = A_3$ ,  $L_1 = L_2 = L_3 = 25$  m y  $d_1 = 0$ ,  $d_2 = 2\pi/3$ ,  $d_3 = 4\pi/3$ , y para una banda espectral que va desde 500 hasta 650 nm. (a)  $2a_1 = 0$ ,  $2a_2 = 2\pi/3$ ,  $2a_3 = 4\pi/3$ , (b)  $2a_1 = \pi/6$ ,  $2a_2 = \pi/6 + 2\pi/3$ ,  $2a_3 = \pi/6 + 4\pi/3$ , (c)  $2a_1 = 2\pi/6$ ,  $2a_2 = 2\pi/6 + 2\pi/3$ ,  $2a_3 = 2\pi/6 + 4\pi/3$ , (d)  $2a_1 = 3\pi/6$ ,  $2a_2 = 3\pi/6 + 2\pi/3$ ,  $2a_3 = 3\pi/6 + 4\pi/3$ , (e)  $2a_1 = 4\pi/6$ ,  $2a_2 = 4\pi/6 + 2\pi/3$ ,  $2a_3 = 4\pi/6 + 4\pi/3$ , (f)  $2a_1 = 5\pi/6$ ,  $2a_2 = 5\pi/6 + 2\pi/3$ ,  $2a_3 = 5\pi/6 + 4\pi/3$ .

Se hace notar que esto es solo un ejemplo, de un intervalo continuo de mapas de transmisión. Tres mapas de transmisión diferentes son suficientes (por ejemplo, la Fig. (5) (a), (c) y (e) o (b), (d) y (f)), dado que puede demostrarse que cualquier mapa de transmisión del conjunto continuo puede verse como una combinación lineal de estos tres mapas de transmisión.

En algunas aplicaciones, además de la detección de un exoplaneta similar a la Tierra, la información espectral de la luz que viene desde el planeta se necesita con el objetivo de estudiar su atmósfera. En este caso, se requiere una banda espectral ancha.

Para polarizadores perfectos y láminas de onda exactamente idénticas, no hay presentes factores en la condición de anulación en la (Ecuación 11) que limiten la banda espectral, de esa manera una alta relación de rechazo en una banda espectral infinitamente ancha no es impensable. Sin embargo, en la práctica, esto no es válido dado que los polarizadores y las láminas de onda no son perfectos y están limitados espectralmente. Además, como se explicará adicionalmente más adelante en la presente, la respuesta del interferómetro no es la misma para todas las longitudes de onda, o sea, la intensidad detectada depende de la longitud de onda.

Si están presentes idénticas láminas de onda para cada haz, la intensidad detectada será proporcional a

$$I \propto |T_r - T_\alpha|^2 \quad \text{(Ecuación 20)}$$

independientemente de las diferencias de longitud de los caminos ópticos entre los haces. La intensidad para la interferencia constructiva es también entonces proporcional a la Ec. (16), la cual, en el caso de una lámina de onda perfecta es proporcional a

$$I \propto |1 - \exp(i\Delta\varphi)|^2 = 4 \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2} \quad \text{(Ecuación 21)}$$

donde  $\Delta\phi$  es la diferencia de fase entre los dos estados de polarización inducidos por la lámina de onda. Además, si se consideran láminas de onda convencionales (en oposición a las láminas de onda acromáticas), se satisface la siguiente relación:

5 
$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e(\lambda) - n_o(\lambda))d = \frac{2\pi}{\lambda} B(\lambda) \quad \text{(Ecuación 22)}$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $n_e(\lambda)$  y  $n_o(\lambda)$  son los índices de refracción extraordinario y ordinario,  $d$  es el grosor y  $B(\lambda)$  es la birrefringencia de la lámina de onda.

10 La intensidad es máxima entonces para  $\Delta\phi = (2n + 1) \pi$  (lámina de media onda) e igual a cero para  $\Delta\phi = 2n \pi$ , donde  $n$  es un entero. Esto muestra que algunas longitudes de onda se transmitirán bien, mientras que otras no se transmitirán en absoluto.

15 Un criterio para definir una banda espectral aceptable es entonces que todas las longitudes de onda se transmitan con al menos la mitad de la intensidad máxima, lo cual conduce a la siguiente condición

$$(4n + 1) \frac{\pi}{2} \leq \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} B(\lambda) \leq (4n + 3) \frac{\pi}{2} \quad \text{(Ecuación 23)}$$

20 Aquí se asume que la birrefringencia es constante en la banda espectral, lo cual, especialmente en el ejemplo del cuarzo, no afecta drásticamente el criterio (ver la Figura 7). Además, la birrefringencia se selecciona de tal manera que la lámina de onda es una lámina de media onda para la longitud de onda  $\lambda$ . La siguiente relación se satisface entonces:

25 
$$B = (2n + 1) \frac{\lambda_0}{2} \quad \text{(Ecuación 24)}$$

Las longitudes de onda mínima y máxima en la banda espectral aceptable se dan entonces por

30 
$$\lambda_{mín} = \frac{(4n+2)}{4n+3} \lambda_0 \text{ y } \lambda_{máx} = \frac{(4n+2)}{4n+1} \lambda_0 \quad \text{(Ecuación 25)}$$

Un ancho de banda se califica al definir

35 
$$M = \frac{\lambda_{máx}}{\lambda_{mín}} = \frac{(4n+3)}{4n+1} \quad \text{(Ecuación 26)}$$

40 Se ve que el ancho de banda es máximo si se usan láminas de onda de orden cero ( $n = 0$ ) que equivalen a  $M = 3$ . Por ejemplo, en la región de infrarrojos, esta técnica permitiría trabajar en 6 a 18  $\mu\text{m}$ . La banda espectral se limitará entonces probablemente por los polarizadores. Obviamente, la banda espectral aceptable puede ser más ancha si se usan láminas de onda acromáticas (ver la Figura 7). En la Figura 7 se muestra una respuesta espectral en el caso de láminas de onda de cuarzo (líneas de trazos y puntos) y de las láminas de onda de birrefringencia constante (líneas continuas). También se comparan láminas de onda de orden cero, de primer orden y de segundo orden. La línea continua representa la respuesta espectral en el caso de una lámina de onda acromática hecha de cuarzo y fluoruro de magnesio.

45

5 Aunque la invención se ha descrito con referencia a las modalidades ilustrativas, estas sirven solo por propósitos ilustrativos y la invención no se limita a las mismas, sino que abarca las variaciones y modificaciones que pueden lograrse por los expertos que lleven a la práctica la invención. Tales modificaciones podrían equivaler a configuraciones de telescopios de más de tres haces, u otras estructuras de variación de la polarización, posiblemente, con el uso de estructuras de variación de la rotación predeterminada que utilizan espejos. Estas y otras modificaciones se considera que caen dentro del alcance de la invención, como se reivindica en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

- 5
1. Un sistema óptico (1) para proporcionar interferencia destructiva sobre un eje (2) de la luz recibida desde un objeto (3) a lo largo de un eje predeterminado del sistema óptico (4), que comprende:
- una estructura óptica de recepción y de guiado (6) para recibir y guiar al menos tres haces (7) de la luz recibida desde dicho objeto (3), la estructura óptica de recepción y de guiado (6) se dispone para proporcionar una diferencia relativa del camino óptico entre los al menos tres haces (7); y
- 10 una estructura óptica de combinación (9) para combinar los al menos tres haces (7), **caracterizada porque** el sistema óptico (1) comprende, además, una estructura óptica de variación de la polarización (10) dispuesta entre la estructura óptica de recepción y de guiado (6) y la estructura óptica de combinación (9), y se construye para variar un estado de polarización de los haces (7) unos con respecto a los otros para tener un estado de polarización mutuamente diferente con el objetivo de proporcionar interferencia destructiva sobre un eje (2).
- 15
2. El sistema óptico (1) de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la estructura óptica de variación de la polarización (9) comprende, para cada haz luminoso recibido, idénticos elementos de variación de la polarización (12).
- 20
3. El sistema óptico (1) de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en donde se proporciona una estructura de filtro de prepolarización para proporcionar una polarización predeterminada a los haces antes de variar el estado de polarización de los haces en la estructura óptica de variación de la polarización (9).
- 25
4. El sistema óptico de acuerdo con la reivindicación 3, en donde la estructura de filtro de prepolarización es una estructura de filtro lineal que proporciona una polarización lineal.
5. El sistema óptico de acuerdo con la reivindicación 3 o 4, en donde la estructura de filtro de prepolarización comprende un divisor del haz por polarización.
- 30
6. El sistema óptico de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la estructura óptica de variación de la polarización (9) comprende, para cada haz luminoso recibido, una lámina de onda (12) o un rotador de pupila, para variar el estado de polarización del haz luminoso recibido.
- 35
7. El sistema óptico de acuerdo con la reivindicación 6, en donde un eje óptico de cada una de las láminas de onda (12) se dispone transversal a una dirección de propagación de la luz y en donde el eje óptico de las respectivas láminas de onda se dispone que tenga un ángulo predeterminado uno con respecto a los otros.
- 40
8. El sistema óptico (1) de acuerdo con la reivindicación 7, en donde los ángulos entre los ejes ópticos son iguales.
9. El sistema óptico (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 6 a la 8, en donde la lámina de onda (12) es una lámina de onda acromática (12).
- 45
10. El sistema óptico (1) de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la estructura óptica de variación de la polarización (9) se dispone para proporcionar modulación.
11. El sistema óptico (1) de acuerdo con la reivindicación 10, en donde la modulación se proporciona mediante una combinación ponderada de los al menos tres haces que tienen un estado de polarización variado.
- 50
12. El sistema óptico (1) de acuerdo con la reivindicación 11 en donde el peso de los al menos tres haces se proporciona mediante el cambio de la orientación de la estructura óptica de rotación de la polarización respecto a una estructura de filtro por pospolarización.
- 55
13. El sistema óptico (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde se proporciona una estructura de filtro por pospolarización para proporcionar el filtrado por polarización de al menos los tres haces combinados que tienen un estado de polarización variado.
- 60
14. Un método para proporcionar interferencia destructiva sobre un eje (2) de la luz recibida desde un objeto (3) a lo largo de un eje predeterminado del sistema óptico (4), que comprende:
- recibir y guiar al menos tres haces (7) de la luz recibida desde dicho objeto (3)
- proporcionar una diferencia relativa del camino óptico entre los al menos tres haces (7);

variar un estado de polarización de los haces (7) unos con respecto a los otros; y combinar los al menos tres haces con el objetivo de proporcionar interferencia destructiva sobre un eje (2).

Figura 1

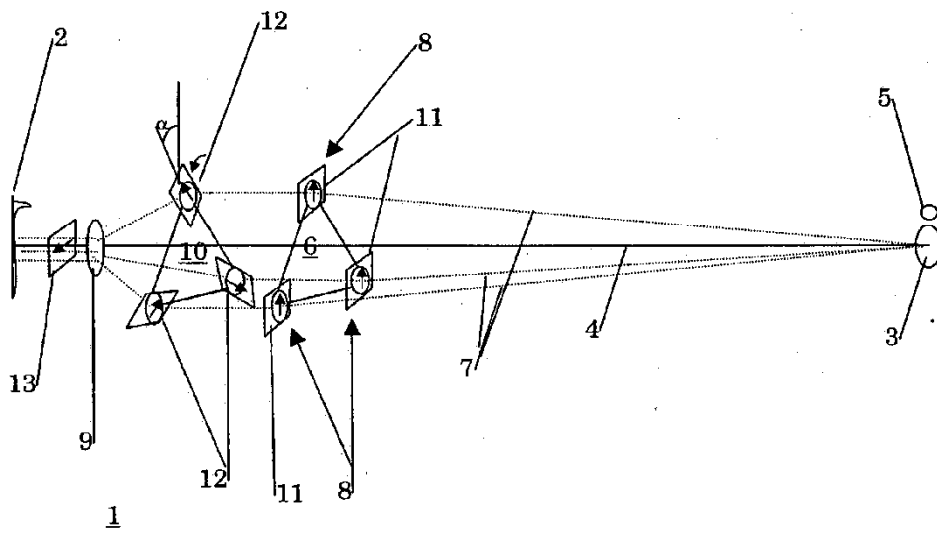


Figura 2

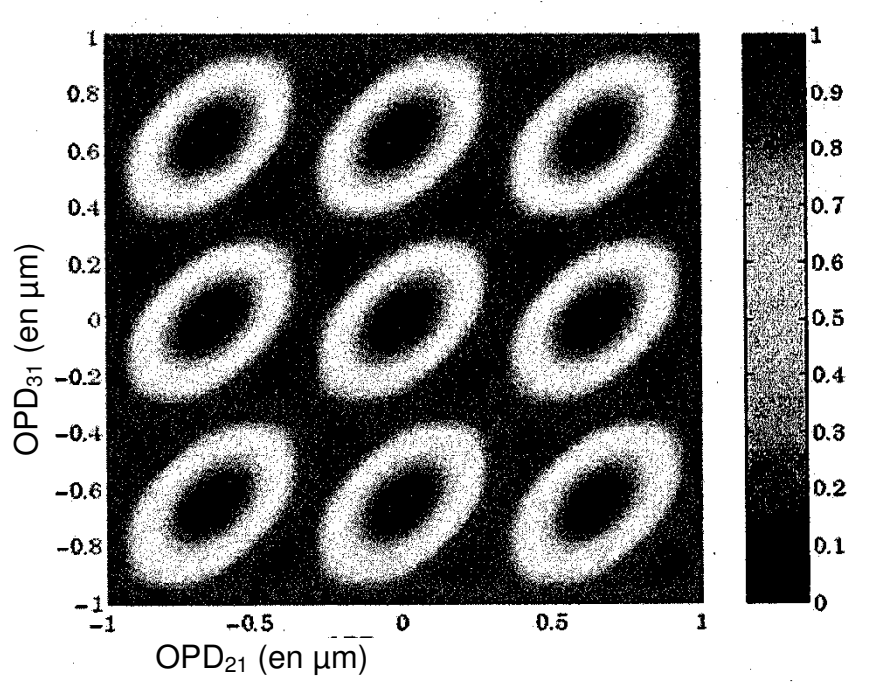


Figura 3

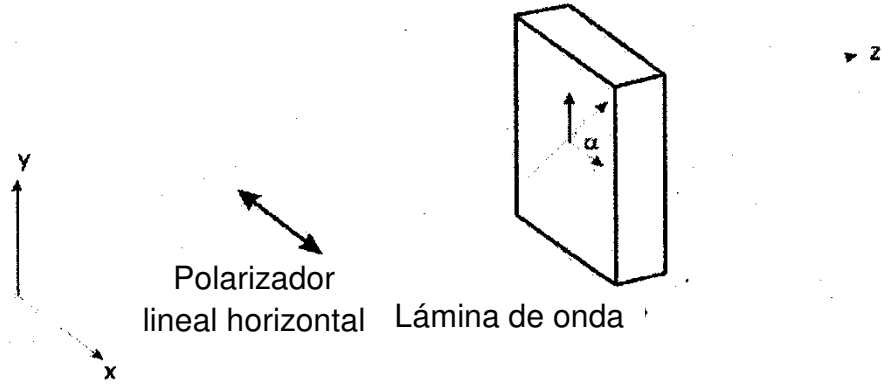




Figura 4

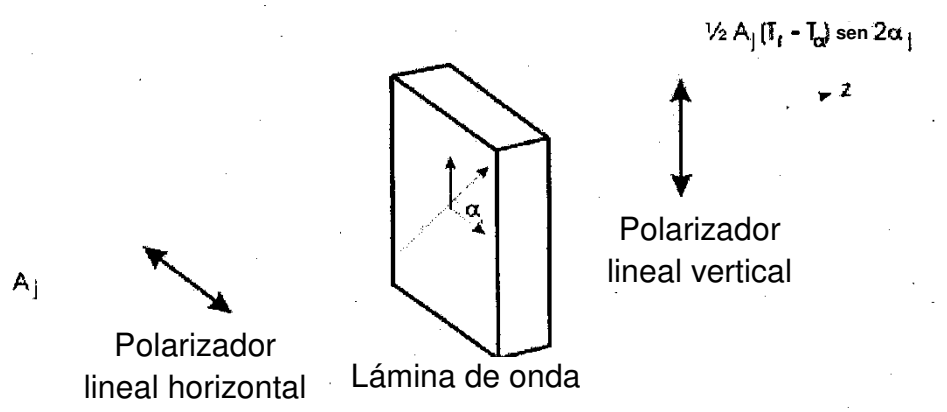


Figura 5

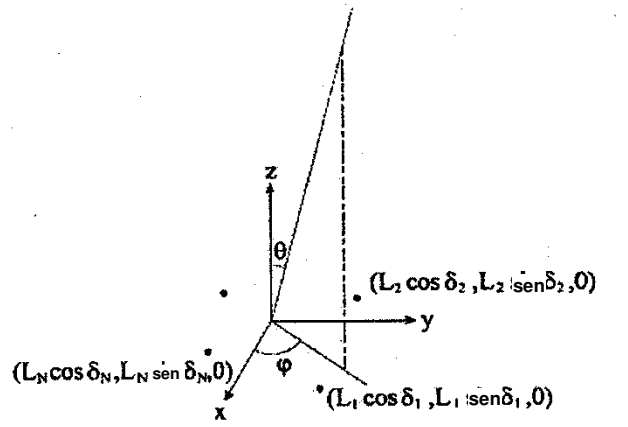
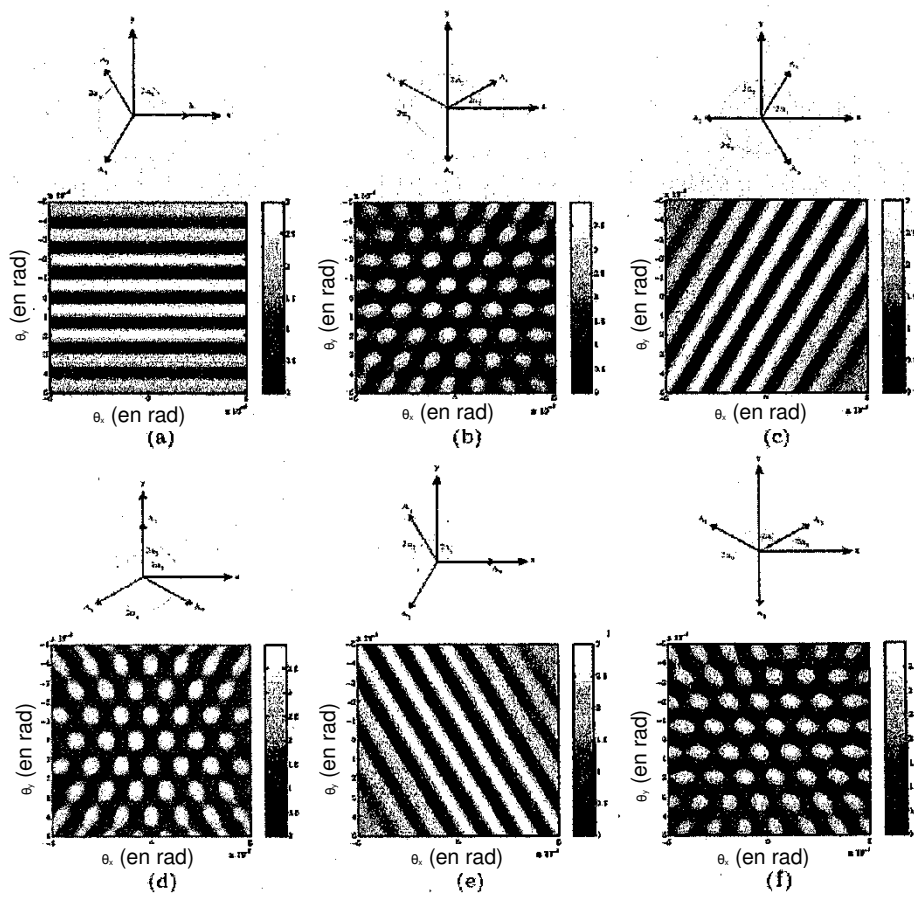


Figura 6



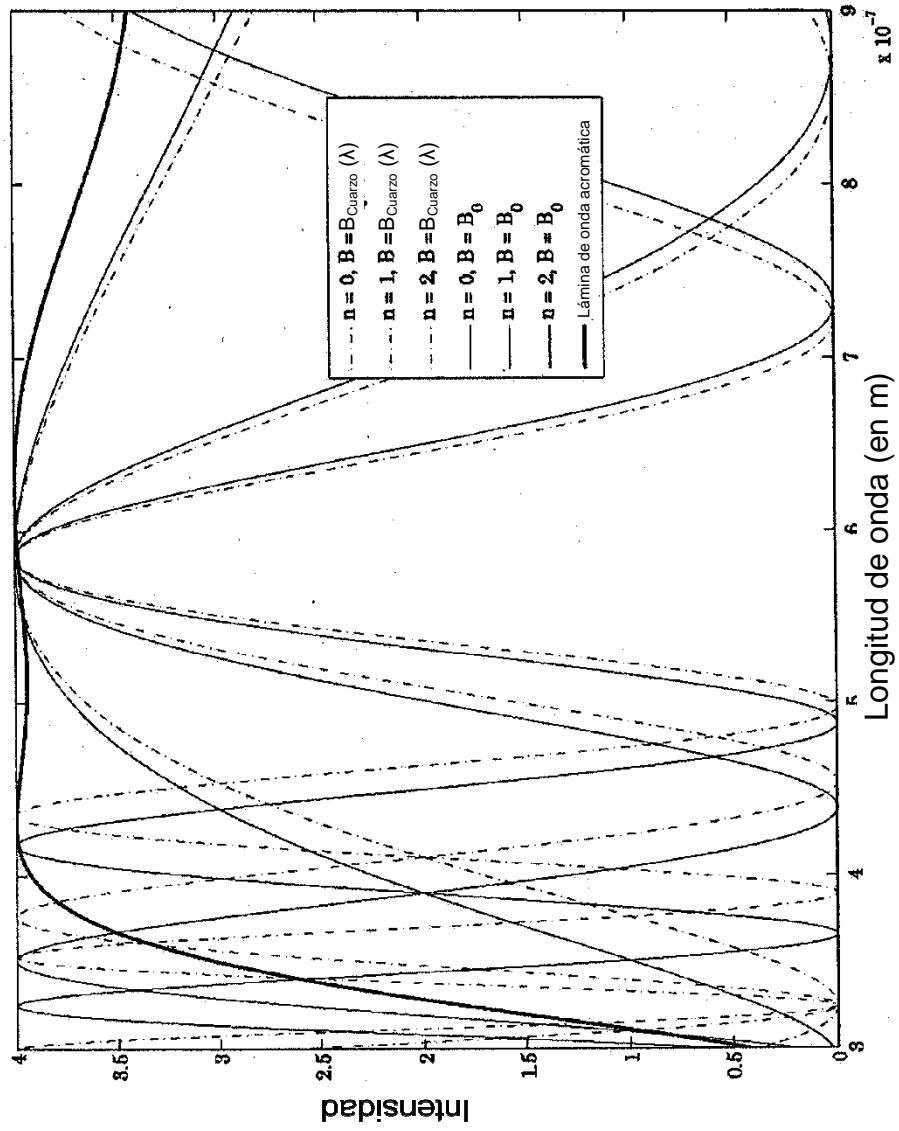


Figura 7