

PROCESADO OPTICO DE DATOS Y SU APLICACION A GEOFISICA

J. R. de XAMMAR ORO, H. FALCOZ y J. F. WESTERKAMP
Departamento de Física - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la
Universidad Nacional de Buenos Aires

Se presentan los fundamentos del método de computación óptica y se muestran los resultados obtenidos con un sistema óptico preparado al efecto, que utiliza luz laser coherente, el cual se aplica al filtrado de datos sísmicos y fotografías espaciales.

The basis of a method of optical computation are presented, and the results obtained with an optical system especially prepared that uses coherent light from a laser are given, applied to seismic data and spacial pictures.

1. INTRODUCCION

Habitualmente cuando se habla de computación, uno se refiere a la electrónica. Sin embargo, en la última década se ha desarrollado una nueva técnica para procesar la información, el "procesado óptico".

Si bien los principios básicos del procesado óptico datan del siglo pasado, la aplicación práctica de este nuevo sistema (computador óptico) es muy reciente.

La mayoría de las operaciones posibles de realizar pueden también ser hechas por los sistemas electrónicos, pero cuando la cantidad de datos a procesar es muy grande, las técnicas electrónicas demandan gran tiempo. Esta es una de las ventajas del computador óptico.

En las computadoras electrónicas se opera sobre señales que son funciones del tiempo. Por su parte en un computador óptico la señal de entrada es una función de la intensidad de luz que varía en un plano, es decir, una función espacial bidimensional y no es una intensidad de luz que varía como una función del tiempo. Por consiguiente realizar operaciones, tales como integración, derivación, etc. es instantáneo en el caso óptico, pues todos los datos de entrada se disponen simultáneamente. Las operaciones se hacen sobre las variables espaciales y no sobre el tiempo.

Otras de las ventajas del computador óptico es su flexibilidad. En efecto, la facilidad con que se pueden controlar los resultados da a la técnica ciertas ventajas sobre el método electrónico, en el cual mientras se efectúa una operación uno pierde contacto con la marcha del proceso.

Básicamente el computador óptico consiste de una fuente de luz altamente coherente y monocromática, capaz de iluminar totalmente un film transparente, el cual contiene la información a procesar. Un sistema óptico adecuado que descomponga la imagen fotográfica en sus frecuencias espaciales componentes de tal modo que permita variar el contenido espectral de la señal de entrada. Además debe poder reconstruir la imagen inicial para su observación visual y su posterior grabación sobre papel fotográfico.

2. PRINCIPIOS

La teoría óptica sobre la cual está basada la técnica del procesado óptico, es la relación entre la figura de difracción de Fraunhofer de una distribución bidimensional de amplitud de luz y la transformada de Fourier de esa función distribución, conjuntamente con la teoría de la formación de imágenes de Abbe por iluminación coherente.

Dado que las aberturas difractoras son grandes comparadas con la longitud de onda de la luz, entonces el fenómeno de difracción se hace independiente de la polarización de luz y por tanto es lícito utilizar la teoría electromagnética escalar para su tratamiento.

El fundamento físico de la difracción está en la teoría de Kirchhoff, la cual para el caso particular de difracción de Fraunhofer, nos dice que la distribución de puntos luminosos en el infinito es la transformada de Fourier de la distribución de amplitud de luz que hay sobre la abertura difractora. Si una lente es insertada de-

lante de tal abertura, el erecto será traer la figura de difracción desde el infinito al foco de la lente.

La expresión matemática es

$$(1) \quad U(\xi, \eta) = C_1 \iint_{-\infty}^{+\infty} F(x, y) e^{-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x\xi + y\eta)} dx dy$$

donde:

- $U(\xi, \eta)$ distribución de amplitud en el plano transformado.
- $F(x, y)$ distribución de amplitud en la abertura difractante.
- λ longitud de onda de la luz.
- f distancia focal de la lente.
- C_1 constante que da cuenta de la conservación de la energía.

Ahora, de acuerdo con la teoría de la reconstrucción de imágenes de Abbe, al considerar la transición desde el plano transformado al plano imagen, tendremos (por difracción de Fraunhofer en el plano focal):

$$(2) \quad V(x', y') = C_2 \iint_{-\infty}^{+\infty} U(\xi, \eta) e^{-ik(\frac{x'}{d}\xi + \frac{y'}{d}\eta)} d\xi d\eta$$

donde d es la distancia entre plano focal y plano imagen. Los límites infinitos en la integral nos indican que estamos suponiendo que todos los órdenes de difracción contribuyen a la reconstrucción de la imagen.

Reemplazando (1) en (2) queda:

$$(3) \quad V(x', y') = C_1 C_2 \iint_{-\infty}^{+\infty} \iint_{-\infty}^{+\infty} F(x, y) e^{-i\frac{k}{f}[(x + \frac{f}{d}x')\xi + (y + \frac{f}{d}y')\eta]} dx dy d\xi d\eta$$

De esta expresión se llega a que:

$$(4) \quad V(x', y') = C F(-\frac{f}{d}x', -\frac{f}{d}y')$$

dado que (x', y') es la imagen del punto (x, y) .

$$-\frac{f}{d}x' = x \qquad -\frac{f}{d}y' = y$$

por tanto:

$$(5) \quad V(x', y') = C F(x, y)$$

Esta expresión nos dice que la imagen es estrictamente similar al objeto (pero invertida), tanto en distribución de amplitud como de fase, salvo factor de aumento.

3. EL FILTRADO OPTICO

Toda vez que sea modificado el contenido espectral de una señal decimos que estamos realizando un filtrado espacial.

De acuerdo a la teoría de Abbe, sería posible con una disposición adecuada de lentes, obtener sucesivas transformadas de Fourier de alguna función espacial bidimensional.

Es importante destacar que en la teoría matemática de la transformada de Fourier, la transformada del dominio espacio al dominio frecuencia (espacial) requiere la función $e^{-i\omega x}$, y la antitransformada, por su parte, requiere la función conjugada $e^{i\omega x}$. Como hemos visto en la ecuación (1) una lente introduce la función:

$$(6) \quad e^{-i\frac{2\pi}{\lambda f} (x_n x_{n+1} + y_n y_{n+1})}$$

cuando pasamos de un plano P_n a otro P_{n+1} . Es decir, en un sistema óptico se toman solamente sucesivas transformadas y no transformadas seguidas de sus antitransformadas. El hecho de usar una función con falsa polaridad, puede salvarse con tomar coordenadas adecuadas en cada plano transformado y así ser consistente con la convención de Fourier.

Consideremos un sistema tal como el que sigue: (fig. 1).

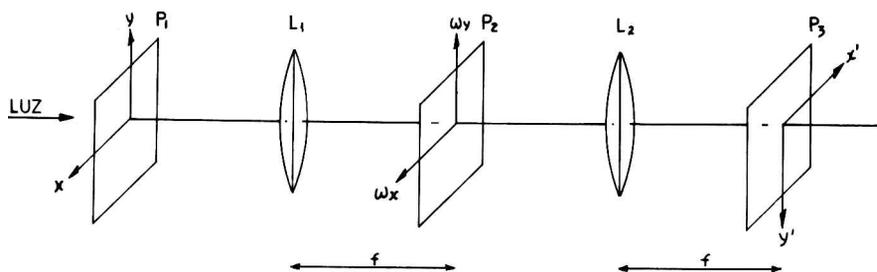


Figura 1

Si en el plano de entrada P_1 se coloca un transparente tal que la amplitud en el espacio (x, y) sea $F(x, y)$, entonces en el plano P_2 aparecerá el espectro $F(\omega_x, \omega_y) = F[F(x, y)]$. Si en este mismo plano P_2 ponemos otro transparente $R(\omega_x, \omega_y)$ este modificará el contenido espectral de la entrada y la amplitud total será:

$$(7) \quad V(\omega_x, \omega_y) = F(\omega_x, \omega_y) \cdot R(\omega_x, \omega_y)$$

En general, el transparente tendrá una función transmisión de amplitud compleja $R = |R|e^{i\varphi}$.

La amplitud se modifica variando el coeficiente de absorción del transparente y la fase variando el camino óptico.

En el plano P_3 , la señal es nuevamente transformada al dominio espacial y es dada por:

$$(8) \quad V(x',y') = F[V(\omega_x,\omega_y)] = F[F(\omega_x,\omega_y) \cdot R(\omega_x,\omega_y)]$$

Todo transparente que sea puesto en el plano transformado, plano P_2 , operando directamente sobre el espectro de frecuencias es llamado un filtro espacial. Pero debe tenerse en cuenta que éstos no deben perturbar el orden cero de interferencia por el hecho de que tal orden lleve información sobre todas las frecuencias de la señal de entrada.

Dado que se tiene el control de amplitud y fase, los filtros se pueden agrupar en tres categorías según sea su función transmisión.

- 1) $R(\omega_x,\omega_y) = A(\omega_x,\omega_y)$ transparente de amplitud variable y retardo uniforme en fase.
- 2) $R(\omega_x,\omega_y) = A e^{i\varphi(\omega_x,\omega_y)}$ $A = \text{cte.}$ Amplitud uniforme y retardo en fase. $\varphi(\omega_x,\omega_y)$
- 3) $R(\omega_x,\omega_y) = A(\omega_x,\omega_y) e^{i\varphi(\omega_x,\omega_y)}$ El producto de los dos casos anteriores.

4. EL PLANO TRANSFORMADO

El dato de entrada se comporta, para el rayo de luz incidente, como una superposición de infinitas redes de difracción elemental las cuales tienen distintas frecuencias e inclinaciones.

Para cada una de tales redes la figura de difracción consiste de puntos luminosos, ubicados en una recta perpendicular a las ranuras de la red y la separación entre ellos es inversamente proporcional a la separación de dichas ranuras, o lo que es lo mismo, directamente proporcional a la frecuencia espacial de la red.

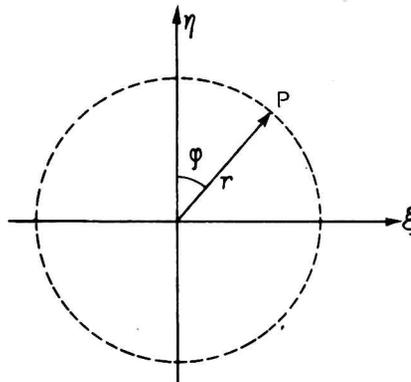


Figura 2

Es de notar entonces, que la figura de difracción de una señal grabada sobre un transparente, consistirá de un conjunto de puntos luminosos tales que todos los pertenecientes a una recta que pasa por el origen de coordenadas corresponden a todas las redes elementales que son perpendiculares a aquella dirección. Además todos los puntos que se encuentran a igual distancia del centro tienen la misma frecuencia, o sea, corresponden a todas las redes que tienen aquella frecuencia, independiente de sus inclinaciones.

Un punto P del plano transformado corresponde a una frecuencia espacial proporcional a r y a una inclinación φ .

Es evidente que la fuente de luz a utilizar debe ser altamente coherente y monocromática para obtener así un patrón de difracción lo suficientemente nítido como para que permita realizar un buen procesado.

5. RANGO DE OPERACION EN FRECUENCIA DEL SISTEMA

La transmisión de alta y baja frecuencia está limitada por: a) resolución del film fotográfico y del sistema óptico, b) ruido óptico de baja frecuencia, respectivamente.

La frecuencia máxima a transmitir por el sistema óptico viene dada por

$$V_{\max} = \frac{B - A}{\lambda f}$$

donde: B diámetro de la lente transformadora.

A diámetro de la abertura objeto.

6. APLICACION PRACTICADA DEL PROCESADO OPTICO

Este método fue ensayado por los autores en aplicaciones geofísicas (análisis y filtrados de registros sísmicos obtenidos en la exploración geofísica de petróleo y en fotografías tomadas desde satélites meteorológicos).

Los registros utilizados eran de sísmica de reflexión los cuales fueron reducidos a transparentes de 35mm para ser presentados como dato de entrada al computador óptico.

En el registro las señales de interés son las componentes verticales de las ondas longitudinales (ondas P) que fueron reflejadas por las distintas interfases geológicas. Pero es evidente que en el registro también se tendrán señales extrañas. Estas señales se califican en general como ruidos. El problema es entonces discriminar entre el ruido y las señales de interés en las secciones. Entre los tipos más comunes de ruidos tenemos:

- a) Ondas superficiales (L)
 - baja frecuencia (menor que la P)
 - baja velocidad (muchas inclinaciones)
- b) Ondas transversales (S)
 - baja frecuencia (menor que la P pero mayor que la L)
 - baja velocidad (Inclinación mayor que la P)

c) Reflexiones múltiples

frecuencia igual a la de interés

inclinación doble, triple, etc. a la de interés, por recorrer doble, triple, etc. camino.

d) Ondas aéreas

alta frecuencia

baja velocidad (mucho inclinación)

e) Viento

alta frecuencia

f) Difracción

son debidas a fallas o cambios bruscos en el buzamiento de las capas geológicas; entonces el ruido aparece como muchos frentes de ondas viajando en distintas direcciones.

La frecuencia de los eventos en un registro sísmico se expresan en términos de intervalo de tiempos entre picos, siendo los recíprocos de tales intervalos, la frecuencia en ciclos por segundo.

Esta frecuencia se mide en la dirección del canal, que siempre es vertical, sea horizontal o buzante el evento. Por su parte, la frecuencia espacial, que es la única variable significativa para el análisis óptico, debe medirse a lo largo de una perpendicular a las líneas observadas sobre la sección. (Fig. 3).

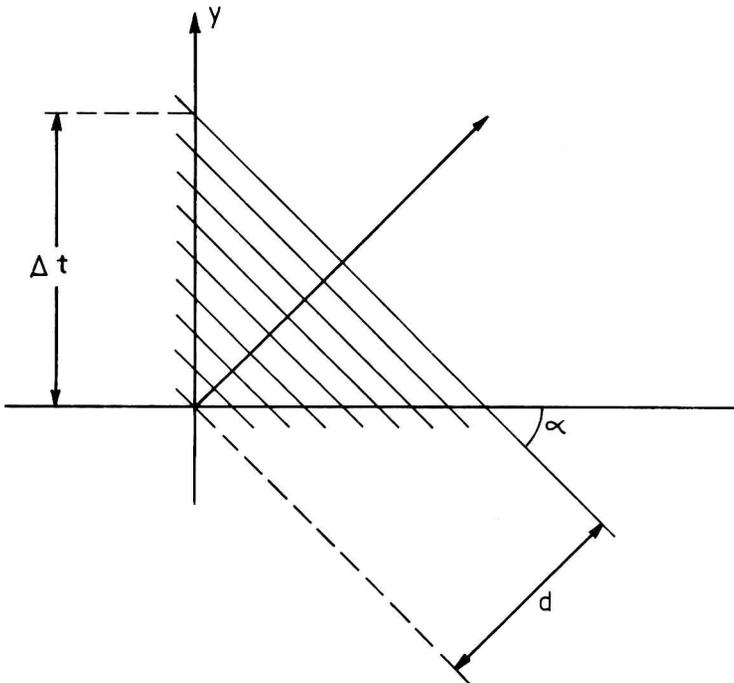


Figura 3

Del gráfico sacamos:

$$d = \Delta t \cos \alpha$$

Entonces:

$$\frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{d} \cos \alpha$$

pero las inversas de Δt y d son las frecuencias temporales y espaciales respectivamente

$$(9) \quad \nu_t = \nu_e \cos \alpha$$

Vemos que la frecuencia espacial es proporcional a la temporal; la constante de proporcionalidad depende del ángulo de inclinación.

Si observamos el plano transformado notamos que todos los puntos que están sobre una recta perpendicular (AB) a la dirección de los canales, corresponden a una misma frecuencia temporal, mientras que a todos los puntos equidistantes del centro le corresponden igual frecuencia espacial. (Fig. 4).

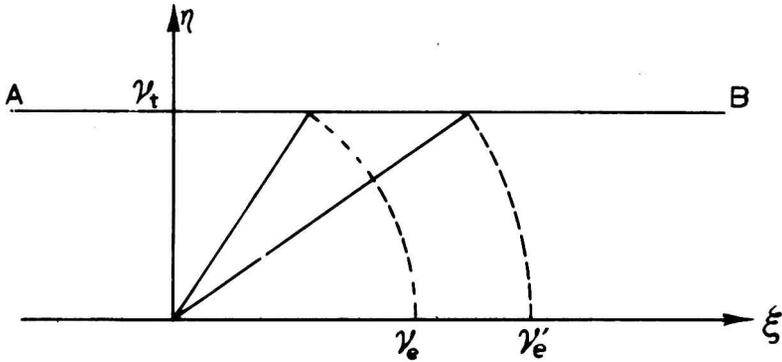
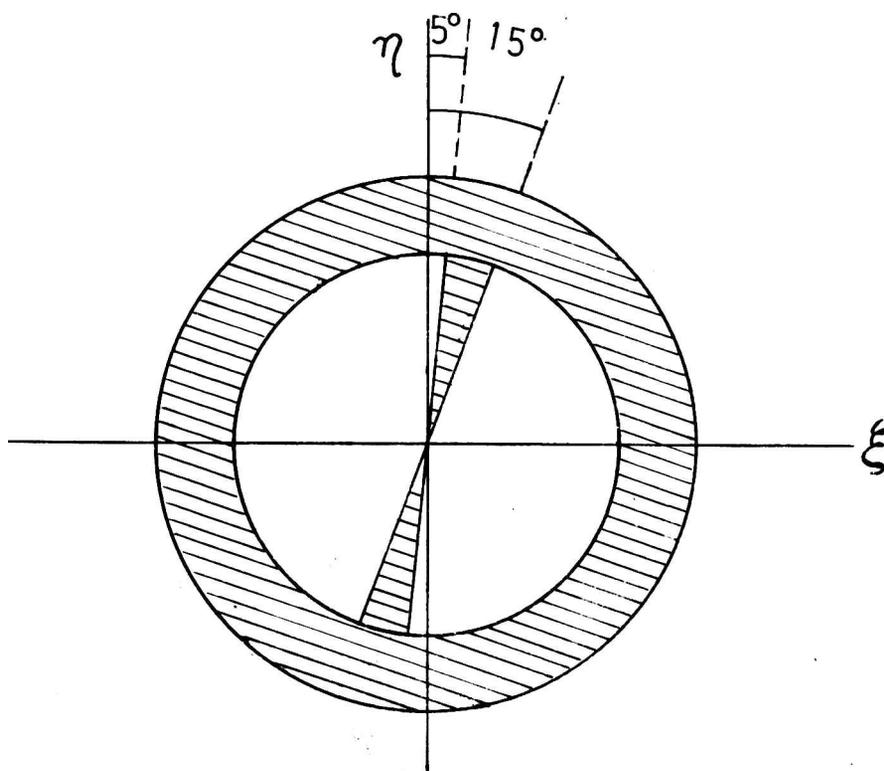


Figura 4

Como lo interesante es eliminar frecuencias temporales y no espaciales, un filtro adecuado para tal operación puede ser construido con hojas metálicas opacas de bordes rectos horizontales, tal que tenga la siguiente función transmisión:

$$R(\omega_x, \omega_y) = \begin{cases} 1 & \text{si } \omega_x, \omega_y \text{ son frecuencias de interés} \\ 0 & \text{si no.} \end{cases}$$

Como ya se ha explicado al tratar los ruidos presentes en una sección sísmica, en la misma puede haber eventos con inclinaciones que interfieren a la de interés, por tanto, se hace necesario filtrar tales inclinaciones. Por ejemplo, si se considera que los eventos con inclinaciones entre 5° y 15° no se deben a reflexiones primarias, debemos insertar en el plano transformado un filtro en forma de cuña con borde recto como se ve en la siguiente figura. (Fig. 5).



5

Como hemos mencionado, otra de las aplicaciones realizadas, fue el mejoramiento de fotos tomadas por satélites meteorológicos. Se trató una fotografía que presentaba ruidos provocados por perturbaciones atmosféricas y señales de interferencia en la recepción.

En las fotografías que se muestran en la página siguiente podemos observar los resultados obtenidos en la aplicación de procesamiento óptico en muestras sísmicas.

La **a** nos muestra la sección original (sin procesar) y su correspondiente transformada de Fourier. En ella se ve, principalmente en la zona inferior, ruido de difracción.

En **b** se utilizó filtros de baja y alta frecuencia que eliminaban entre 5 y 15

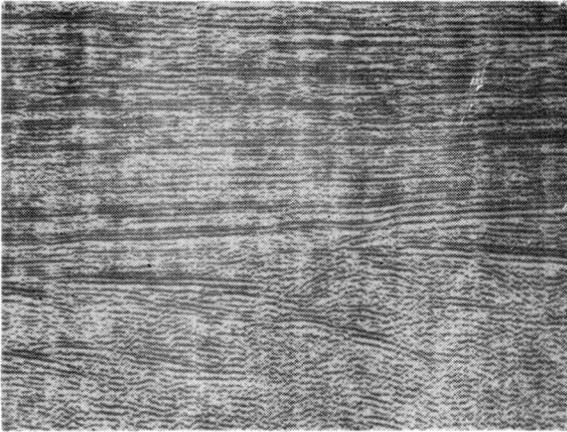


Figura (a)

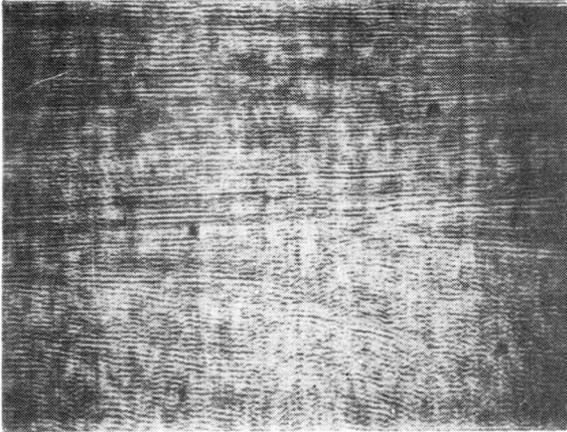
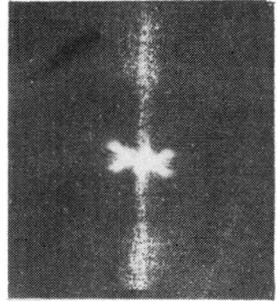


Figura (b)

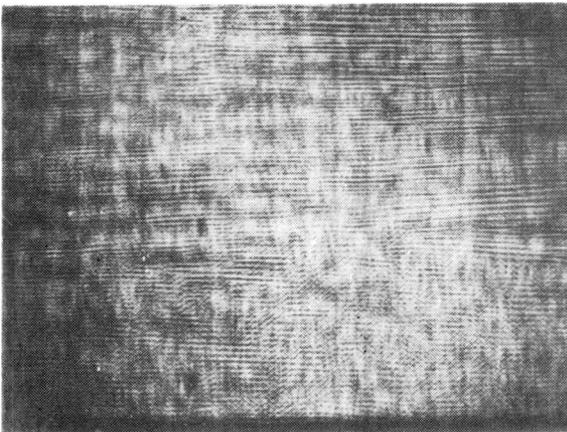
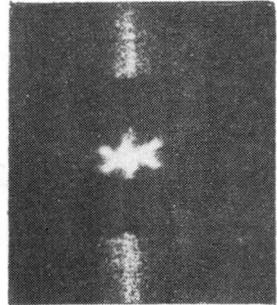
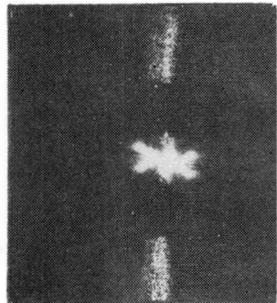


Figura (c)



ciclos por segundo y arriba de 40 ciclos por segundo respectivamente, ésto dio como resultado una atenuación de los eventos de difracción.

En c se han eliminado además inclinaciones entre 5 y 15 grados, tanto de izquierda como de derecha, lo que se manifiesta en una mayor continuidad.

7. ESQUEMA DEL EQUIPO

Un esquema del equipo utilizado en las aplicaciones anteriormente citadas es el que muestra la figura 6.

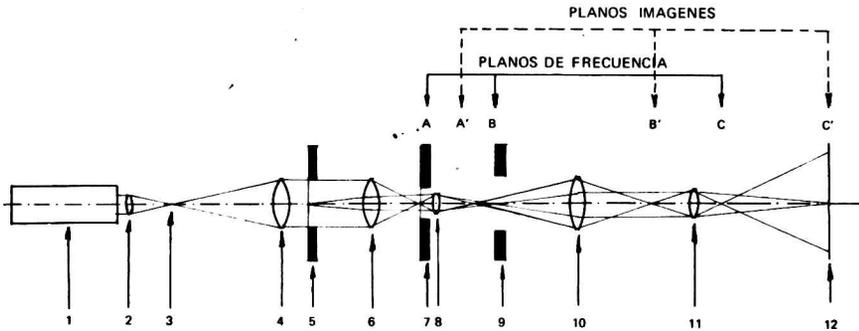


Figura 6: 1. Fuente de luz (laser). 2. Lente agrandadora del haz. 3. Filtro espacial, a los efectos de eliminar las variaciones en la amplitud del haz. 4. Lente colimadora. 5. Plano de entrada. A los efectos de eliminar desfases introducidos por variaciones en el espesor de la película fotográfica se hace necesario cementar el film con aceite de índice de refracción igual al de la base de la película, entre dos placas ópticamente pulidas. 6. Lente transformadora. 7. Plano transformado. 8. Lente agrandadora de la transformada. 9. Plano transformado. 10. Lente reconstructora de la imagen. 11. Lente agrandadora de la imagen. 12. Pantalla donde se proyecta la imagen final.

BIBLIOGRAFIA

- AUSLEY, D.A.: "Photo Enhancement by Spatial Filtering". *Electro-optical Systems Design*, p. 26-34, julio-agosto 1969.
- BORN, M. y WOLF, E.: "Principles of Optics". Macmillan, N.Y., USA, 2a. Ed., 1964.

- CUTRONS, J.; LEITH, E.N.; PALERMO, C.J. y PORCELLO, L.J.:** "Optical Data, Processing and Filtering Systems". *IRE Transactions (Information Theory)*, p. 386-400, junio 1960.
- DOBRIN, M.G., INGALLS, A.L. y LONG, J.A.:** "Velocity and Frequency Filtering of seismic Data using Laser Light". *Geophysics*, 30, 1144-1178, 1965.
- DOBRIN, M.B.:** "Optical Processing in the Earth Sciences". *IEEE Spectrum*, p. 59-66, setiembre 1968.
- HORNER, J.L.:** "Do Computations at the speed of light". *Electronics Design*, 23, 60-68, Niv. 1968.
- O'NEILL, L.:** "Introduction to Statistical Optics". Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass. USA, 1963.
- VANDER INGT, A.:** "Signal Detection by Complex Spatial Filtering". *IEEE Transactions (Information Theory)*, p. 139-145, 1964.
- XAMMAR ORO, J.R. de; FALCOZ H. y WESTERKAMP, J.F.:** "Procesado óptico de datos utilizando luz laser". *Anales de la Sociedad Científica Argentina*, Tomo CXCII, pág. 13-31, julio-agosto 1971, Buenos Aires.

En el trabajo citado en último lugar, los autores explican además otras aplicaciones del computador óptico y resumen brevemente otro método de filtrado basado en la deconvolución.