

FILTRADO ESPACIAL EN LA RECONSTRUCCIÓN DE HOLOGRAMAS DE VOLUMEN

N. Bolognini*, L. Solymar**, L. Arizmendi López***

Departamento de Física de Materiales C-IV, Universidad Autónoma de Madrid
28049 Madrid, España.

Es bien conocida la gran selectividad angular que presentan los hologramas de volumen. En este trabajo se presenta un filtrado espacial que depende del arreglo de reconstrucción; se realiza mediante el haz objeto no modulado y se origina un desajuste en la condición de Bragg. Este desajuste se evalúa mediante un parámetro que depende de la magnitud y dirección de las frecuencias espaciales del objeto. La eficiencia de difracción depende de dicho parámetro y produce así un filtrado espacial en términos del desajuste generado en la reconstrucción. Se presentan resultados experimentales.

It is well known that volume holograms exhibit high angular selectivity. In this paper a spatial frequency filtering; which depends on the holographic reconstruction mechanism employed is demonstrated. When reconstruction is done by the object beam a mismatch in the Bragg condition for the first order induced gratings appears. In order to evaluate that mismatch an off-Bragg parameter is introduced. It depends on the magnitude and direction of the spatial frequencies of the input transparency. This behavior produces spatial frequencies filtering at the output, as it is found in the experiments.

I. INTRODUCCIÓN

Los hologramas de volumen se caracterizan por su gran selectividad angular y cromática en la etapa de reconstrucción.¹

En este trabajo se analiza cómo depende la fidelidad de la imagen reconstruida de la dirección de las frecuencias espaciales, que sintetizan la imagen. Este análisis y los resultados obtenidos permiten implementar un filtrado espacial que depende de la dirección mencionada. El medio de registro empleado es un cristal fotorrefractivo caracterizado por una alta sensibilidad y resolución espacial, así como una gran capacidad de almacenamiento.²

II. DESARROLLO OPERATIVO

En el desarrollo de la experiencia dos fuentes de onda coherentes, el haz objeto (1) y el haz de referencia (2) interfieren en el volumen del cristal, según se muestra en la Fig. 1. Estos frentes son planos y los representan sus respectivos vectores de

onda \vec{k}_1 (objeto) y \vec{k}_2 (referencia). La distribución de intensidad que producen dentro del medio de registro (un cristal de BSO) genera mediante el efecto fotorrefractivo una red holográfica³, cuyo vector de onda es \vec{K}_0 , materializada en una variación de índice de refracción del cristal.

Al ubicar en el haz objeto una transparencia de una única frecuencia espacial de periodo Λ representado por el vector de onda \vec{K} ($K=2\pi/\Lambda$), el frente de onda que se obtiene interfiere con el haz de referencia y se producen en el medio de registro tres redes holográficas, cuyos respectivos vectores de onda son \vec{K}_0 , $\vec{K}_0 + \vec{K}$ y $\vec{K}_0 - \vec{K}$.

La reconstrucción se realiza con un frente de onda plano, conjugado respecto al haz de referencia, como se muestra en la Fig. 1. Esta configuración cumple la condición de Bragg para cada una de las redes registradas que componen el holograma de la transparencia y ésta es correctamente reproducida. Esta situación se muestra en la Fig. 2. Los vectores \vec{B}_1 , \vec{k}_1 y \vec{B}_2 sintetizan la imagen reconstruida de la transparencia. Dichos vectores representan los frentes de onda obtenidos por la difracción del haz

* Centro de investigaciones ópticas, Argentina

** Universidad de Oxford, Inglaterra

*** Universidad Autónoma de Madrid, España

de reconstrucción en las redes $\vec{K}_0 - \vec{K}$, \vec{K}_0 y $\vec{K}_0 + \vec{K}$ respectivamente y tienen sus extremos en el círculo de Ewald. Esto asegura una correcta reconstrucción de la transparencia.

Considérese la situación en la cual la transparencia objeto se coloca en el haz de referencia y se mantiene la configuración de reconstrucción del caso anterior, es decir el mostrado en la Fig. 1. En este caso el haz de reconstrucción no cumplirá la condición de Bragg para las redes que componen el holograma de la transparencia y la reproducción de la misma no será fidedigna. La Fig. 3 muestra esta situación. Los vectores \vec{A}_1 , \vec{k}_2 y \vec{A}_2 representan los frentes de onda difractados que sintetizan la imagen reconstruida. Puede observarse que los vectores \vec{A}_1 y \vec{A}_2 no tiene sus extremos en el círculo de Ewald. Esta discrepancia representa una medida de la falta de reproducibilidad fidedigna en la reconstrucción del holograma. Por lo tanto una expresión de la distancia "off Bragg" ζ en términos de las condiciones geométricas de registro permitirá interpretar los resultados de la reconstrucción obtenida.

Debe calcularse entonces el valor del parámetro de "off Bragg" ζ , el cual deberá ser introducido en la expresión de la eficiencia de difracción η en la cual intervienen la constante de acoplamiento σ y el espesor d del medio de registro⁴:

$$\eta = M \text{sen}^2(Nd) \quad M = \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + \frac{\zeta^2}{4}} \quad N = \sqrt{\sigma^2 + \frac{\zeta^2}{4}} \quad (1)$$

Es evidente que se $\zeta \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 0$, la frecuencia espacial correspondiente no es reproducida.

Volviendo al cálculo de ζ , puede verse respecto a las componentes de los vectores de la Fig. 3 que

$$k_1 = k_2 = k \quad ; \quad k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$$

Además el tratamiento es equivalente, ya sea si se considera \vec{A}_1 o \vec{A}_2 . Haciendo $A_1=A$ e imponiendo la condición:

$$k_y = A_y \quad ; \quad k_z = A_z \quad \text{resulta} \quad k_x^2 = k^2 - A_y^2 - A_z^2.$$

Así el parámetro ζ resulta:

$$\zeta = |A_x - k_x| = |k_{2x} - K_x - k_x|.$$

Considérese que en la representación de las Figs.

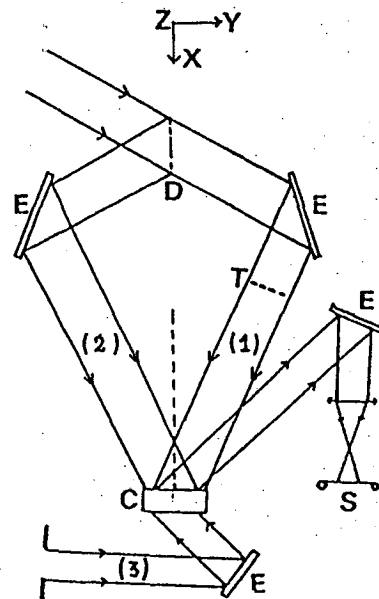


Fig. 1: Esquema experimental. (1): haz objeto; (2): haz de referencia; (3): haz de reconstrucción; E: espejo; D: divisor de haz; C: cristal fotorrefractivo BSO; T: transparencia; S: salida, imagen reconstruida.

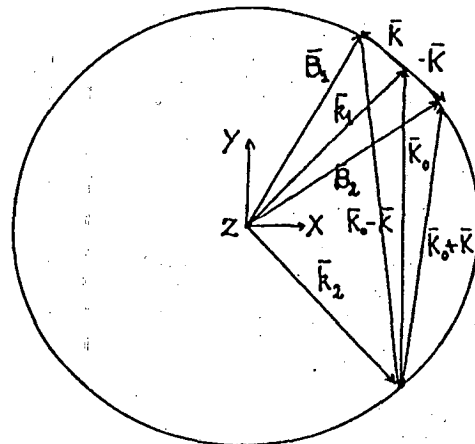


Fig. 2: Reconstrucción con la transparencia ubicada en el haz (1).

2 y 3 el vector \vec{K} ha sido dibujado desproporcionadamente largo (para favorecer la visualización del problema) respecto a los demás vectores representados.

Si además se tiene en cuenta que:

$K \ll K_0$; $K \ll k$; $k_{2x} \gg K$; $k_{2z} = 0$, la expresión para ζ es:

donde n es el índice de refracción del cristal fotorrefractivo para la longitud de onda λ_r de registro, λ_R es la longitud de onda de reconstrucción, ϕ representa el ángulo entre el eje z y el vector \vec{K} y θ es el semiángulo entre los haces que interfieren, es decir entre los vectores \vec{k}_1 y \vec{k}_2 . La expresión de $\zeta(\phi)$ se ha calculado para la frecuencia espacial K .

Es evidente de la expresión (2) que a medida que ϕ aumenta también lo hace ζ , lo que indica un deterioro en la reconstrucción. El análisis realizado para una única frecuencia espacial K con orientación ϕ , indica que en una transparencia sintetizada por diversas frecuencias, se produce un reconstrucción de las mismas con mayor o menor fidelidad, en términos de la orientación de cada frecuencia. Esto es equivalente a un filtrado espacial direccional.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se utiliza una única transparencia objeto para confirmar el efecto del filtrado espacial formada por circunferencias concéntricas y una frecuencia espacial radial constante. La Fig. 4 muestra la salida obtenida (imagen reconstruida) cuando la transparencia se ubica en el haz objeto (1). La Fig. 5 muestra la imagen reconstruida cuando la transparencia objeto se ubica en el haz de referencia (2). Al comparar ambas figuras es claro que se ha producido un efecto de filtrado direccional, la información correspondiente a las frecuencias espaciales de orientación, $0^\circ < \phi \leq 90^\circ$ se han perdido. Cabe mencionar que para obtener una réplica perfecta de la entrada en el proceso de reconstrucción, debería emplear la misma longitud de onda que en el proceso de

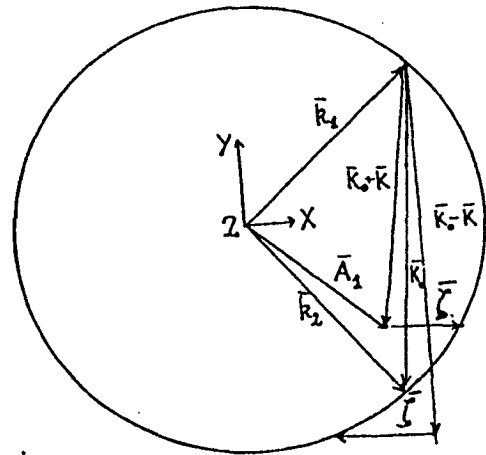


Fig. 3: Reconstrucción con la transparencia ubicada en el haz (2). El vector A_2 no ha sido representado.

registro. Sin embargo, cuando se utilizan cristales fotorrefractivos el proceso de reconstrucción es destructivo, se el holograma no está fijado y se emplea la misma longitud de onda que en el registro. Para evitar esta situación, y mantener la capacidad de realizar procesamiento en tiempo real, se reconstruyó con un haz de longitud de onda $\lambda_R = 633 \text{ nm}$. Esta situación experimental provocó una pérdida en la resolución próxima a los bordes verticales como puede apreciarse en las Figs. 4 y 5.



Fig. 4: Imagen reconstruida sin filtrar

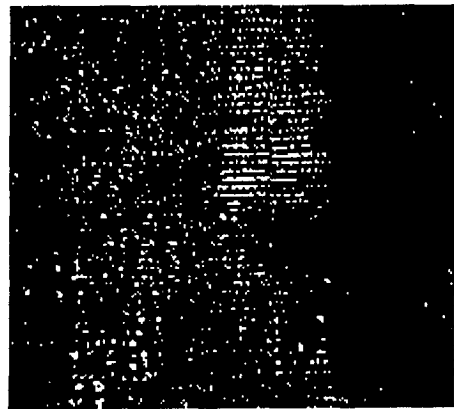


Fig. 5: Imagen reconstruida filtrada.

IV. CONCLUSIONES

En el caso clásico el filtrado se realiza colocando una máscara adecuada en el plano de Fourier⁵. Evidentemente el esquema carece de flexibilidad.

En el método propuesto es esta comunicación, la simple rotación de la transparencia objeto, ubicada en el haz de referencia, produce la operación de filtrado direccional a la salida.

El proceso de registro-reconstrucción filtrada es simultáneo y reciclable. Es decir, el simple cambio de transparencia filtrada por otra a procesar, permite obtener el nuevo resultado. Si se utilizan para los haces de registro intensidades del orden de los 10 milivatios la reconstrucción de la salida filtrada se obtiene en el orden de 20 meg. Por lo tanto, puede decirse que en muchas aplicaciones la operación es realizada en tiempo real.

Así, la alta selectividad espacial propia de la naturaleza de los hologramas de volumen, ha permitido implementar un método sencillo de filtrado espacial. Cabe acotar que el mismo método podría

llevarse a cabo en cualquier medio que sea eficiente para registrar hologramas de volumen.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por la C.I.C. y T. de España (proyecto MAT 92-0163). Uno de los autores (Nestor Bolognini) agradece al Ministerio de Educación y Ciencia de España el apoyo brindado mediante una estancia sabática.

REFERENCIAS

1. S. Fries, *Appl. Phys.* A55, 104 (1992).
2. J. P. Huignard, F. Micheron, *Appl. Phys. Lett.* 29, 591 (1976).
3. *Photorefractive Materials and their applications* I. Ed.: P. Gunter, J. P. Huignard, Springer, Vol. 61 (1988).
4. H. Kogelnik, *Bell Syst. Tech. J.* 48, 2909 (1969).
5. S. H. Lee, Ed. "*Optical Information Processing*". Springer (1981).