

HOMENAJE
AL PROFESOR

Justo Oliva

DEPARTAMENTO DE ÓPTICA
UNIVERSIDAD DE ALICANTE

1995

© Universidad de Alicante
Secretario de Publicaciones

Portada: Enrique. Gabinete de Diseño
Universidad de Alicante
Fotocomposición y edición:
Compobell, S.L. Murcia

I.S.B.N.: 84-7908-181-3
Depósito Legal: A-1151-1994

Impreso en España

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida en manera alguna o por ningún medio, ya sea eléctrico, químico, mecánico, óptico de grabación o de fotocopia, sin permiso previo del editor.

RUIDO EN HOLOGRAFÍA

A. Beléndez^(), L. Carretero, A. Fimia, R. Fuentes,
C. González, F. Mateos e I. Pascual*

Laboratorio de Óptica. Departamento I. de Óptica. Universidad de Alicante.

^(*) Departamento de Ingeniería de Sistemas y Comunicaciones. Universidad de Alicante.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace más de quince años el estudio de las distintas fuentes de ruido en Holografía ha sido una de las principales líneas de investigación del Laboratorio de Óptica de la Universidad de Alicante. Desde el primer artículo publicado sobre este tema por el Profesor Oliva [1] hasta nuestros días se han realizado muchos trabajos sobre el ruido en Holografía, consiguiéndose importantes mejoras en la calidad de las imágenes holográficas como consecuencia de la reducción e incluso eliminación de muchas de las fuentes de ruido presentes en la reconstrucción de los hologramas. El presente trabajo tiene como objetivo fundamental hacer una revisión de los logros que se han conseguido en el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Alicante relacionados con el estudio y minimización del ruido en Holografía, limitándose únicamente a los hologramas realizados utilizando la emulsión fotográfica como material de registro.

2. FUENTES DE RUIDO EN HOLOGRAFÍA

Cuando se analiza un holograma como un sistema que transforma una onda entrante (la onda de reconstrucción) en una onda saliente (la onda imagen), conviene estudiar la influencia que ejerce dicho sistema sobre las características de la onda saliente, cuantificando las perturbaciones que el sistema origina sobre la señal deseada. Todas las perturbaciones de carácter negativo que alteran la calidad óptica de la señal emergente reciben el nombre de ruido, el cual, en el caso de la Holografía, está íntimamente ligado con el material de registro utilizado en la fabricación del holograma.

A la hora de elegir un material de registro es necesario tener en cuenta una serie de factores como son la exposición necesaria para el registro del holograma, la sensibilidad, la resolución, la linealidad del registro, así como las posi-

bles fuentes de ruido, pues todos estos factores influyen de forma decisiva en el rendimiento en difracción y en la calidad de la imagen holográfica final. La mejora del rendimiento en difracción y la minimización del ruido son una parte importante de la investigación actual en Holografía. En este sentido, diversos autores han estudiado desde diferentes perspectivas, y de forma pormenorizada, cada uno de los factores que limitan la calidad de las imágenes holográficas. Se ha analizado el ruido debido a la coherencia de la luz usada tanto en el registro como en la reconstrucción, conocido como ruido de moteado [2]. En los primeros trabajos realizados sobre el ruido en Holografía se estudiaron los ruidos propios del material de registro, fundamentalmente de las emulsiones fotográficas, como son el ruido de difusión o «scattering» [3], fuertemente ligado a la estructura granular del medio de registro, y el ruido debido a las no linealidades en la respuesta del material frente a la exposición incidente [4]. A estas fuentes de ruido debidas al material de registro hay que añadir otro tipo particular de ruido íntimamente ligado a la naturaleza granular de la emulsión fotográfica: las redes de ruido [5]. Además de estas cuatro fuentes de ruido es importante considerar el ruido de intermodulación, de gran importancia en hologramas de objetos difusores, en los que aparece el efecto de interferencia entre la luz proveniente de los diferentes puntos del objeto, dando lugar a redes de bajas frecuencias que se almacenan junto con el diagrama interferencial deseado [6]. Evidentemente, este tipo de ruido es debido al alto grado de coherencia de la fuente láser utilizada en el registro de los hologramas.

De esta breve introducción sobre distintas fuentes de ruido en Holografía se puede extraer una primera conclusión y es que el origen de las mismas se encuentra fundamentalmente en la coherencia de la luz utilizada tanto en el registro como en la reconstrucción de los hologramas, así como en la naturaleza del material de registro en el que se almacena el diagrama interferencial el cual, tras el procesado, dará lugar al holograma.

De las cinco fuentes de ruido antes mencionadas, el ruido de intermodulación, el ruido debido a las no linealidades del medio de registro y las redes de ruido han sido las más ampliamente estudiadas en el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Alicante. Estas serán las fuentes de ruido que se analizarán con más detalle a lo largo de este trabajo, indicando los resultados más importantes que se han conseguido.

3. RUIDO DE INTERMODULACIÓN

Cuando se almacena en un material fotosensible la señal procedente de un objeto difusor, además de la interferencia entre las ondas objeto y referencia, también se registran las interferencias entre las ondas emitidas por los diferentes puntos del objeto.

Si se representa mediante $|A_R = a_R \cdot \exp(j\phi_R)|$ a la onda de referencia y mediante $A_i = a_i \cdot \exp(j\phi_i)$ con $(i = 1, 2, \dots, N)$ a las ondas provenientes de las N fuentes puntuales que conforman el objeto difusor, la intensidad I sobre el plano del holograma tiene tres términos bien definidos:

$$I = a_R^2 + 2 a_R \sum_{i=1}^N a_i \cdot \cos(\phi_{Ri}) + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N a_i \cdot a_k \cos(\phi_{ik}) \quad (1)$$

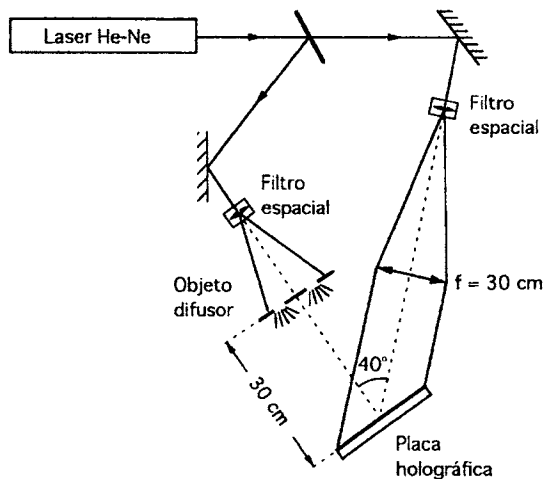


Figura 1
Montaje holográfico utilizado para el registro de hologramas de objetos difusores.

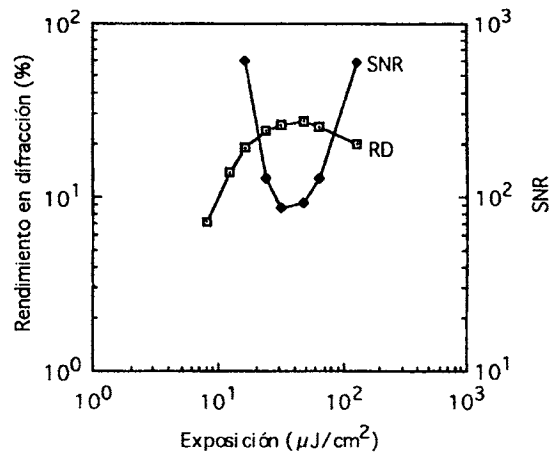


Figura 2
Rendimiento en difracción RD y SNR para un blanqueo de rehalogenación sin fijado junto con un revelador de contraste medio pero con una alta sensibilidad energética.

donde $\phi_{Ri} = \phi_R - \phi_i$ y $\phi_{ik} = \phi_i - \phi_k$. En esta expresión el primer sumando tiene en cuenta la intensidad promedio sobre el holograma, el segundo corresponde a la interferencia entre cada una de las ondas objeto y la onda de referencia, mientras que el último término describe las interferencias entre las ondas emitidas por el objeto difusor. Es precisamente este último término el que al grabarse en el medio de registro da lugar a la aparición de redes holográficas de muy baja frecuencia espacial, las cuales, al reconstruir el holograma originan una desviación de la luz incidente y dan lugar al ruido de intermodulación. A efectos prácticos, este ruido origina alrededor de la imagen del objeto una estructura difusora, lo que hace que parezca que se está observando el objeto a través de un vidrio deslustrado. Es importante señalar que si se supone que la respuesta del material de registro es lineal, el ruido de intermodulación es un ruido característico de los hologramas de fase, siendo prácticamente despreciable en los hologramas de absorción.

Veamos a continuación algunos resultados obtenidos sobre el ruido de intermodulación para hologramas de objetos difusores registrados en emulsiones fotográficas blanqueadas. El objeto difusor analizado es un cuadrado de 2 cm de lado, con una zona central opaca también cuadrada y de 1 cm de lado. El montaje holográfico es el que se muestra en la figura 1, con los haces objeto y referencia formando un ángulo de 40°. Para una longitud de onda de registro de 633 nm, la frecuencia espacial almacenada en el centro del holograma es de unas 1.000 líneas/mm.

El holograma se reconstruye con un haz colimado conjugado del haz de referencia para poder obtener la imagen real del objeto y se mide en el plano imagen la intensidad de la luz en las zonas luminosas del objeto, I_1 e I_2 , y en la zona correspondiente al cuadrado central opaco, I_0 . De esta forma, se define la relación señal-ruido, SNR, mediante la ecuación:

$$SNR = \frac{I_1 + I_2}{2I_0} \quad (2)$$

Este estudio se ha realizado con diferentes tipos de blanqueos, analizándose hologramas de objetos difusores tanto por transmisión como por reflexión.

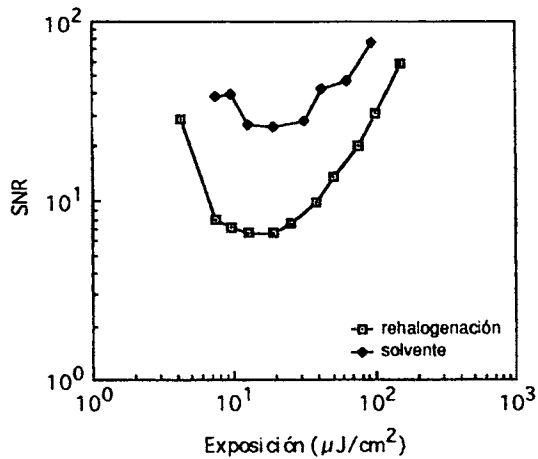


Figura 3
SNR en función de la exposición para emulsión fotográfica utilizando un blanqueo de rehalogenación y otro solvente.

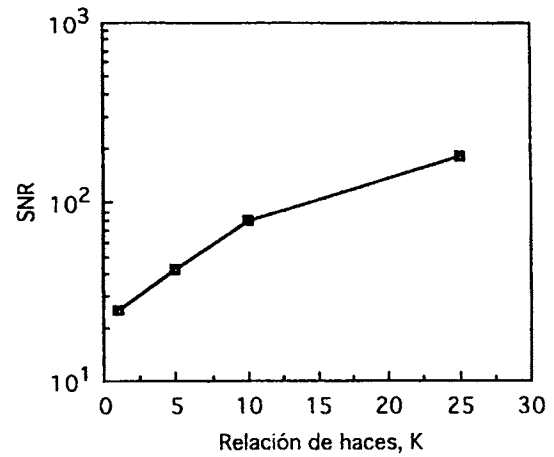


Figura 4
SNR en función de la exposición para diferentes relaciones de haces.

Al analizar la SNR en función de la exposición se obtiene un mínimo en la zona de respuesta lineal del material, aumentando el valor de la SNR hasta 100 en la zona de altas exposiciones. La figura 2 muestra un ejemplo típico de la SNR en función de la exposición para la emulsión fotográfica cuando se utiliza un blanqueo de rehalogenación y otro solvente. Como puede observarse, la SNR es mejor cuando se emplea el blanqueo solvente. Esto es debido a que la utilización de blanqueos solventes da lugar a variaciones en el espesor del medio de registro, cuestión que ya fue señalada por Lamberts [7] en sus trabajos sobre blanqueos de inversión. Sin embargo, como con los blanqueos de rehalogenación el espesor del medio prácticamente no se modifica, el ruido de intermodulación es superior al caso de los solventes.

Otro factor que afecta al ruido de intermodulación, y por tanto a la SNR, de los hologramas de objetos difusores es la relación de haces, K. Como puede verse en la figura 3, cuando la relación de haces aumenta, la SNR también lo hace. Este resultado ya fue apuntado por Upatnieks y Leonard [6], los cuales desarrollaron un modelo en el que encontraron que existía una dependencia de la SNR con la relación de haces y además concluyeron que debería existir una relación entre el aumento del rendimiento en difracción y el decrecimiento de la SNR. Sin embargo, en trabajos recientes que hemos realizado se demuestra que no necesariamente debe existir este tipo de relación entre el rendimiento en difracción y la SNR. Nuestra conclusión más importante es que es posible incrementar el rendimiento en difracción y además aumentar la SNR, eligiendo correctamente el procesado. Durante mucho tiempo se ha defendido la hipótesis de que la mayor aportación al ruido de intermodulación venía del proceso de blanqueo, y se consideraba que el revelador era un agente secundario en la aportación de ruido. Sin embargo, los trabajos que hemos realizado con distintos reveladores y adecuando el revelador al blanqueador nos permiten concluir que es posible obtener altos rendimientos en difracción con altas SNR [4]. En la figura 4 se muestran los resultados obtenidos al utilizar un blanqueo de rehalogenación sin

fijado junto con un revelador de contraste medio pero con una alta sensibilidad energética, lo que permite alcanzar densidades superiores a 7.

Como ya hemos indicado anteriormente, el ruido de intermodulación también es función del material de registro utilizado. Por ejemplo, en nuestros trabajos en gelatina sensibilizada de haluro de plata hemos obtenido valores para la SNR superiores a 1000, lo que da una idea de la calidad de los hologramas que se pueden alcanzar en determinados casos, siempre que se optimice el procesado [8].

Por último, es importante señalar que es posible registrar hologramas de objetos difusores generados por ordenador sin ruido de intermodulación [9]. Para ello basta generar mediante el ordenador el diagrama interferencial correspondiente a la ecuación (1), pero eliminando el último término.

4. RUIDO DEBIDO A LAS NO LINEALIDADES

Desde los orígenes de la Holografía siempre se ha supuesto que la transmitancia del holograma tras el procesado era lineal con la intensidad incidente durante la etapa de registro. Sin embargo, los resultados obtenidos para el ruido de intermodulación indican que el comportamiento del material de registro es no lineal. Además, con frecuencia se trabaja en la zona de altas exposiciones de la curva $D - \log E$, que es una zona claramente no lineal, y que corresponde precisamente a la zona no lineal de la curva transmitancia-exposición.

La mayor parte de los modelos teóricos sobre ruido que se han desarrollado son modelos lineales y muy pocos han considerado la posibilidad de que el comportamiento del medio de registro sea no lineal. Si en vez de suponer que la transmitancia del holograma es lineal con la exposición se consideran modelos más complejos (procediendo generalmente a un ajuste polinómico de la curva transmitancia-exposición), al reconstruir la imagen holográfica aparecen términos de orden superior en la transmitancia. Estos términos originan una superposición de imágenes sobre la onda reconstruida y su complejo conjugada del caso lineal, y son los causantes del ruido debido a no linealidades.

En nuestros trabajos hemos supuesto que la relación entre la modulación de índice, Δn , y la exposición E es no lineal y tiene la forma [4]:

$$\Delta n = \Delta n_0 [1 - \exp(-\beta E)] \quad (3)$$

donde Δn_0 es la máxima modulación de índice, y β es un parámetro propio del modelo. Con esta variación de índice la SNR obtenida tiene la forma:

$$SNR = \frac{1 - m^2 \left(a - b^2 - \frac{1}{4} m^2 a^2 \right)}{m^2 \left(a - b^2 - \frac{1}{4} m^2 a^2 \right)} \quad (4)$$

en donde, $a = (1 + 2\xi E)^{-1}$, $b = (1 + \xi E)^{-1}$, $m = \frac{2\pi d \Delta n_0}{\lambda \cos\theta}$ y $\xi = \beta(1 + K)$,

siendo K la relación de haces.

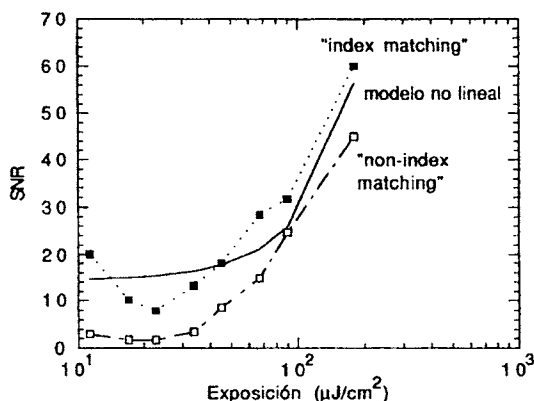


Figura 5
Comparación entre los resultados experimentales y teóricos de la SNR cuando se utiliza un modelo teórico no lineal.

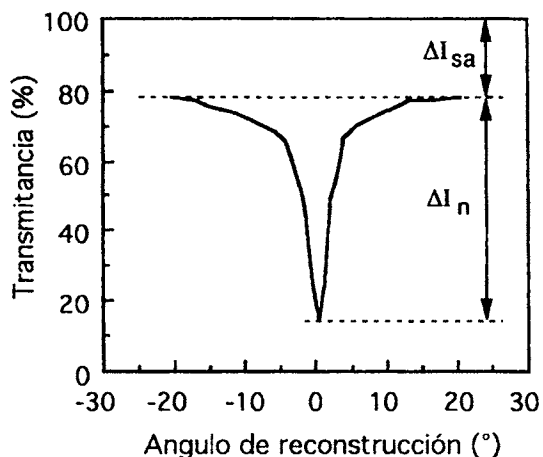


Figura 6
Transmitancia en función del ángulo del haz de reconstrucción de una placa holográfica en la que se han registrado redes de ruido con un solo haz.

En la figura 5 se muestra un caso particular en el cual se comparan los resultados experimentales con los teóricos que se deducen de la ecuación (4). Como puede observarse el ajuste entre los resultados experimentales y el modelo teórico aplicado es bastante bueno.

5. REDES DE RUIDO HOLOGRÁFICAS

Debido a la estructura granular de algunos materiales de registro holográfico como son las emulsiones fotográficas, es posible que la luz procedente de la difusión de los componentes del material interfiera con los haces objeto y referencia, dando lugar a unas nuevas redes holográficas que se registran simultáneamente con el diagrama interferencial correspondiente a las ondas objeto y referencia. Éstas son las denominadas redes de ruido [5, 10].

El rendimiento en difracción de las redes de ruido depende de factores tales como el procesado fotoquímico, la longitud de onda del registro y reconstrucción, la relación de haces entre las ondas objeto y referencia, la polarización del haz de reconstrucción respecto a la del haz de registro y la coherencia de la luz utilizada durante el registro.

Tal y como ya indicaron Syms y Solymar [5], es posible registrar redes de ruido haciendo incidir sobre el material de registro un único haz colimado de luz coherente. Dada la estructura granular de la emulsión fotográfica, cuando la luz incide sobre los granos de haluro de plata se produce un proceso de difusión Rayleigh, cada uno de los granos se comporta como un dipolo, y la interacción con el haz incidente los hace oscilar y por tanto emitir radiación. Esta radiación difundida interfiere con el haz incidente dando lugar a redes de ruido.

En la figura 6 se ha representado un ejemplo típico de la transmitancia en función del ángulo de reconstrucción para la emulsión Agfa 8E75HD y un blanqueo de rehalogenación sin fijado, cuando se utiliza un único haz de registro

proveniente de un láser de He-Ne. La disminución en la transmitancia es debida a las redes de ruido, siendo dicha disminución más acentuada para aquellos ángulos en los que se cumple la ley de Bragg para un gran número de redes. En esta figura, ΔI_{sa} tiene en cuenta la luz no transmitida debido a la difusión y a la absorción, mientras que ΔI_n representa el rendimiento en difracción de las redes de ruido.

Uno de los factores fundamentales que afecta al rendimiento de las redes de ruido es el procesado químico utilizado. Si el procesado no introduce variaciones de espesor en la emulsión, el rendimiento en difracción de las redes de ruido es considerable [11]. Sin embargo, si se utiliza un procesado que da lugar a variaciones de espesor considerables, no se observarán redes de ruido durante la reconstrucción. En la figura 7 se muestra un ejemplo de cómo influye el tipo de blanqueo utilizado. Ambas transmitancias corresponden al mismo tipo de revelador (AAC) sin fijado, pero una de las experiencias se llevó a cabo utilizando un blanqueo de rehalogenación del tipo R-10, mientras que la otra se realizó con un blanqueo solvente R-9. La figura representada corresponde a los resultados obtenidos utilizando un único haz de luz en el registro de longitud de onda 633 nm en incidencia normal sobre una placa de emulsión Agfa 8E75HD y con una exposición de 150 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$. En primer lugar observamos cómo las pérdidas por absorción y difusión son mucho mayores para el blanqueo de rehalogenación, para el que $\Delta I_{sa} \cong 40\%$, mientras que con el R-9 se tiene $\Delta I_{sa} \cong 15\%$ [11, 12]. La explicación a este hecho se encuentra en que la naturaleza y la concentración del agente rehalogenante del blanqueo R-10 producen un tamaño de grano mayor, con el consiguiente aumento de la difusión, que es proporcional a la sexta potencia del radio de la partícula difusora. En la figura 7 también se observa cómo los efectos de las redes de ruido son muy significativos cuando se utiliza el blanqueo R-10, y para la exposición considerada la transmitancia de la placa es prácticamente nula cuando el ángulo de reconstrucción es igual al de registro (0°), dando lugar a $\Delta I_n = 60\%$, mientras que al hacer uso del blanqueo R-9 se tiene que únicamente $\Delta I_n = 10\%$. La clara diferencia existente entre el rendimiento de las redes de ruido en los blanqueos R-9 y R-10 se debe a su forma diferente de actuar sobre la emulsión fotográfica. Con el blanqueo R-9 se producen cambios considerables de espesor que dan lugar a variaciones en los planos de Bragg de cada una de las redes, por lo que no será posible satisfacer simultáneamente la ley de Bragg para todas las redes de ruido, siendo su rendimiento muy pequeño y por tanto la transmitancia elevada. En el caso del blanqueo R-10, prácticamente no varía el espesor, siendo posible satisfacer la ley de Bragg para un gran número de redes de ruido, por lo que el rendimiento de dichas redes será elevado, disminuyendo drásticamente la transmitancia en los alrededores del ángulo de reconstrucción idéntico al del registro, tal y como se ve en la figura 7.

En otras experiencias realizadas se ha encontrado que es posible utilizar el estudio de las redes de ruido registradas mediante exposiciones con un sólo haz en emulsiones fotográficas como técnica de análisis y optimización de procesados fotoquímicos. En particular, se ha estudiado mediante esta técnica la influencia del agente rehalogenante en blanqueos de rehalogenación sin fijado [13], y se ha obtenido información sobre las cantidades adecuadas del citado agente que permiten optimizar el procesado.

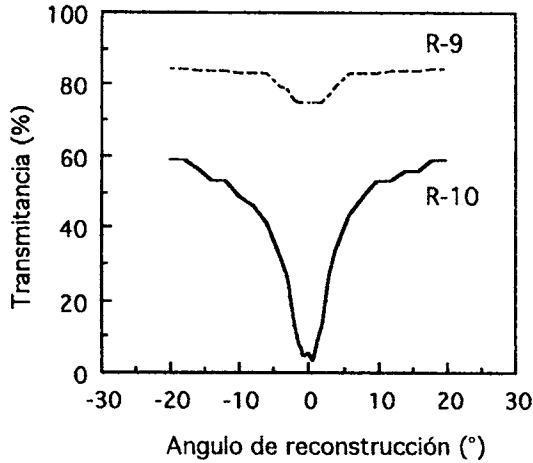


Figura 7
Transmitancia en función del ángulo del haz de reconstrucción para un blanqueo solvente (R-9) y otro de rehalogenación (R-10).

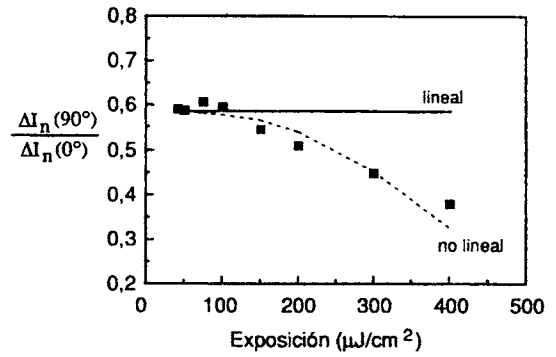


Figura 8
Resultados teóricos y experimentales del parámetro $\Delta I_n(90^\circ)/\Delta I_n(0^\circ)$ en función de la exposición incidente para un blanqueo de rehalogenación sin fijado.

Se ha encontrado asimismo que el rendimiento de las redes de ruido depende de la relación entre las polarizaciones de los haces de registro y reconstrucción [14, 15]. El estudio experimental se ha completado con el desarrollo de un modelo teórico que considera una relación tanto lineal como no lineal entre la modulación de índice de refracción y la exposición incidente [15]. En la figura 8 se muestran los resultados teóricos y experimentales del parámetro $\Delta I_n(90^\circ)/\Delta I_n(0^\circ)$ en función de la exposición incidente, para las redes de ruido almacenadas con un único haz de registro en incidencia normal sobre la emulsión Agfa 8E75HD y utilizando un blanqueo de rehalogenación sin fijado. $\Delta I_n(0^\circ)$ es el rendimiento de las redes de ruido cuando la polarización de los haces de registro y de reconstrucción es idéntica, mientras que $\Delta I_n(90^\circ)$ corresponde al rendimiento cuando las polarizaciones de dichos haces son perpendiculares. Para el modelo lineal entre la modulación de índice y la exposición, los resultados corresponden a la línea continua y a la expresión teórica:

$$\frac{\Delta I_n(90^\circ)}{\Delta I_n(0^\circ)} = 0.583 \quad (5)$$

La línea discontinua corresponde a suponer una relación no lineal entre la modulación de índice y la exposición según la ecuación teórica $\Delta n = \Delta n_0[1 - \exp(-E/E_0)]$ y corresponde a la expresión:

$$\frac{\Delta I_n(90^\circ)}{\Delta I_n(0^\circ)} = \frac{3.351 - 2.872(E/E_0) + 0.638(E/E_0)^2}{5.745 - 5.106(E/E_0) + 2.127(E/E_0)^2} \quad (6)$$

donde E es la exposición incidente y $E_0 = 340 \mu\text{J}/\text{cm}^2$. Puede comprobarse que para $E \rightarrow 0$ (zona lineal de la curva $\Delta n = f(E)$), la ecuación (6) coincide con la ecuación (5).

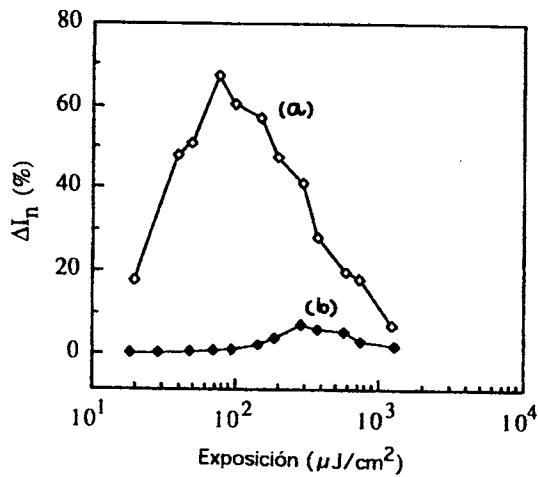


Figura 9
Rendimiento en difracción de las redes de ruido registradas con un único haz tanto de (a) luz coherente como de (b) luz parcialmente coherente.

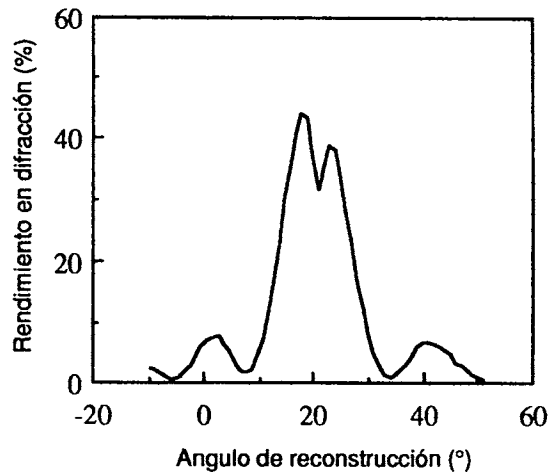


Figura 11
Respuesta angular en un punto de la pupila de salida de lente holográfica.

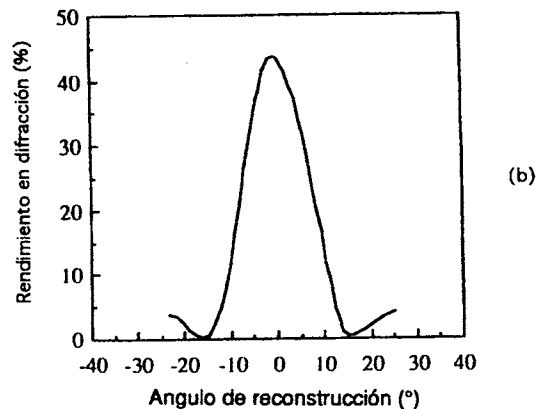
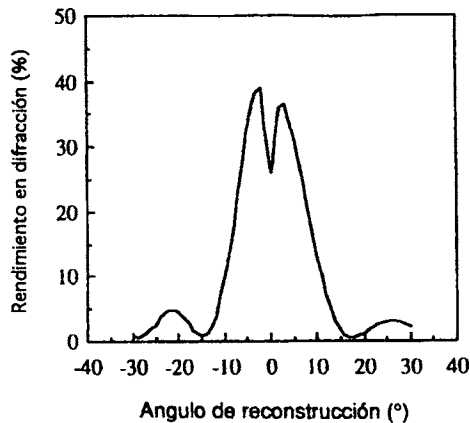


Figura 10
Rendimiento en difracción de las redes de ruido almacenadas al registrar redes por transmisión con (a) luz coherente y con (b) luz parcialmente coherente.

Uno de los resultados más importantes conseguidos en nuestro Laboratorio en relación a las redes de ruido es su minimización cuando se registran con luz parcialmente coherente [16, 17]. En la figura 9 se ha comparado el rendimiento de las redes de ruido registradas con un solo haz cuando se utiliza luz coherente de un láser de He-Ne y luz parcialmente coherente de una lámpara de mercurio, utilizando en ambos casos el mismo procesado. Mientras que con luz coherente ΔI_n llega casi al 70%, con luz parcialmente coherente ΔI_n apenas toma el valor del 7%. Este hecho indica que con luz parcialmente coherente no se han registrado redes de ruido y que esto es debido a la coherencia de la luz utilizada en el registro.

En la figura 10 se muestran los resultados obtenidos con redes holográficas. Mientras que con luz coherente aparece una disminución en el rendi-

miento en difracción de la red principal, cuando se usa luz parcialmente coherente esta disminución desaparece. En este último caso la red se ha registrado mediante copia, con un original que no presentaba redes de ruido. Esto permite concluir que al registrar elementos ópticos holográficos con luz parcialmente coherente, aunque se utilice como material de registro la emulsión fotográfica, no se almacenarán redes de ruido. Este hecho es fundamental si se aplica a los procesos de copia de hologramas con luz parcialmente coherente [18], ya que experimentalmente se ha demostrado en nuestros trabajos que si el original utilizado en este proceso de copia no contiene redes de ruido, como puede ser el caso de un holograma realizado en gelatina sensibilizada de haluro de plata, entonces tampoco aparecerán redes de ruido en las copias realizadas con luz parcialmente coherente, aún cuando el material de registro en el cual se va a realizar la copia sea un medio con estructura granular como la emulsión fotográfica.

También, se han analizado las redes de ruido en sistemas más complejos como son las lentes holográficas [19] y los hologramas de objetos difusores [20]. En el primer caso se ha estudiado experimentalmente cómo influyen las redes de ruido en el rendimiento en difracción de una lente holográfica registrada mediante interferencia de una onda colimada y otra divergente en montaje simétrico. En la figura 11 se ha representado la respuesta angular en un punto de la pupila de salida de la lente, observándose la disminución típica en el rendimiento en difracción en torno al ángulo del haz de referencia debida a la presencia de redes de ruido. La figura 12 corresponde al rendimiento de las redes de ruido, ΔI_n , en función de la posición sobre un diámetro de la lente. Como puede observarse, se obtienen valores de ΔI_n de hasta el 18%.

En el caso de los objetos difusores se empleó una geometría similar a la representada en la figura 1. En la figura 13 se muestran los resultados para el rendimiento en difracción y el ruido correspondientes a un blanqueo de rehalogenación sin fijado. En esta figura ΔI_n y ΔN representan el rendimiento en difracción de las redes de ruido y la influencia de estas redes sobre el ruido total, respectivamente. La figura 14 corresponde a la dependencia de ΔI_n y ΔN con la exposición incidente durante el registro.

El estudio experimental de las redes de ruido se ha complementado con el desarrollo de un modelo teórico basado en consideraciones estadísticas [21]. Se ha encontrado que el rendimiento en difracción máximo de las redes de ruido almacenadas con un solo haz de registro puede calcularse mediante la expresión:

$$\Delta I_n = 2\alpha E^2 \exp(-2\alpha E^2) {}_1F_1\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}; 2\alpha E^2\right) \quad (7)$$

donde α es un parámetro que depende del material de registro, la longitud de onda y el ángulo de incidencia; E es la exposición y ${}_1F_1(a,b;y)$ es la función hipergeométrica confluyente. En la figura 15 se muestran los resultados experimentales y teóricos para un blanqueo de rehalogenación del tipo R-10 pero con 8.75 g de agente rehalogenante (K Br).

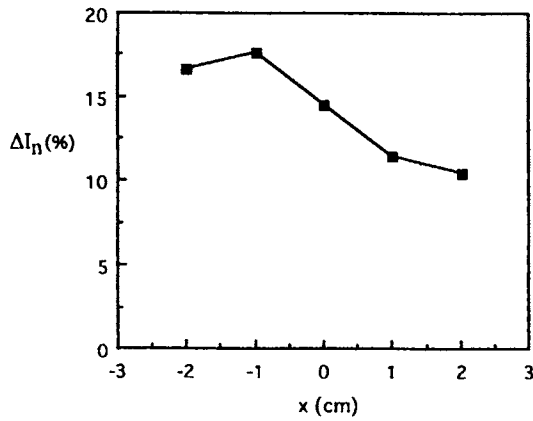


Figura 12
Rendimiento de las redes de ruido, ΔI_n , en función de la posición sobre un diámetro de la lente holográfica.

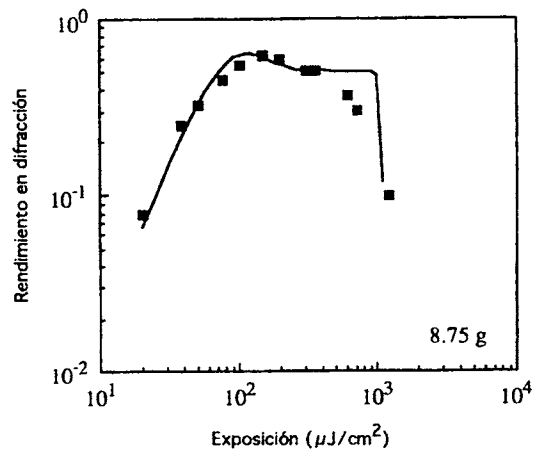


Figura 15
Resultados experimentales y teóricos del rendimiento en difracción de las redes de ruido almacenadas con un único haz de registro correspondientes a un blanqueo de rehalogenación sin fijado.

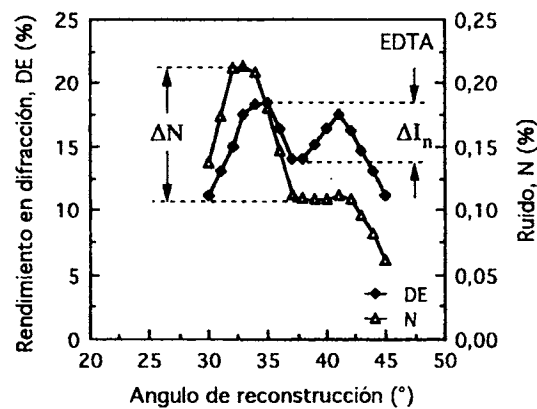
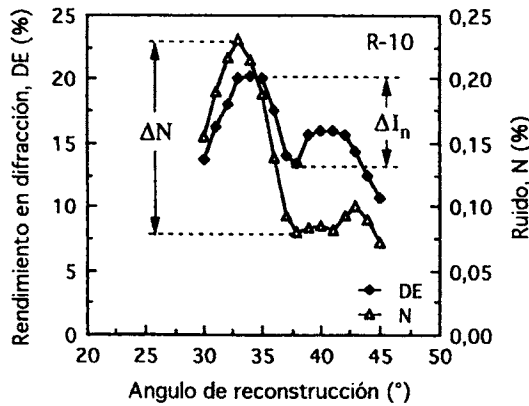


Figura 13
Rendimiento en difracción, DE, y ruido, ΔN , correspondientes a dos blanqueos de rehalogenación (R-10 y EDTA) sin fijado en el caso de hologramas de objetos difusores.

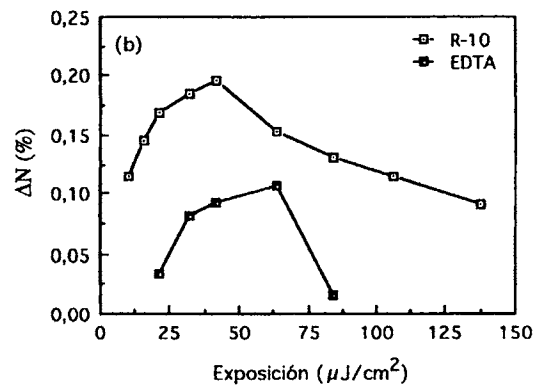
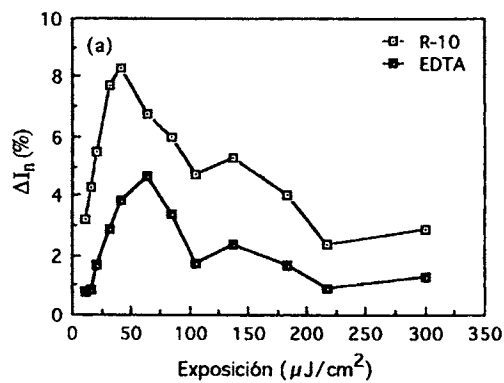


Figura 14
 ΔI_n y ΔN en función de la exposición incidente para hologramas de objetos difusores para dos blanqueos de rehalogenación (R-10 y EDTA) sin fijado.

CONCLUSIONES

Normalmente cuando se hace un estudio de ruido en Holografía se analizan de forma aislada uno u otro tipo de fuente de ruido, aunque en realidad aparecen todas ellas juntas. Hasta el momento no se ha publicado ningún trabajo que estudie todas las fuentes de ruido y las interrelaciones, como tampoco se dispone de ningún modelo teórico lo suficientemente general que englobe todos los tipos de ruidos. De hecho, en este trabajo se ha llevado a cabo una revisión de algunos resultados teóricos y experimentales sobre varias fuentes de ruido en Holografía, obtenidos considerando únicamente un tipo de ruido en cada caso. Quizás el siguiente paso sería el considerar dos tipos de fuentes de ruido para así ir generalizando hasta poder considerarlas todas. Por otra parte, los sistemas holográficos analizados han sido las redes de difracción, las lentes holográficas y los hologramas de objetos difusores, como punto de partida para el estudio del ruido en sistemas más complejos como puede ser el caso de los interconectores ópticos holográficos, componentes fundamentales, por ejemplo, del futuro ordenador óptico.

REFERENCIAS

- [1] J. Oliva, M. Pardo y J. A. Quintana, "High SNR in bleached silver-halide holography", *Appl. Opt.* **21**, 171(1982).
- [2] H. M. Smith, "Principles of Holography", 2th edition, pp. 125-142, (1975).
- [3] H. M. Smith, "High scattering in photographic materials for Holography", *Appl. Opt.* **11**, 26-32, (1972).
- [4] A. Fimia, A. Beléndez y L. Carretero, "Signal to noise ratio of non-linearly recorded holograms of diffuse objects", *Appl. Opt.* **33**, 7606-7610 (1994).
- [5] R. R. A. Syms y L. Solymar, "Noise gratings in photographic emulsions", *Opt. Commun.* **43**, 107-110 (1982).
- [6] J. Upatnieks y C. D. Leonard, "Efficiency and image contrast of dielectric holograms", *J. Opt. Soc. Am.*, **60**, 297-305 (1970).
- [7] R. L. Lamberts, «Characterization of a bleached photographic material», *Appl. Opt.* **11**, 33-41 (1972).
- [8] A. Fimia, A. Beléndez, I. Pascual y L. Carretero, «Diffuse object holograms in silver halide sensitized gelatin», *J. Mod. Opt.* **41**, 649-653 (1994).
- [9] A. Fimia, R. Fuentes, I. Pascual, A. Beléndez, J. J. Egózcue y M. T. Navarro, «Copying computer generated holographic interconnects using partially coherent light» *Appl. Opt.* **33**, 1431-1433 (1994).
- [10] R. R. A. Syms y L. Solymar, «Noise gratings in silver halide volume holograms», *Appl. Phys. B* **30**, 177-182 (1983).
- [11] A. Beléndez, I. Pascual y A. Fimia, «Noise gratings recorded with single-beam exposures in silver halide emulsions: The influence of the bleach bath», *Opt. Quant. Electron.* **25**, 139-145 (1993).
- [12] A. Beléndez, L. Carretero, A. Fimia, R. Fuentes e I. Pascual, «Redes holográficas en emulsiones fotográficas», *Opt. Pura Apl.* **26**, 1-9 (1993).
- [13] L. Carretero, A. Beléndez y A. Fimia, «Holographic noise gratings for analyzing and optimizing photochemical processings in bleached silver halide emulsions», *J. Mod. Opt.* **40**, 687-697 (1993).

- [14] R. K. Kostuk y G. T. Sincerbox, «Polarization sensitivity of noise gratings recorded in silver halide volume holograms», *Appl. Opt.* **27**, 2993-2998 (1988).
- [15] A. Beléndez, L. Carretero e I. Pascual, «Polarization influences on the efficiency of noise gratings recorded in silver halide holograms», *Appl. Opt.* **32**, 7155-7163 (1993).
- [16] I. Pascual, A. Beléndez y L. Carretero, «Influencia de la coherencia en las redes de ruido holográficas», *Opt. Pura Apl.* **26**, 58-63 (1993).
- [17] A. Beléndez, L. Carretero y A. Fimia, «The use of partially coherent light to reduce the efficiency of silver halide noise gratings», *Opt. Commun.* **98**, 236-240 (1993).
- [18] I. Pascual, A. Beléndez y A. Fimia, «A two step method for recording holographic optical elements with partially coherent light», *J. Opt.* **22** (3), 135-140 (1991).
- [19] A. Beléndez, R. Fuentes y A. Fimia, «Noise gratings in thick-phase holographic lenses», *J. Opt.* **24** (3), 99-105 (1993).
- [20] A. Fimia, R. Fuentes y A. Beléndez, «Noise gratings in bleached silver halide diffuse-object holograms», *Opt. Lett.* **19**, 1243-1245 (1994).
- [21] L. Carretero, A. Fimia y A. Beléndez, «Statistical model for noise gratings recorded in volume holograms», *J. Mod. Opt.* **40**, 1299-1308 (1993).