

Holografía

JAVIER SANTAMARIA SALAZAR,
Doctor en Ciencias Fisicas

JAVIER SANTAMARIA SALAZAR

JAVIER Santamaría Salazar, es Doctor en Ciencias Fisicas por la Universidad de Zaragoza, Especialidad de Optica (1973). Es investigador en excedencia del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Instituto de Optica), donde ha trabajado en áreas de formación, evaluación y procesado de imágenes por métodos ópticos y digitales, instrumentación y visión. Ha publicado del orden de cincuenta trabajos en las más prestigiosas revistas científicas internacionales y, desde comienzos de 1988, trabaja en Sener Ingeniería y Sistemas en desarrollo de sistemas Electro-ópticos para Defensa.

INTRODUCCION

EN un proceso convencional de formación de imágenes, la luz reflejada o emitida por un objeto se propaga por el espacio y entra en un instrumento óptico, que redistribuye la información configurando una imagen. Esta imagen se registra en o a través de un elemento fotosensible tan como una película fotográfica o un tubo de televisión que detectan la intensidad de la radiación incidente pero no son sensibles a la fase que, en ciertas condiciones, lleva la información del relieve del objeto. Denis Gabor propuso en 1948 lo que denominó el método de reconstrucción del frente de onda u holografía (que significa registro completo o total) que permitió registrar la onda emergente del objeto iluminado, con toda la información tanto de amplitud como de fase para después reconstruirla. De esta manera, después de la reconstrucción se genera la misma onda que incidió sobre el plano de registro produciendo por tanto la misma sensación visual que hubiera producido la onda saliente del objeto, que puede ser así visualizado en tres dimensiones.

La holografía, que fue propuesta para su aplicación en microscopía electrónica, no tuvo éxito inicialmente y a pesar de la viabilidad del procedimiento con luz visible, no pudo manifestarse como la poderosa herramienta que es entre otras razones por la ausencia de una fuente coherente e intensa como es el láser. En los comienzos de los años sesenta, con el advenimiento del láser y los trabajos de Leith y Upatnieks de la Universidad de Michigan que extendieron y generalizaron la técnica inicial, se obtuvieron imágenes tridimensionales de calidad excepcional. Sin embargo, a pesar de que la popularidad de la holografía va ligada a la obtención de imágenes tridimensionales, su mayor potencialidad y eficacia se presenta en otras facetas de la ciencia y la tecnología. En lo que sigue, haremos una breve descripción de los conceptos y procedimientos de obtención de hologramas así como de las aplicaciones actuales de la holografía.

CONCEPTOS BASICOS

EL registro de un holograma es en definitiva un proceso de interferencia que no es sino el resultado de la suma, en ciertas condiciones, de dos ondas electromagnéticas. En cada instante el resultado de la suma o interferograma depende tanto de las intensidades de las dos ondas como de la diferencia entre las fases, que llevan la información del camino recorrido. Así pues el interferograma codifica las diferencias de fase en forma de máximos y mínimos de intensidad distribuidos localmente en función de la variación local de dichas fases. Sin embargo para que esta codificación tenga lugar es necesario que la radiación y la geometría del proceso cumplan una serie de condiciones. Así las dos ondas a interferir deben ser coherentes, es decir, deben provenir de la misma fuente luminosa para que exista una relación constante entre las fases; la fuente debe ser de muy pequeñas dimensiones (coherencia espacial) y la emisión debe ser monocromática (coherencia temporal). Si la fuente fuera de tamaño extenso cada punto de la fuente generaría un interferograma desplazado dando como resultado una distribución promedio tanto más uniforme cuanto más extensa sea la fuente, perdiéndose, o difuminándose cuando menos, la información de las fases. Algo análogo ocurre con la coherencia temporal: las diferencias de fase y por tanto el interferograma depende también de la longitud de onda de la luz, o en términos coloquiales del color de la luz. Así si la fuente emitiera o se filtrara más de un color o longitud de onda o frecuencia se obtendría un interferograma diferente para cada longitud de onda perdiéndose el efecto.

Las fuentes luminosas convencionales son siempre extensas y es necesario seleccionar un área muy pequeña (del orden de unidades o decenas de micrómetros) para cumplir los requisitos de coherencia espacial. La coherencia temporal puede obtenerse con lámparas espectrales o con filtros interferenciales de paso muy estrecho. Ambos requisitos se obtienen pues a costa de perder energía luminosa lo que dificulta la obtención de hologramas. El láser proporciona a la holografía una fuente coherente (temporal y espacialmente) de gran intensidad y de cómodo manejo.

PROCEDIMIENTO DE REGISTRO DE UN HOLOGRAMA

La figura 1 muestra una de las configuraciones típicas para la realización de un registro holográfico. Un láser emite un haz paralelo de pequeño diámetro (≈ 1 mm.) por lo que para iluminar un objeto es necesario expandirlo hasta el diámetro deseado mediante un telescopio invertido. (El láser y el telescopio no se muestran en la figura). El haz, una vez expandido (puede ser paralelo, convergente o divergente), incide sobre una lámina de vidrio óptico plano-paralela con un recubrimiento parcialmente reflectante que transmite una parte de la energía y refleja el resto. Se obtienen así dos ondas coherentes, que también se puede formar seleccionando dos zonas diferentes de la onda incidente inicial. Una de las ondas, la onda de referencia, incide directamente sobre el plano de registro y la otra, la onda objeto, se hace incidir sobre la escena u objeto del que deseamos obtener el holograma. La luz reflejada por el objeto incide sobre el plano de registro donde se suma con la onda de referencia, interfiriendo y produciendo una distribución de intensidades que en cada punto depende de las intensidades y de las fases o caminos ópticos de los dos haces. Eventualmente puede intercalarse entre el objeto y el plano de registro un vidrio deslustrado para uniformizar la iluminación y para eliminar sombras indeseadas. Asimismo es deseable igualar al máximo los recorridos de los dos haces con ayuda de espejos o prismas de desviación.

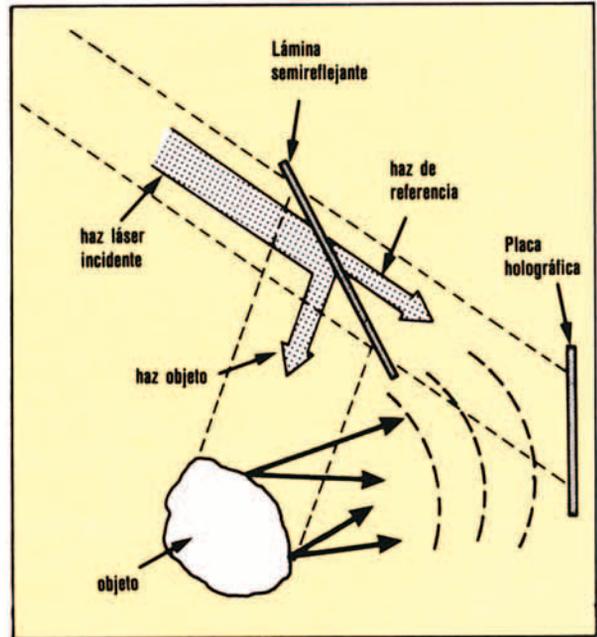


Figura 1. Configuración para el registro de un holograma.

Esta distribución de intensidades debe registrarse en un detector fotosensible para su posterior reconstrucción. Aunque para algunas aplicaciones específicas se pueden utilizar placas termoplásticas, la placa fotográfica es el sistema más usual pero debe tener la resolución suficiente para reproducir los cambios locales de intensidad, es decir la estructura del holograma que es tanto más fina cuanto mayor sea el ángulo entre los dos haces sobre el plano de la placa. En el caso más frecuente este ángulo es suficientemente grande como para que se necesiten placas de resoluciones muy altas (≈ 2000 líneas/mm), incluso para objetos de pequeñas dimensiones. En este sentido puede decirse que la resolución de la placa limita el tamaño del objeto a reproducir. Debe mencionarse que para evitar el emborronamiento de la estructura es necesario evitar todo tipo de vibraciones y que tanto la relación de intensidades entre los dos haces, la exposición y las condiciones de revelado son de gran importancia y deben ser cuidadosamente determinadas en función de cada experiencia particular y de las características de la emulsión fotográfica.

RECONSTRUCCION DE UN HOLOGRAMA

UNA vez registrado y revelado el holograma debe ser "leído" adecuadamente para reconstruir el objeto inicial. La configuración para lectura es análoga a la de registro y más sencilla. Se coloca el holograma en la misma posición en que fue obtenido y se ilumina con la misma onda de referencia o con su conjugada. La conjugación implica un cambio de signo en la fase de la onda de tal manera que una onda convergente se convierte en divergente y viceversa y una onda plana se convierte en su simétrica respecto al eje de referencia. Las variaciones locales de la transmitancia del holograma configuran una estructura muy fina que difracta la luz, análogamente a una red de difracción, y del holograma salen cuatro ondas propagándose en direcciones diferentes. Cada onda se corresponde con cada uno de los cuatro términos resultantes de la suma compleja de las dos ondas en la fase de registro.

En la figura 2 se muestran tres formas de lectura. En la primera a) se ilumina el holograma con la misma onda de referencia del registro. De las ondas emergentes, una de ellas es igual a la onda objeto incidente en el registro y propagándose de la misma manera; es como una continuación de la onda incidente, forma una imagen virtual y puede ser visualizada produciendo la misma sensación visual que el objeto mismo. Si el holograma se ilumina con la onda conjugada de la referencia b) se obtiene la conjugada de la onda objeto, que es una onda convergente que produce una imagen real; se puede registrar y visualizar, aunque con más dificultad y con la perspectiva invertida (imagen pseudoscópica). También puede iluminarse el holograma con una onda en dirección perpendicular al holograma c) con lo que se producen simultáneamente las dos ondas anteriores propagándose en la dirección de la onda de referencia y su simétrica.

Una particularidad del holograma es que cada punto de la placa recibe luz de todos los puntos del objeto por lo que cualquier pequeño trozo del holograma (por ejemplo en caso de rotura) permite visualizar el objeto entero aunque con menos luminosidad y menos resolución. Por esto mismo deterioros locales de la emulsión afectan poco a la calidad de la reconstrucción.

TIPOS DE HOLOGRAMA

Las denominaciones de hologramas suelen hacerse en parte según la geometría de la configuración y en parte por aspectos conceptuales diferenciadores.

Holograma de Gabor. También llamado "en línea" o "alineado". Es la configuración inicialmente propuesta por Gabor. La onda de referencia y la onda objeto son coaxiales por lo que el objeto debe ser muy transparente. Este hecho, unido a que se obtienen siempre dos imágenes gemelas inseparables, limita mucho su aplicabilidad.

Holograma de Leith y Upatnieks. Utiliza onda de referencia extra-axial. La explicación previa se basa en este tipo de hologramas que es el generalmente más usual.

Holograma de Fresnel. Se denomina así al holograma en el que la radiación reflejada del objeto se propaga una distancia finita antes de llegar al plano de registro. Es el caso mostrado en la figura 1.

Holograma de Transformada de Fourier. En este caso el haz objeto se propaga hasta el infinito donde se encuentra el plano de registro. En el caso práctico el infinito es el plano focal de una lente o sistema óptico convergente. Este tipo se denomina así porque la distribución de amplitud objeto sobre el plano de registro corresponde a la transformada de Fourier del objeto. En la reconstrucción puede visualizarse el objeto con la ayuda de una lente convergente.

Holograma de imagen. Cuando en el registro se forma, con la ayuda de un sistema óptico, una imagen real sobre la placa holográfica, la reconstrucción produce una imagen sobre la propia placa. Tienen la ventaja fundamental de que pueden reconstruirse con fuentes convencionales incluso de luz blanca. Ello es debido a que las imágenes para todos los puntos de la fuente y para todos los colores están centradas sobre el holograma por lo que el emborronamiento causado por la falta de coherencia es mínimo. Sin embargo la dirección de propagación de la onda objeto varía con el color por lo que cuando se reconstruye con una lámpara de luz blanca se ve el objeto sobre la placa pero con colores diferentes desde ángulos diferentes.

Holograma de Fourier sin lente. La fuente de referencia es un punto emisor colocado en el mismo plano del objeto. Se demuestra que la onda reconstruida proporciona la Transformada de Fourier análogamente al de este nombre pero sin el uso de lentes.

Hologramas de fase. Los hologramas descritos hasta ahora difractan la luz en virtud de los cambios locales de transmitancia de la placa generados al registrar la interferencia de las ondas. La placa puede someterse a un proceso químico llamado de blanqueo que transforma las variaciones de transmitancia en variaciones de espesor y/o de índice de refracción de la placa que también difractan la luz en la reconstrucción. Con este proceso puede aumentarse selectivamente la eficiencia o aporte de energía de alguno de los haces difractados.

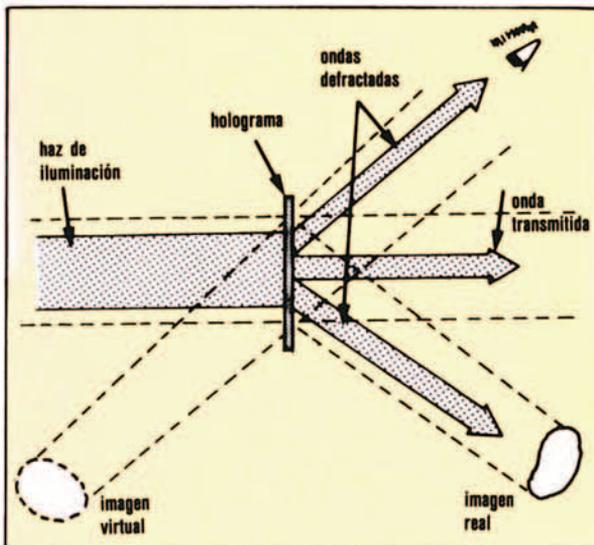
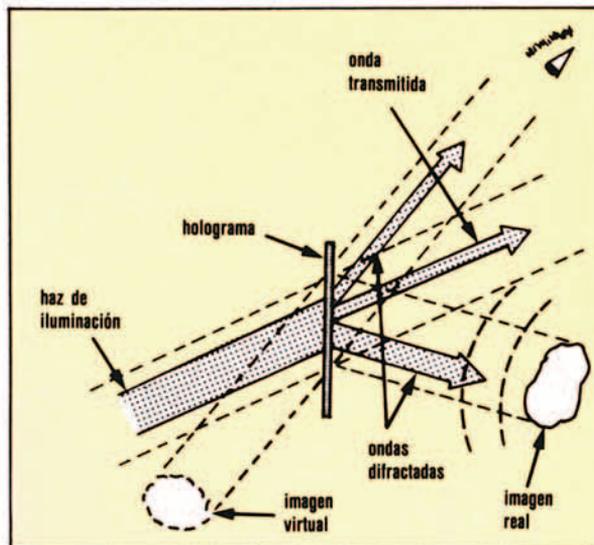
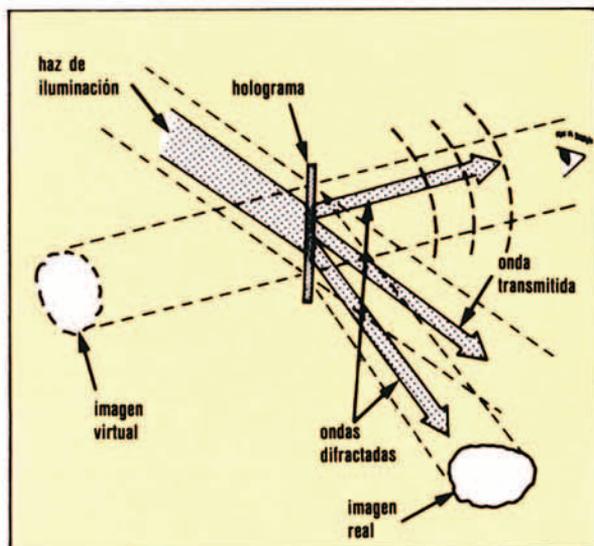


Figura 2. Reconstrucción de un holograma. a) Iluminando con la onda de referencia. b) Iluminando con la onda conjugada de la referencia. c) Iluminando con onda normal al holograma.

Holograma de volumen. En todo lo anteriormente dicho se ha supuesto que la interferencia y registro tiene lugar en un plano estricto, sin embargo la emulsión fotográfica tiene un cierto espesor (entre 5 y 20 μm) que en muchos casos no se puede ignorar. En definitiva en lugar de franjas de interferencia se producen láminas (puede usarse como simil las láminas de una persiana gradulux). Este tipo de holograma impone restricciones en la reconstrucción que sólo tiene lugar para ciertos ángulos llamados de Bragg.

Hologramas de reflexión. Es un caso particular del hologramama de volumen en el que la onda objeto y la onda de referencia inciden sobre la placa desde lados opuestos de ella. En la emulsión se forman láminas de plata, reflectantes, prácticamente paralelas a la superficie de la emulsión. Si se reconstruye con la misma onda de referencia se produce una onda objeto reflejada (es como una continuación de la onda objeto que incidió en el registro). Tiene la particularidad que sólo una longitud de onda o un color cumple las condiciones de difracción de la red interna de la emulsión por lo que el holograma puede iluminarse con luz blanca.

Hologramas en color. Pueden realizarse con emulsiones delgadas y con emulsiones de volumen. En el primer caso es necesario recurrir a máscaras sobre el holograma de forma que iluminando con diferentes colores, diferentes zonas de la emulsión registren hologramas del mismo objeto pero de distintos colores. La misma máscara debe utilizarse en la reconstrucción para asignar cada referencia color a su correspondiente zona de holograma. En el caso de emulsiones de volumen, colores diferentes generan redes diferentes en la emulsión de tal manera que si los ángulos de las ondas de referencia en la construcción y reconstrucción se eligen adecuadamente en función de la longitud de onda se obtienen imágenes tridimensionales en color pudiendo incluso iluminarse con luz blanca.

Hologramas de arco iris. Es un holograma de imagen, es decir generado proyectando una imagen del objeto sobre el plano del holograma, pero en este caso la imagen es a su vez una imagen holográfica. Es decir se construye un holograma de Fresnel por ejemplo, se reconstruye y sobre el plano de la imagen real se coloca una nueva placa fotográfica que se ilumina simultáneamente con una nueva referencia produciendo un nuevo holograma. Este holograma es un holograma de imagen del objeto por lo que se puede reconstruir con luz blanca proporcionando colores distintos para cada dirección distinta. Para evitar que en la visualización se mezclen los colores, como ocurriría en un holograma imagen convencional, al registrar el holograma final se selecciona sólo una tira delgada del holograma inicial.

Holograma por computador. El resultado de la interferencia en un holograma puede en algunos casos calcularse en un ordenador. El resultado se presenta como un dibujo que es posteriormente reducido fotográficamente obteniéndose un holograma por computador que puede leerse con un láser. También puede calcularse, no la interferencia, sino simplemente la distribución de amplitudes y fases en un cierto plano de propagación de la onda emergente del objeto. Puesto que sólo puede dibujarse intensidades es necesario codificar la fase de alguna manera. Una forma, por ejemplo, es dividir el registro en pequeñas celdas, análogamente a un tramado de impresión gráfica, donde la intensidad se especifica por el tamaño del área negra y la fase por la posición del área negra dentro de la celda.

APLICACIONES DE LA HOLOGRAFIA

EL registro y visualización de imágenes tridimensionales constituye sin duda la aplicación más conocida de la holografía, por su interés social y comercial. Sin embargo existen multitud de aplicaciones de mayor incidencia en el desarrollo de la ciencia y de la tecnología. A continuación citaremos brevemente algunas de las aplicaciones más usuales o conocidas de la holografía.

Interferometría holográfica. Es la interferencia entre dos ondas, ambas provenientes del mismo objeto pero en dos estados diferentes, por ejemplo antes y después de un pequeño desplazamiento, deformación o vibración. Como resultado se obtiene una imagen del objeto sobre el que están superpuestas unas franjas que permiten obtener información cuantitativa del proceso sufrido. De las dos ondas objeto una la proporciona el holograma y la otra la puede venir bien del propio objeto iluminado por el mismo láser y colocado adecuadamente o bien del mismo holograma si se han registrado mediante exposición doble o múltiple los estados del objeto. Mediante esta técnica en sus múltiples variantes se puede medir con precisión mínimas deformaciones, desplazamientos, vibraciones, se pueden generar mapas topográficos, extraer diferencias entre dos imágenes, etc. La figura 3 muestra un ejemplo de holografía interferométrica, en el que se muestra las franjas generadas por la deformación de un vaso al llenarlo de agua. Asimismo la figura 4 muestra la vibración de la lámina de un auricular.

Microscopía. Puede obtenerse una imagen con aumento cambiando la curvatura de la onda de iluminación o aumentando la longitud de onda de la radiación de lectura. Se han obtenido hasta 100 aumentos y es de gran aplicación para la visualización de objetos transparentes. Por otro lado permite aumentar considerablemente la profundidad de foco con lo que pueden hacerse estudios sobre partículas móviles en un volumen tal como un aerosol.

Compensación de aberraciones y degradaciones en formación de imágenes. Si un holograma se ilumina con la onda objeto con que fue formado se obtiene como resultado la onda de referencia. Si en un proceso de formación de imágenes se hace un holograma de la onda producida por una fuente puntual afectada de aberraciones o distorsionada y después de revelado se coloca en la misma posición en que fue obtenido y se ilumina con la onda deformada se obtiene una onda plana sin aberraciones (la onda de referencia utilizada en el registro).

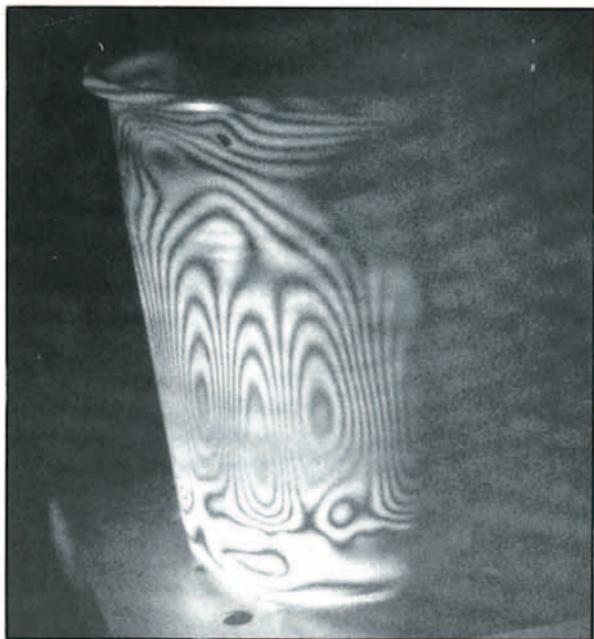


Figura 3. Interferograma holográfico de doble exposición. Vaso de plástico antes y después de llenarse de agua. Fotografía cedida por el Instituto de Óptica. CSIC. J. Montilla y E. Sauras. Holografías: J. Santamaría.

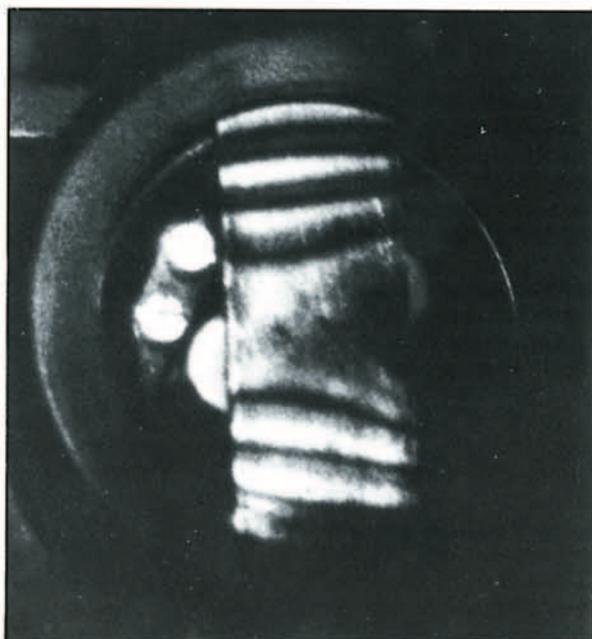


Figura 4. Interferograma holográfico. Vibración de la lámina de un auricular. Fotografía cedida por el Instituto de Óptica. CSIC. J. Montilla y P. Vilarroig. Holografía: J. Santamaría.

Componentes ópticos holográficos. Un holograma de Gabor es en definitiva el holograma de un punto así si se ilumina un holograma de este tipo con una onda plana se obtiene una onda convergente que forma una imagen puntual. En este sentido el holograma se comporta igual que una lente pudiendo sustituir a éstas en muchas aplicaciones en que por ejemplo el peso es crítico.

Redes de difracción. La interferencia de dos ondas planas produce una red sinusoidal que en la lectura concentra la mayor parte de la energía en los primeros órdenes de difracción (ángulos de desviación menores). Si el holograma es de volumen puede concentrarse la energía en un cierto orden lo que hace que estas redes sean de especial utilidad en instrumentos espectroscópicos y en láseres sintonizables.

Deflectores de ángulo variable o barredores. Se pueden generar redes de frecuencia variable localmente. De esta manera se obtiene una desviación variable en función del punto o zona donde incida el haz de iluminación. Si las diferentes frecuencias de distribuyen a lo largo de un anillo circular, el giro del holograma produce una desviación variable periódica o barrido del haz difractado.

Filtros complejos para procesamiento de imágenes. Gran número de operaciones de procesamiento óptico de imágenes se basan en la manipulación de la transformada de Fourier de la imagen que es una función compleja con amplitud y fase. La capacidad del holograma de almacenar la información de fase permite construir filtros para la realización de múltiples operaciones con imágenes tales como mejora de imágenes reconocimiento de formas o caracteres, detección de señales, correlaciones, sustracción, multiplexado, codificado de imágenes, etc.

Almacenamiento de alta densidad. Es una microficha fotográfica cualquier partícula depositada o minúsculo deterioro implica cierta pérdida de información, sin embargo en una imagen holográfica esto sólo genera un ligero aumento de ruido de fondo en la imagen reconstruida lo que representa una ventaja importante para almacenar imágenes. Puede alcanzarse una capacidad de almacenamiento de hasta 2000 letras por milímetro cuadrado. Esta capacidad de almacenamiento hace que los hologramas se empleen para desarrollar discos holográficos y memorias ópticas en computadores.

En la actualidad se están desarrollando cristales ópticos fotorrefractivos en los que la interferencia de las dos ondas genera variaciones locales de índice de refracción, en tiempo real. Se pueden leer entonces en el mismo momento de registro (holografía en tiempo real) lo que permitirá el estudio dinámico de procesos ensanchando ampliamente los campos de aplicación. Debe mencionarse por último que el concepto y aplicaciones de la holografía no se restringe al caso de radiación electromagnética sino que se están desarrollando técnicas de holografía acústica de gran aplicación en medicina (exploración y evolución órganos internos) así como en la industria para ensayos no destructivos. ■

BIBLIOGRAFIA

- "Optical Holography". R.J. Collier, C.B. Burckhardt, L.W. Lin. Academic Press. New York. 1971.
- "Holografía". M. Françon. Ed. Paraninfo. Madrid. 1972.
- "Principles of Holography". John Wiley & Sons Inc. New York. 1975.
- "Holography and Coherent Optics". L.M. Soroko. Plenum Press. New York. 1980.