

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE FRANJAS EN INTEROMETRÍA SPECKLE

Rodrigo Henao y Alexandra Mejía
Universidad de Antioquia, Instituto de Física
A.A. 1226. Medellín (Ant.), Colombia

RESUMEN

Basados en la dispersión de electromagnética de la luz producida por una superficie rugosa se analiza la influencia de la rugosidad sobre la calidad de las franjas obtenidas en interferometría speckle observando la modulación de los speckles. Se muestra que para rugosidades más grandes que la longitud de onda de la iluminación la calidad de la señal depende tanto del ángulo de iluminación como del de observación. La configuración interferométrica utilizada es la de doble haz de iluminación para los casos de sensibilidad en el plano y fuera de él.

INTRODUCTION

La interferometría speckle puede ser usada para la medición de desplazamientos o deformaciones en el plano o fuera del plano, pendientes, forma o rugosidad de objetos con alta precisión. [1-3]. La versión digital llamada interferometría digital de patrones de speckle (digital speckle pattern interferometry: DSPI) se ha convertido en una herramienta poderosa que permite realizar medidas precisas fácilmente [4,5]. Es crítico considerar la influencia de la rugosidad de la superficie sobre la calidad de la señal que se puede obtener en algunos interferómetros de speckle.

Existe en la literatura muchos trabajos que reportan la medición de la rugosidad de la superficie con métodos de speckle, algunos determinando el contraste de los speckles otros el contraste de las franjas de correlación en los montajes interferométricos [6-7]. En este trabajo se considera el contraste de la modulación del speckle obtenido en un montaje de iluminación dual. Se describe el fundamento teórico del método de análisis y se aplica a varias configuraciones de los interferómetros de iluminación dual. El estudio muestra que en el caso de simetría de la iluminación a ambos lados de la normal a la superficie difusora, la rugosidad no juega un papel en la modulación de los speckles. Sin embargo, si el ángulo entre los rayos es diferente, iluminación asimétrica, entonces la rugosidad de la superficie juega un papel importante en la modulación de los speckles cuando el objeto es desplazado.

TEORÍA DE LA MODULACIÓN DE LOS SPECKLES

Si un rayo láser de longitud de onda λ se divide en dos rayos que iluminan un objeto desde los lados de la normal con ángulos θ_1 (rayo 1) y θ_2 (rayos 2) como se muestra en la figura. 1, la luz dispersada a lo largo de la dirección del eje z de las dos ondas coherentes, interfieren. Este montaje con ángulos de iluminación iguales ($\theta_1 = \theta_2$) es bien conocido y ha sido ampliamente usado para la medición de desplazamientos en el plano. Utilizando el formalismo de Beckmann [8] para determinar la amplitud de la luz dispersada del rayo 1

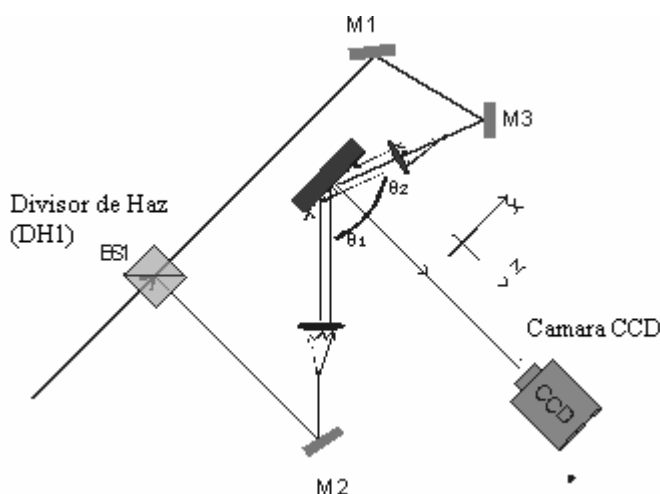


Figura 1. Iluminación desde ambos lados de la normal.

$$A_1 = \left(\frac{A_o F_2}{2L} \right) \int_{-L}^{+L} \exp \{ i [V_x x_1 + V_z \xi(x_1)] \} dx_1 \quad (1)$$

Donde $V_x = \frac{2\pi}{\lambda} [\text{sen} \theta_1 - \text{sen} \theta_{11}]$ y $V_z = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos \theta_1 + \cos \theta_{11}]$ y, A_o es el campo reflejado en la dirección especular por una superficie equivalente, F_2 es un factor puramente geométrico, y $\xi(x)$ es la distribución de las alturas de la superficie. La observación se realiza para una superficie que extiende desde $x = -L$ a $x = L$. Asumiendo que la observación es a lo largo del eje z $\theta_{11} = 0$. Similarmente, la luz dispersada del rayo 2 se puede expresar como

$$A_2 = \left(\frac{A'_o F_2}{2L} \right) \int_{-L}^{+L} \exp \{ i [V'_x x_2 + V'_z \xi(x_2)] \} dx_2 \quad (2)$$

Donde

$V'_x = \frac{2\pi}{\lambda} [-\sin \theta_2 + \sin \theta_{12}] = -\frac{2\pi}{\lambda} [\sin \theta_2]$ y $V'_z = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos \theta_2 + 1]$ y A'_o es un campo reflejado diferente en la dirección especular de una superficie pulida equivalente y será igual a A_o si el ángulo de iluminación es el mismo, θ_{12} es ángulo de observación el cual es cero. La relación entre los campos A'_o y A_o es p . Estas dos ondas dispersadas que se propagan a lo largo del eje z interfieren en el plano del sensor. La intensidad observada es

$$I = \langle |A_1|^2 \rangle + \langle |A_2|^2 \rangle + \langle A_1^* A_2 \rangle + \langle A_1 A_2^* \rangle \quad (3)$$

Es interesante determinar los cuatro factores en la ecuación anterior. Para superficies con rugosidades mucho más grandes que la longitud de onda usada, se puede asumir que las propiedades estadísticas del campo observado en el plano focal de la lente son estacionarias. Los dos primeros términos se pueden escribir como

$$\langle |A_1|^2 \rangle = I_o \quad \text{y} \quad \langle |A_2|^2 \rangle = p^2 I_o \quad (4)$$

La correlación entre los campos dispersados se puede expresar finalmente por

$$\langle A_1^* A_2 \rangle = p \left(\frac{A_o F_2}{2L} \right)^2 2L \frac{T}{\sigma} \left(\frac{\pi}{V_z^2} \right)^2 \exp \left(\frac{-V_x^2 T}{4V_z V'_z \sigma^2} \right) \text{senc}(\Delta V_x L) \exp \left[\frac{-\sigma^2}{2} \Delta V_z^2 \right] \quad (5)$$

donde σ es la desviación estándar de las variaciones de altura de la superficie. En nuestro montaje basado sobre el ángulo de iluminación de los rayos, ciertas cantidades en la ecuación anterior influyen la modulación. Eligiendo $\Delta V_x = 0$ y $\Delta V_z = 0$, ecuación (5) se reduce a

$$I_o = \left(\frac{A_o F_2}{2L} \right)^2 2L \frac{T}{\sigma} \left(\frac{\pi}{V_z^2} \right)^2 \exp \left(\frac{-V_x^2 T}{4V_z V'_z \sigma^2} \right) \quad (6)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5) y (6) en la ecuación 3 se obtiene

$$I = I_o (1 + p^2) \left[1 + \frac{2p}{1 + p^2} \text{senc}(\Delta V_x L) \exp \left(\frac{-\sigma^2}{2} \Delta V_z^2 \right) \cos(\phi) \right] \quad (7)$$

Donde ϕ es la diferencia de fase entre los rayos de iluminación que se produce por la deformación del objeto. Para los interferómetros de iluminación dual se considerara cuatro posibles montajes.

ILUMINACIÓN SIMÉTRICA CON RAYOS A AMBOS LADOS DE LA NORMAL

En este montaje el ángulo de los dos rayos que iluminan el objeto desde ambos lados de la normal es el mismo y el sistema es sensible solamente a movimientos en el plano del objeto. La dirección de observación del objeto es el eje z. Y los rayos permanecen en el plano xz, figura 1. En este caso se tiene entonces que $\Delta V_x = 2 V_x$, $\Delta V_z = 0$ y $p = 1$ para objetos planos. La modulación de los speckles combinados es

$$I = 2I_o [1 + \text{senc}(\Delta V_x L) \cos(\phi)] \quad (8)$$

Esto muestra que la modulación de los speckles es constante para pequeños desplazamientos y es independiente de la rugosidad de la superficie.

ILUMINACIÓN ASIMÉTRICA DESDE AMBOS LADOS DE LA NORMAL

El montaje de la figura 1 pero con los ángulos diferentes, además de los movimientos en el plano, el sistema es sensible también a los movimientos fuera del él. De otro lado, la

sensibilidad a movimientos en el plano es mucho mayor a la de movimientos fuera de él. Se encuentra que $\Delta V_x = \frac{2\pi}{\lambda} [\sin \theta_1 + \sin \theta_2]$ y $\Delta V_z = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos \theta_1 - \cos \theta_2]$ y la ecuación de modulación es

$$I = 2I_0 \left[1 + \text{sinc}(\Delta V_x L) \exp\left(\frac{-\sigma^2}{2} \Delta V_z^2\right) \cos(\phi) \right] \quad (9)$$

Donde p es aproximadamente la unidad. Se puede ver que la modulación del speckle depende ahora de la rugosidad de la superficie del objeto.

ILUMINACIÓN ASIMÉTRICA DESDE EL MISMO LADO DE LA NORMAL

Los dos rayos iluminan desde el mismo lado de la normal al objeto y la diferencia entre ángulos es muy pequeña (Figura 2). En este montaje el sistema es más sensible a los movimientos fuera del plano del objeto contrario al caso anterior. Para este montaje se obtiene $\Delta V_x = \frac{2\pi}{\lambda} [\sin \theta_1 - \sin \theta_2]$ y $\Delta V_z = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos \theta_1 - \cos \theta_2]$ y la ecuación de modulación es

$$I = 2I_0 \left[1 + \text{sinc}(\Delta V_x L) \exp\left(\frac{-\sigma^2}{2} \Delta V_z^2\right) \cos(\phi) \right] \quad (10)$$

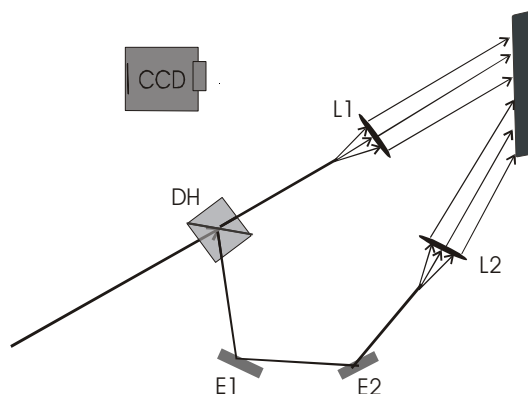


Figura 2. Iluminación dual desde el mismo lado de la normal

ILUMINACIÓN SIMÉTRICA Y OBSERVACIÓN CERCA DE LA REFLEXIÓN ESPECULAR

El montaje se observa en la figura 3. Los dos rayos dispersados y sus reflexiones en la dirección especular se combinan en este sistema, el cual se usa para incrementar la sensibilidad de mediciones en el plano. Los dos rayos que iluminan son 1 y 2, se recoge la reflexión especular de 1 en la dirección de observación 1 y similarmente para el rayo 2. Las

cantidades ΔV_x y ΔV_z se convierten en $\Delta V_z = \frac{4\pi}{\lambda} [\cos\theta_1 - \cos\theta_2]$ y $\Delta V_x = 0$ y la modulación es

$$I = 2I_0 \left[1 + \exp\left(\frac{-\sigma^2}{2} \Delta V_z^2\right) \cos(\phi) \right] \quad (11)$$

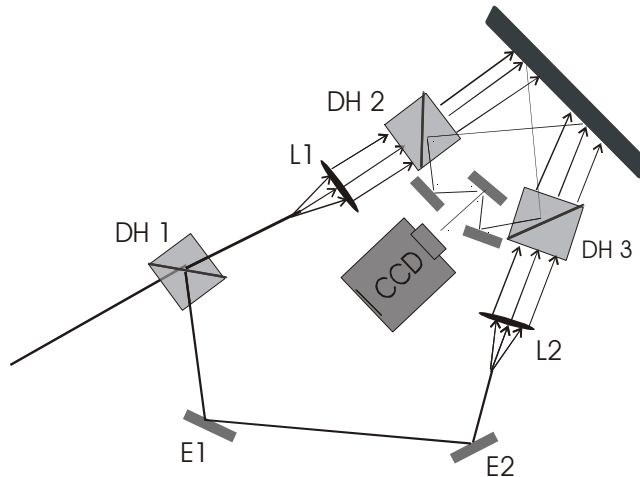


Figura 3. Iluminación ambos lados con observación a lo largo de la reflexión especular.

No existe el efecto de la modulación de la función *senc* para este montaje, para incrementar la sensibilidad en el plano los dos ángulos se hacen iguales.

REFERENCIAS

- [1] R. K. Erf, Speckle Metrology, Academic Press, New York, 1978
- [2] R. Jones and C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry," Cambridge, London, 1983
- [3] R. S. Sirohi, "Speckle Metrology," Marcel Dekker, New York, 1993
- [4] C. Joenathan in Optical methods for testing, ed. P. Rastogi, R. Tech, London, 1997
- [5] M. Takeda and H. Yamamoto, Applied Optics, 33, 7829-7837 (1994)
- [6] D. Leger, E. Mathieu, J. C. Perrin, Applied Optics, 14, 872-877 (1975)
- [7] D. Leger and J. C. Perrin, J. Optical Society of America, 66, 1210-1217 (1974)
- [8] P. Beckmann and A. Spizzichino, "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces," Pergamon Press, Oxford (1963)