

Determinación de la Rugosidad de una Transparencia Mediante Técnicas de Correlación Digital de Speckles

F. Perez Quintián¹, M. Rebollo^{1*}, E. Hogert², M. Landau² y N. Gaggioli^{2**}

1- LAB. LÁSER, DPTO. DE FÍSICA, FAC. DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE BS. AS.,
PASEO COLÓN 850, (1603) BUENOS AIRES.

2- GRUPO DE ÓPTICA Y LÁSER, ENDE, CAC, COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA,
AV. DEL LIBERTADOR 8250, (1429) BUENOS AIRES.
e-mail: mreboll@aleph.fiuba.edu.ar

Resumen: Se presentan dos métodos de correlación digital de speckles para medir la rugosidad de transparencias difusoras. En ambos métodos se parte de la teoría de Beckmann, extendida a transparencias, para describir la distribución de intensidades en el plano de observación.

La técnica de correlación angular de speckles permite obtener la rugosidad de la superficie analizando la decorrelación del speckle al rotar el difusor.

En la otra técnica se sumerge la transparencia en un líquido de índice de refracción variable. Se demuestra que la correlación de intensidades es función de la variación de dicho índice y de la rugosidad. Por lo tanto puede determinarse este último parámetro.

Se comparan ambos métodos y se discuten posibles aplicaciones.

INTRODUCCIÓN

Las figuras de speckle producidas por un mismo difusor bajo condiciones ligeramente diferentes están decorrelacionadas. Midiendo esta decorrelación, se puede obtener información sobre algunas características de la superficie difusora.

El coeficiente de correlación de intensidades está definido por

$$\gamma_{(ab)} = \frac{\langle I_a I_b \rangle - \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle}{\left[(\langle I_a^2 \rangle - \langle I_a \rangle^2) (\langle I_b^2 \rangle - \langle I_b \rangle^2) \right]^{1/2}} \quad (1)$$

donde I_a e I_b son las intensidades transmitidas por el difusor antes y después de modificar el estado de la superficie o el haz incidente.

En la siguiente sección desarrollamos el cálculo de este coeficiente en dos casos particulares: modificando el ángulo del haz incidente y modificando el índice de refracción del medio en contacto con la superficie rugosa.

TEORÍA

Consideremos un esquema geométrico simplificado, en el cual un difusor translúcido (Fig. 1) con índice de refracción n_1 se ilumina con una onda plana coherente, linealmente polarizada. La luz se dispersa en un medio de índice n_2 . Como consecuencia de esto, se produce una figura de speckle en el plano de observación.

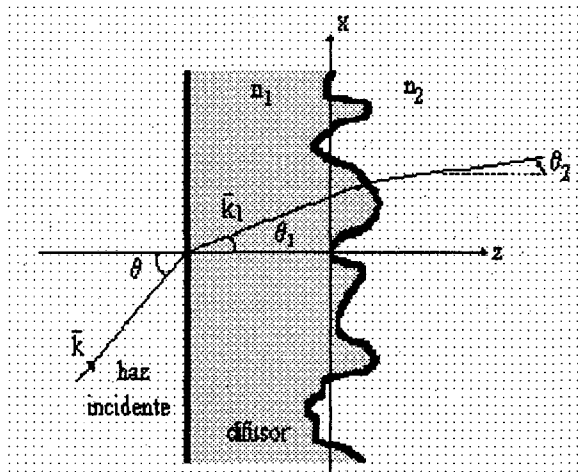


Figura 1.

Utilizando el formalismo de Beckmann⁽¹⁾ desarrollado para este caso^(2,3,4), obtenemos el campo en función de las coordenadas esféricas de la dirección de dispersión (θ_2, ϕ_2) , fijas al difusor:

$$E(\theta_2, \phi_2) = F \iint_{xy} P(x, y) e^{i\vec{v} \cdot \vec{r}} dx dy \quad (2)$$

donde:

* Profesional de Apoyo Carrera CONICET

** Investigador CONICET

$$\bar{v} = k \begin{bmatrix} n_1 \sin \theta_1 - n_2 \sin \theta_2 \cos \phi_2, \\ -n_2 \sin \theta_2 \sin \phi_2, (n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2) \end{bmatrix}$$

$$\bar{r} = (x, y, h(x, y))$$

$$F = \frac{iE_0 \langle T(x, y) \rangle e^{ikn_2 D}}{4\pi D} \cdot k$$

$$\frac{(n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \varphi) n_2 (\cos \varphi + \cos \theta_2)}{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}$$

φ está dado por: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \varphi$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$P(x, y)$: función pupila.

$\langle T(x, y) \rangle$: valor medio del coeficiente de transmisión.

E_0 : amplitud incidente sobre la superficie rugosa.

$h(x, y)$: altura en el punto (x, y) con respecto al plano medio de la superficie.

D : distancia entre el difusor y el plano de observación.

VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA

Si cambiamos ligeramente el ángulo de incidencia θ en una cantidad $\delta\theta$, la figura de speckle se desplazará en un valor $\delta\theta_2$ y la nueva expresión de la Eq. (2) se obtiene reemplazando θ_1 por $\theta_1 + \delta\theta_1$ y θ_2 por $\theta_2 + \delta\theta_2$.

La correlación de estas dos amplitudes, tomando además $\phi_2 = 0$, está dada por:

$$C_E(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2) = \langle E(\theta_2) E^*(\theta_2 + \delta\theta_2) \rangle$$

Cuando el campo es una variable aleatoria compleja circular gaussiana, esta relación permite calcular fácilmente la correlación de intensidades

$$C_I(\theta_2, \theta_2 + \delta\theta_2) = \langle I(\theta_2) I(\theta_2 + \delta\theta_2) \rangle = \langle I(\theta_2) \rangle \langle I(\theta_2 + \delta\theta_2) \rangle + \langle E(\theta_2) E^*(\theta_2 + \delta\theta_2) \rangle^2$$

Con esta expresión, el coeficiente de correlación (1) queda

$$\gamma(ab) = \gamma(\theta, \theta + \delta\theta) = \frac{\langle E(\theta_2) E^*(\theta_2 + \delta\theta_2) \rangle^2}{\sigma_I(\theta_2) \sigma_I(\theta_2 + \delta\theta_2)}$$

donde $\sigma_I = [\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2]^{1/2}$

El cálculo anterior es un tanto extenso⁽⁵⁾, por lo tanto reproducimos aquí el resultado final, posicionándonos en $\theta_2 = \theta$ y $\theta_2 + \delta\theta_2 = \theta + \delta\theta$

$$-\left[k\sigma \sin \theta \left(1 - \frac{\cos \theta}{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta}} \right) \delta\theta \right]^2$$

$$\gamma(ab) = \gamma(\theta, \theta + \delta\theta) = e$$

(3)

donde σ es la desviación cuadrática media de las alturas $h(x, y)$ y se la denomina rugosidad, k el vector de la onda incidente, n_1 el índice de refracción del difusor, θ el ángulo de incidencia inicial y $\theta + \delta\theta$ el ángulo de incidencia después de la rotación. En este caso $n_2 = 1$.

VARIACIÓN DEL ÍNDICE n_2

Si variamos ligeramente el índice de refracción n_2 del medio en contacto con la superficie en una cantidad δn_2 , la figura de speckle se modificará y la nueva expresión de la Eq. (2) se obtiene reemplazando n_2 por $n_2 + \delta n_2$.

El cálculo es similar al de la parte a) de esta sección⁽³⁾, obteniéndose para $\theta_2 = \theta$

$$\gamma(n_2, n_2 + \delta n_2) = e^{-[k\sigma \delta n_2 \cos \theta]^2} \quad (4)$$

con σ , k y θ definidos como antes.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El esquema del dispositivo utilizado para medir la correlación variando el ángulo de incidencia, está representado en la figura 2. Un haz monocromático polarizado incide sobre la cara plana de un difusor a través de una lente convergente L enfocada en el plano de observación. El difusor está montado sobre un goniómetro que permite rotarlo alrededor de un eje que pasa por el plano medio de la superficie difusora. Un detector lineal tipo CCD se coloca en la dirección del haz incidente ($\eta = 0$). Se registra y almacena la figura de speckle inicial y luego se rota la superficie un pequeño ángulo $\delta\theta$, registrando y almacenando la nueva distribución de speckles. Se repite esto último para sucesivos valores de $\delta\theta$. Los datos se correlacionan digitalmente con los iniciales.

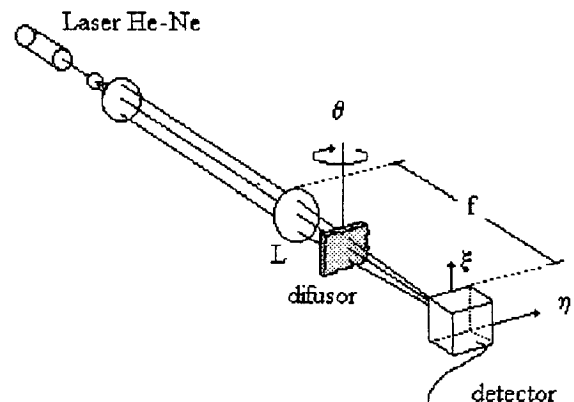


Figura 2.

Para la medición de la correlación variando el índice de refracción, utilizamos una celda, una de cuyas caras es el

difusor, dentro de la que se colocan líquidos con diferentes índices de refracción. Aquí la incidencia es normal (figura 3). El procesamiento de los datos es similar al anterior.

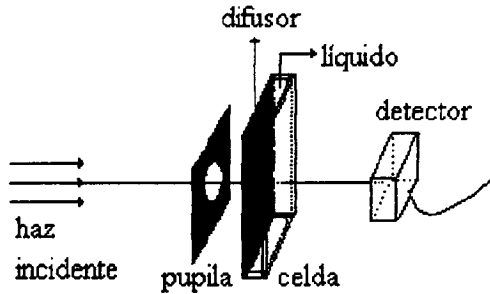


Figura 3.

El valor de la rugosidad se obtiene ajustando los datos experimentales a las curvas teóricas (3) y (4).

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se realizaron mediciones de varios difusores de diferentes rugosidades, en este trabajo se muestran los resultados obtenidos por ambos métodos para una misma muestra. Las figuras 4-a) y 4-b) muestran las curvas de decorrelación.

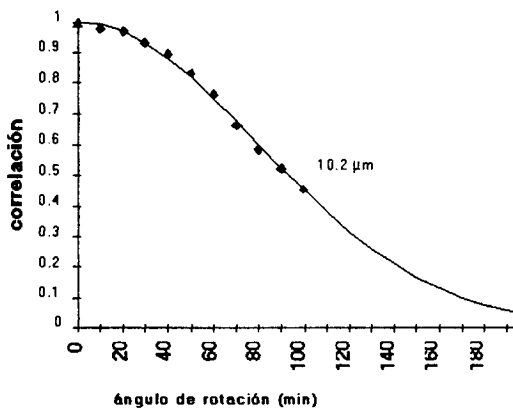


Figura 4 a). Correlación variando el ángulo de incidencia.

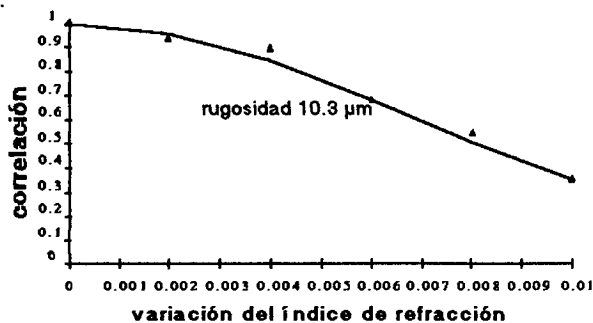


Figura 4 b). Correlación variando el índice de refracción.

Los valores de rugosidad obtenidos por los dos métodos de correlación y por un rugosímetro mecánico se presentan en la tabla 1.

TABLA 1

	rug. mecánico	corr. ángulo	corr. índice
rugosidad	$(10 \pm 1)\mu\text{m}$	$(10.2 \pm 0.5)\mu\text{m}$	$(11 \pm 1)\mu\text{m}$

CONCLUSIONES

Se presentan dos nuevas técnicas para medir rugosidades por el método de correlación digital de speckles. La primera extiende el método de correlación angular de speckles de Lèger⁽⁶⁾ al caso de materiales dieléctricos transparentes. La segunda es una nueva idea que opera sobre la base de la utilización de líquidos de distinto índice de refracción.

Las mediciones hechas con estas dos técnicas coinciden con los valores obtenidos mecánicamente. La última técnica provee una herramienta que permite estudiar superficies de rugosidad variable.

REFERENCIAS

1. Beckmann and A. Spizzichino, "The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces", Pergamon, London (1963).
2. Lefrançois, "Propriétés statistiques de la lumière diffusée en optique cohérente", Notetechnique interne n° EST/DEF/1533, Centre National d'Etudes des Télécommunications (1968).
3. Gaggioli, "Reformulación de algunos resultados de P. Beckmann referentes a la dispersión de ondas electro-magnéticas por una transparencia rugosa", Informe técnico IIBM 03/1980, FIUBA (1980).
4. Perez Quintián, "Estudio de la evolución de la indicatriz de difusión para diferentes cocientes entre la rugosidad y la longitud de correlación cuando se rota la superficie rugosa difusora", Tesis de Licenciatura, FCEyN, UBA (1995).
5. Rebollo, "Estudio de superficies rugosas mediante el análisis del valor medio de la intensidad dispersada y de la correlación de speckles", Tesis doctoral, Fac. de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata.
6. Lèger, E. Mathieu, and J. C. Perrin, "Optical surface roughness determination using speckle correlation technique", Appl. Opt. 14, 872-877 (1975).