

REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE SIMULACIÓN DEL MOTEADO LÁSER EN MEDIOS TURBIOS: APLICACIÓN AL TEJIDO BIOLÓGICO

R. Díaz-Reyes ^a, J. A. Delgado-Atencio^b, M. Cunill-Rodríguez ^c

Universidad Politécnica de Tulancingo, Tul. Hidalgo,

^aroman.diaz@upt.edu.mx, ^bjose.delgado@upt.edu.mx, ^cmargarita.cunill@upt.edu.mx

RESUMEN

La espectroscopia de reflexión difusa, las imágenes multiespectrales y el uso del moteado láser (laser speckle), han sido investigados para fines de diagnóstico y de monitoreo en cuestiones médicas. Los programas de simulación son una excelente alternativa para el desarrollo de nuevos dispositivos con valor diagnóstico que hacen uso del efecto del moteado láser. En el actual trabajo presentamos una revisión preliminar de los programas comerciales y no comerciales, que permiten simular el moteado láser en diferentes escenarios de interés. Los trabajos seleccionados fueron aquellos en los que se simulaba computacionalmente cómo un aspecto real y concreto que produce efectos específicos sobre el patrón de moteado láser. Por ejemplo, el efecto de la rugosidad superficial de una muestra y el desplazamiento de dicha muestra sobre patrón de speckle.

Palabras clave: moteado láser, simulación de LSI, revisión

ABSTRACT

Diffuse reflectance spectroscopy, multispectral imaging and the use of laser speckle, have been investigated for diagnosis and management in medical applications. Simulation programs are an excellent alternative for the development of new devices with diagnostic value that make use of the laser speckle phenomenon. The current work presents a preliminary review of commercial and non-commercial programs, which allow performing laser speckle simulations for different interest purposes. The selected works were those in which the laser speckle was computed simulated as a particular and real aspect that produces specific effects in the laser speckle pattern. For example, the sample surface roughness and the sample displacement effects in the laser speckle pattern.

Keywords: laser speckle, LSI simulation, review

1. INTRODUCCIÓN

Las imágenes de moteado láser (LSI), han sido utilizadas en múltiples técnicas de procesamiento digital en aplicaciones médicas¹. Entre estas técnicas destacan las imágenes de contraste de moteado láser². Una de las aplicaciones biomédicas ampliamente utilizadas de las LSI es la toma de imágenes de la estructura vascular de los tejidos humanos en un

ambiente clínico³. A pesar de que el uso del moteado láser ha sido muy extendido, no ha sido así en el área de la simulación del mismo.

Es necesaria una revisión de los métodos de simulación de este fenómeno y una selección minuciosa de aquellos que pueden constituir una base para continuar con la mejora de estas simulaciones. Existen algunos trabajos donde se realiza la simulación del moteado láser en algunos aspectos como el tamaño de la mancha, el desplazamiento de la muestra o la rugosidad de la superficie. Desafortunadamente, la mayoría estos trabajos no siempre están enfocados en la simulación de dicho fenómeno y aunque se trata este tópico, muchas veces se vuelve tedioso localizarlos, por lo que es necesaria una revisión exhaustiva y una compilación de los trabajos más sobresalientes en el área de la simulación de las motas láser.

En el presente trabajo se muestran las investigaciones de programas comerciales y no comerciales enfocadas simulación del moteado láser. Con el objetivo de seleccionar los mejores trabajos, de acuerdo al criterio de los autores, se realizó una revisión exhaustiva de los programas que simulaban aspectos característicos del moteado láser como: el tamaño de las manchas, el emborronamiento debido a desplazamientos y el retro-esparcimiento. Se presentan cinco trabajos seleccionados donde se simula el moteado láser de acuerdo a las características ya mencionadas.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La invención de los láseres en 1960 proporcionó fuentes de luz de alta intensidad, coherentes, con haces fácilmente direccionables. Estas características de la luz hacen posible un fenómeno óptico conocido como: moteado láser (laser speckle en inglés) o ruido coherente⁴, el cual se puede explicar con el principio de superposición de ondas de Huygens. En la figura 1 se muestra un diagrama fundamental que ilustra la formación de un patrón de moteado láser debido a la rugosidad de una superficie. Los puntos brillantes y oscuros sobre la superficie de la pantalla o sensor, están constituidos por la suma de todas las ondas asociadas a los rayos que interfieren en un mismo punto.

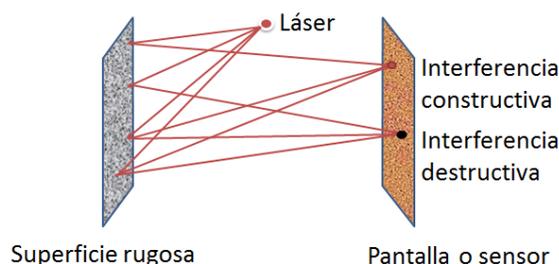


Figura 1: Patrón de ruido coherente, obtenido al iluminar una superficie rugosa en dimensiones de la longitud de onda y observado en un detector

Un arreglo óptico básico de adquisición de imágenes de moteado láser incluye: 1) una fuente de luz monocromática, que ilumina el objeto de estudio, 2) una lente que formará la imagen sobre el detector de la cámara y 3) una cámara para registrar el patrón de moteado láser. Mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes, se puede obtener información del objeto de estudio, tal como es el caso de la perfusión sanguínea de los tejidos biológicos^{5,6},

entre otras aplicaciones. En la figura 2 se muestra una configuración típica de un sistema de adquisición de imágenes de moteado láser.

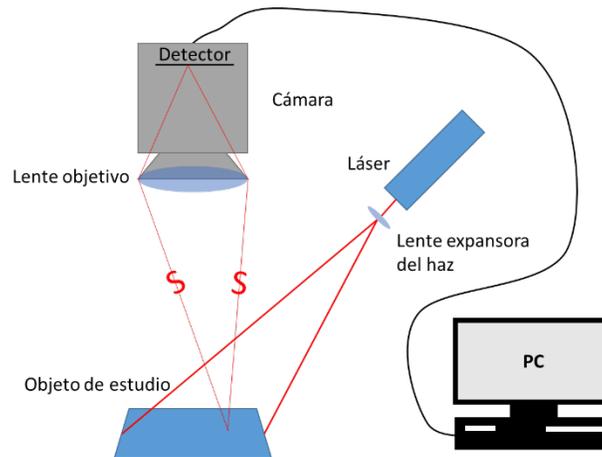


Figura 2: Esquema básico para la adquisición de imágenes de moteado láser, donde se puede observar la fuente de iluminación, la muestra y el sistema de adquisición de imágenes

Analizar la perfusión sanguínea y/o monitorear sus cambios en los tejidos biológicos, proporciona información acerca de las lesiones en diversos órganos y tejidos como la retina, el cerebro y la piel^{1,7-9}, evitando la aparición de daños mayores en ellos, tal como la retinopatía diabética.

Cuando existe movimiento en el objeto de estudio, el patrón de manchas presenta variaciones de intensidad, las cuales pueden ser usadas para obtener información acerca del movimiento que ha originado tal efecto. Estas imágenes procesadas digitalmente son conocidas como imágenes de contraste de moteado láser (LSCI, por sus siglas en inglés), en estas el tiempo de integración de la cámara y la velocidad del objeto o las partículas, serán los factores encargados de producir el emborronamiento dentro de una imagen adquirida. El contraste del moteado láser se define como:

$$C \equiv \frac{\sigma}{\langle I \rangle} = \frac{\sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}}{\langle I \rangle} \quad (1)$$

En un patrón estático de moteado láser con luz perfectamente monocromática, ondas polarizadas y sin ruido, la relación de la desviación estándar σ es igual a la media de la intensidad $\langle I \rangle$ por lo que el contraste del moteado es igual a la unidad, que corresponde al máximo valor para este^{4,9}. El uso extendido de las técnicas de contraste para el moteado láser permite la visualización y cuantificación de fenómenos en el interior de los tejidos como el flujo sanguíneo en tiempo casi real¹⁰⁻¹².

3. MÉTODOS DE SIMULACIÓN DEL SPECKLE

El presente trabajo involucra una búsqueda web exhaustiva de las publicaciones científicas de simulación del fenómeno de speckle láser y una selección de los trabajos que posteriormente los autores seleccionamos debido a que presentan simulaciones que

involucran situaciones reales que influyen en dicho patrón de moteado. Un total de cinco métodos y/o programas de simulación del moteado láser fueron seleccionados y que se presentan a continuación.

3.1 Programas comerciales

3.1.1 Zemax-Python

Sinharoy,¹³ desarrolló una versión no convencional de simulación que permite usar en conjunto el entorno de desarrollo de Python con el de Zemax. Los códigos de programación son de libre acceso de modo que ingresando a la dirección web de la referencia anterior se pueden descargar los archivos para dicha simulación. Este sitio web aparece con el título “Generation of Speckle using Zemax Grid Sag Surface”, y permite simular el patrón de moteado originado por un haz monocromático, que incide sobre una superficie con una rugosidad específica. Para realizar la simulación se necesita tener instalado Jupyter Notebook de Python y Zemax 13^{14,15}. En este programa los datos de entrada son esencialmente: 1) distancia fuente de luz - superficie, 2) longitud de onda de la radiación incidente, 3) perfil de intensidad del haz monocromático, 4) diámetro del haz láser y 5) la rugosidad de la superficie; mientras que se modela el moteado láser en términos de: 1) la distribución de intensidades del patrón de moteado sobre la superficie rugosa y 2) la auto-covarianza de las manchas de dicho patrón. Adicionalmente, también se obtienen dos gráficos correspondientes a: 1) el histograma de las fluctuaciones del hundimiento de la superficie y 2) un gráfico bidimensional de dicho hundimiento.

Para la simulación en Zemax – Python se ingresa la ruta de ubicación de la librería PyZDDE donde también se encontrarán los archivos necesarios para la simulación. El programa consiste, de forma general, en el ingreso de la información en un entorno de desarrollo Jupyter Notebook utilizando el siguiente algoritmo de programación: 1) ingresar las librerías y direcciones necesarias para el uso de Zemax en conjunto con Python, 2) ingresar la tabla de los elementos de acuerdo al editor de datos de Zemax, 3) configuración de las funciones de análisis de la rugosidad, 4) muestra de la forma y tamaño del haz, 5) muestra de las estadísticas de la rugosidad, 6) simulación y visualización del patrón de moteado láser y 7) análisis estadístico del patrón del moteado láser obtenido¹⁵.

3.1.2 Oslo, Trace Pro, Code V

Entre los programas comerciales, también se incluyeron en la búsqueda web, los programas Oslo, Trace Pro y Code V, los cuales al igual que Zemax, son programas de simulación especializados en la rama de la óptica. En este caso no se encontraron trabajos de investigación que se apoyaran de dichos programas de ordenador, para la simulación del moteado láser. Es llamativo el hecho de que, a pesar del uso profesional y la importancia de del moteado láser en muchas aplicaciones, estos programas comerciales no incluyan o hayan sido usados para la simulación del speckle láser.

3.2 Programas no comerciales

A continuación, se describen los programas de simulación del moteado láser que hemos encontrado en la literatura científica que están desarrollados y descritos por investigadores de diferentes grupos de trabajo.

3.2.1 Método Monte Carlo – retro esparcimiento

Meglinski *et al.* han diseñado un sitio web en el que se puede simular de manera gratuita el Retro-Esparcimiento Coherente (CBS, acrónimo de Coherent BackScattering), es decir, el retro-esparcimiento en función del ángulo con el que la luz difusa sale del medio respecto a la normal a la superficie de este. La simulación puede ser multicapa, indicando los parámetros necesarios para dicha simulación, los cuales son los siguientes: μ_s (coeficiente de esparcimiento [mm^{-1}]), μ_a (coeficiente de absorción [mm^{-1}]), g (factor de anisotropía), n (índice de refracción), d (espesor de la capa [mm]). El resultado de la simulación consiste de dos gráficos que muestran la intensidad de la luz retro-esparcida en función del ángulo¹⁶⁻¹⁸ previamente descrito. En un trabajo afin a este tipo de simulación, Doronin *et al.*, mencionan que, mediante el método Monte Carlo, se puede lograr una simulación excepcional para la comprensión de los efectos coherentes del esparcimiento múltiple que está presente en el caso de la formación del moteado láser en el esparcimiento dinámico luminoso¹⁶.

3.2.2 Método Monte Carlo – OCT

Kirillin *et al.*¹⁹ presentan un método Monte Carlo mejorado para simular el seguimiento de la fase de paquetes de fotones y con ello modelar la señal OCT mediante la suma de los paquetes de fotones individuales y un haz de referencia que conducen a un patrón de interferencia. Debido a que el patrón de moteado contiene información de utilidad sobre los tejidos biológicos, en este caso se considera éste como un elemento importante en las imágenes OCT, por esto, se presta atención a realizar simulaciones de dicho patrón. La simulación del sistema OCT se realizó usando un ángulo de apertura de detección de 2° , un haz de sondeo gaussiano con un diámetro de $30 \mu\text{m}$ y un diámetro de apertura de $90 \mu\text{m}$. Se hizo un cálculo de 100 exploraciones con un paso transversal de $10 \mu\text{m}$ para simular la imagen en modo OCT B, correspondiente a la exploración transversal en un sistema OCT. Se adquirieron imágenes experimentales OCT y se simularon modo B de igual manera. La simulación fue elaborada en MATLAB, seleccionando regiones de interés que coincidieran con el phantom, hasta $50 \mu\text{m}$ debajo de la superficie del phantom, con una profundidad axial de $350 \mu\text{m}$ y un ancho de 1mm . Este método Monte Carlo permite analizar la contribución a la señal de los múltiples fotones esparcidos, sobre un sensor. Se observó una buena concordancia entre las estadísticas experimentales y las señales de OCT simuladas por Monte Carlo, lo cual sugiere que este método puede resultar útil para describir y modelar las intensidades de señal de OCT y los patrones de moteado láser en los tejidos biológicos¹⁹.

3.2.3 Modelado de artefactos – Speckle tracking y Doppler multi-apertura OCT

Spahr *et al.*²⁰ simularon patrones de moteado láser para demostrar que en la tomografía de coherencia óptica (OCT), el movimiento lateral determinado mediante el seguimiento de

moteado o mediante Doppler de múltiples aberturas puede proporcionar resultados incorrectos ya que, fuera del plano focal, el movimiento axial no uniforme se malinterpreta como movimiento lateral. En dicho trabajo, demuestran que la suposición de que el movimiento de los puntos del moteado es parecido al de la muestra sólo es válida si se cumple que la profundidad evaluada se visualiza sin aberraciones y que el movimiento axial es igual en todo el campo de visión. La demostración del cumplimiento de estas dos condiciones se realiza simulando patrones de moteado láser que incumplen dichas condiciones. La primera condición se viola, desenfocando el patrón de moteado láser respecto al plano focal en una distancia conocida. Para incumplir la segunda condición, se genera un segundo patrón de moteado desenfocado, en el que las fases aleatorias del fondo ahora decrecen su intensidad hacia los bordes mediante una expresión de gradiente. En dicho trabajo, los autores demostraron que las imágenes Doppler multi-apertura no son robustas contra el desenfoque y no proveen resultados válidos para movimientos axiales no homogéneos independientemente de la posición focal.

3.2.4 Modelado de patrones de moteado correlacionados

Song *et al.*²¹ desarrollaron un trabajo enfocado a la simulación de patrones de moteado a los cuales se les puede definir cierta correlación. El algoritmo de simulación consta de los siguientes pasos: 1) se generan dos matrices bidimensionales, constituidas por fases aleatorias con valores dentro del intervalo $(-\pi, \pi)$, 2) se usa un método cópula simple para correlacionar las dos matrices y 3) se obtiene el patrón de moteado final correlacionado aplicando la transformada de Fourier al patrón de moteado resultante del paso anterior, multiplicando ese resultado por la función de la pupila óptica, y obteniendo el módulo al cuadrado de la transformada inversa de dicho producto. A partir de los resultados simulados y experimentales, los autores concluyen que este método es una forma conveniente para la simulación de experimentos reales relacionados con el moteado láser y que también es de utilidad en la evaluación de técnicas de procesamiento digital.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo se enfoca principalmente a una revisión preliminar de los elementos básicos del origen del moteado láser y la modelación computacional de dicho fenómeno. Las diversas aplicaciones del moteado láser han contribuido a la necesidad de la simulación de dicho fenómeno, para fines educativos, así como analíticos. Sin embargo, aún no se cuenta con un documento guía unificado para la simulación del moteado láser que abarque el gran número de situaciones prácticas posibles. En este trabajo, se han presentado algunos métodos de simulación que abordan situaciones de aplicaciones reales. Consideramos que las referencias identificadas y listadas en este trabajo resultan ser información de valor didáctico para el lector que se inicia en este campo de investigación, especialmente cuando se trata de la simulación del moteado laser debido al esparcimiento superficial por rugosidad del medio o al esparcimiento volumétrico en el interior de medios turbios como es el tejido biológico. Esta revisión constituye un primer acercamiento, por parte de nuestro grupo de trabajo, a un tema de investigación que, aunque ya es maduro, permite realizar todavía contribuciones importantes en aplicaciones clínicas por su versatilidad y fácil implementación.

5. REFERENCIAS

- [1]. Basak, K., Manjunatha, M., Kumar, P.D., “Review of laser speckle-based analysis in medical imaging,” *Med Biol Eng Comput.* 50:547–558 (2012).
- [2]. Boas, D. A., Dunn, A. K., “Laser speckle contrast imaging in biomedical optics,” *Journal of Biomedical Optics.* Paper 09230SSR (2009).
- [3]. Senarathna, J., Rege, A., Li, N., Thakor, N.V., “Laser Speckle Contrast Imaging: Theory, Instrumentation and Applications,” *IEEE. RBME.2013.2243140* (2013).
- [4]. Pham, T., [Computational Biology: Issues and Applications in Oncology], Springer, South Wales Canberra, Australia, 10.1007/978-1-4419-0811-7 (2009).
- [5]. Dainty, J. C., [Laser Speckle and Related Phenomena], Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, New York, DOI 10.1007/978-3-662-43205-1 (1975).
- [6]. Draijer, M., Hondebrink, E., Van Leeuwen, “Review of laser speckle contrast techniques for visualizing tissue perfusión,” *Lasers Med Sci.* 24:639–651 (2009).
- [7]. Sugiyama, T., Araie, M., Riva, C. E., “Use of laser speckle flowgraphy in ocular blood flow research,” *Acta Ophthalmologica*, doi: 10.1111/j.1755-3768.2009.01586.x (2010).
- [8]. Briers, D. J., “Laser speckle contrast imaging for measuring blood flow,” *Optica Applicata*, Vol. XXXVII, No. 1–2 (2007).
- [9]. Vaz, G. P., Heurtier, A. H., Figueiras, E., Correia, C., Cardoso, J., “Laser speckle imaging to monitor microvascular blood flow: a Review,” *IEEE Reviews in Biomedical Engineering.* DOI 10.1109/RBME.2016.2532598 (2015).
- [10]. Tiziani, H. J., Pedrini G., “From speckle pattern photography to digital holographic interferometry [Invited],” *Optical Society of America.* ID 174743 (2012).
- [11]. Regan, C., Hayakawa, C., Choi, B., “Momentum transfer Monte Carlo for the simulation of laser speckle imaging and its application in the skin” *Biomedical Optics Express* 5708, 10.1364/BOE.8.005708 (2017).
- [12]. Khaksari, K., Kirkpatrick, S. J., “Laser Speckle Modeling and Simulation for Biophysical Dynamics: Influence of Sample Statistics,” *JBPE* 3(4) (2017).
- [13]. Sinharoy, I., “Generation of speckle pattern using Zemax's Grid sag Surface,” 27 Diciembre 2015, <https://github.com/xzos/PyZDDE/blob/master/Examples/IPNotebooks/> (20 Mayo 2019).
- [14]. Comunicación personal con el autor vía correo electrónico.
- [15]. Sinharoy, I., “Python Zemax Dynamic Data Exchange,” 2 Octubre 2016, <https://github.com/xzos/PyZDDE#python-zemax-dynamic-data-exchange> (20 Mayo 2019).
- [16]. Doronin, A., Radosevich, A., “Two electric field Monte Carlo models of coherent backscattering of polarized light”, *OSA Journal A*, Vol. 31, pp. 2394-2400 (2014).
- [17]. Meglinski, I.V., Kuzmin, V.L., “Monte Carlo Simulation of Coherent Effects in Multiple Scattering”, *Proceeding of Royal Society A*, Vol.461, No.:2053 (2005).

- [18]. Kuzmin, V.L., Meglinski, I.V., Churmakov, D.Y., “Stochastic Modeling of Coherent Phenomena in Strongly Inhomogeneous Media”, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, Vol.101, No.:1, pp.22-32 (2005).
- [19]. Kirillin, M. Y., Farhat G., “Speckle statistics in OCT images: Monte Carlo simulations and experimental studies,” OSA. 0146-9592/14/123472-04 (2014).
- [20]. Spahr H., “Artifacts in speckle tracking and multi-aperture Doppler OCT imaging of lateral motion,” *Optical Society of America*. 0146-9592/19/061315-04 (2019).
- [21]. Song, L., “Simulación de patrones moteados con distribuciones de correlación predefinidas,” *Biomedical Optics Express*, DOI:10.1364/BOE.7.000798 (2015).