

Mediciones de Ghost Imaging basado en correlaciones espaciales a bajo costo

Mateo Laguna Guantiva
201414158

Departamento de Física
Universidad de los Andes

29 de noviembre de 2018

Resumen

Ghost Imaging consiste en la reconstrucción de la imagen de un objeto sin haber sido observado; el fundamento de esta técnica es la luz y sus correlaciones espaciales. Este proyecto busca implementar la técnica clásicamente (i.e. usando una fuente de luz pseudo-térmica) e investigar si es posible la transmisión de información a través de ésta. El montaje experimental inicial no logra medir la curva $g^{(2)}(\tau)$ la cual es fundamental para la técnica de Ghost Imaging; por lo tanto, se implementan vías alternas como la medición sin lente y con lente de $f = 300 \text{ mm}$ variando en cada toma los diferentes parámetros del sistema (e.g. muestras por barrido, número de pasos) para lograr obtener la función de correlación espacial de segundo orden. Sin embargo, no se obtiene la curva de correlación espacial esperada. Se plantea un método adicional: el cambio de los fotodiodos por los detectores de fotones individuales para lograr obtener la curva gaussiana de correlación espacial para una luz pseudo-térmica, y de esta forma, realizar la medición de Ghost Imaging. No hay resultados aún del último método propuesto.

1. Introducción

La transmisión de información ha sido un asunto de gran importancia a lo largo de toda la historia. Desde los primeros pictogramas hechos por el hombre prehistórico, los jeroglíficos de los egipcios, el proceso de fabricación del papel por parte de los chinos, la imprenta en Europa, hasta la creación del internet en nuestros días. El proceso de comunicación ha ido evolucionando con el pasar de los años hasta tal punto que la comunicación global actualmente es casi instantánea. Así, el momento en el que el hombre utilizaría una de las teorías físicas más exitosas, como lo es la mecánica cuántica, para lograr una mejor transmisión de la información, no demoraría.

Así nació en la década de los 90's la revolucionaria idea de transmitir información a través de la luz

[1]. A la técnica se le llamó *Ghost Imaging*, pues la idea general es transmitir imágenes sin verlas, como su analogía intenta explicar, el fantasma se transmite, pero no se ve. La técnica se basaba completamente en las propiedades cuánticas de la luz, pero años más tarde llegaron otras investigaciones que aseguraban que la técnica no era exclusivamente del campo de la mecánica cuántica, sino que también podía ser implementada y explicada con física clásica [2] [3].

Sin embargo, la implementación de la técnica clásicamente ha sido siempre un dolor de cabeza, pues su costo financiero es elevado, se requieren cámaras que pueden llegar a precios de hasta 10.000 USD. Este proyecto busca implementar la técnica de una manera *low cost* (i.e. menos de 50 USD). La pregunta que surge inmediatamente es *¿podrá esta implementación a bajo costo transmitir información usando el*

mismo principio del Ghost Imaging con correlaciones espaciales?

Instituciones como el Laboratorio de Investigaciones del Ejército de los Estados Unidos está invirtiendo en esta técnica con propósitos de innovación militar [9]. No obstante, la técnica cuántica tiene muchas más restricciones por las condiciones que se requieren para llevarse a cabo, lograr implementar la técnica clásica con los mismos resultados que la cuántica a **bajo costo** representaría un gran interés tanto para la academia como para la industria.

No obstante, para poder dar respuesta a la pregunta central de este documento es necesario establecer una condición experimental previa: la curva de correlación espacial de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$. La técnica de Ghost Imaging se basa fundamentalmente en esta curva, pues es través de las correlaciones espaciales de la luz que se logra reconstruir la información que se envió entre los brazos ópticos del montaje. Así, antes de realizar la medida de Ghost Imaging se debe contar con esta curva.

Por lo tanto, a pesar de que el objetivo principal de este artículo sea lograr la transmisión de información a través de la técnica de Ghost Imaging usando correlaciones espaciales, se debe cumplir otro objetivo previo: lograr obtener la curva de correlación espacial de segundo orden, la cual, se obtiene después de haber estudiado y entendido cómo se realizan las mediciones de correlaciones espaciales en el laboratorio.

2. Estado del arte y marco de referencia matemático

La primera demostración de la técnica de Ghost Imaging se realizó en 1995 [1] haciendo uso de correlaciones cuánticas de la luz. Años más tarde, fueron publicados experimentos donde se demostraba que la técnica podía ser implementada sin recurrir a las propiedades cuánticas de la luz, sino únicamente a correlaciones clásicas tanto temporales como espaciales [2] [3] [4]. Así, inició el estudio de los montajes experimentales que hacían uso de una fuente de luz *pseudo-térmica* que permiten la implementación de la técnica

basado en correlaciones clásicas [5] [6].

La técnica de *Ghost Imaging* empezó a ganar más y más popularidad entre el gremio científico desde sus inicios hasta la actualidad donde continua el debate sobre los fundamentos físicos de la técnica [7]. Han habido variantes del experimento como lo es en el caso de la técnica implementada desde la computación [8]; también han existido múltiples aplicaciones para la técnica en el sector industrial, militar, etc [9] [10]. Sin embargo, existe algo común en la mayoría de implementaciones de la técnica y es que a pesar de su gran fama, su implementación siempre tiene un costo bastante elevado. El montaje experimental consta de cámaras que pueden llegar a costar varios miles de dólares.

Pocos estudios han abordado la manera de hacer que la técnica del *Ghost Imaging* se vuelve más accesible financieramente lo cual es de vital importancia para centros de investigación (como universidades) con recursos limitados. Una de las aproximaciones más cercanas se encuentra en [11] donde logran un montaje que permite obtener imágenes de buena calidad a bajo costo basado en la técnica en su versión computacional. Por este motivo, este proyecto busca implementar el *Ghost Imaging* a bajo costo usando una fuente de luz pseudo-térmica (no es fundamental entender la física detrás de este tipo de fuentes para este documento, no obstante para el lector que desee una definición formal y más específica de lo que significa el término *luz pseudo-térmica* veáse [12]) para así lograr un montaje experimental de la técnica viable financieramente pues es relevante para centros académicos con recursos limitados; el objetivo es poder hacer experimentación e investigación con un montaje que tenga las mismas características de un montaje de alto costo.

Además de explicar cómo ha evolucionado la técnica, es necesario estudiar lo que es la función de correlación espacial de segundo orden, pues se basa en ésta. Según [13] *La función de correlación es una función que cuantifica la relación entre variables aleatorias separadas en un intervalo espacial o temporal*. Aún más, según [13] de nuevo, $g^{(1)}(\tau)$ *cuantifica la manera en que el campo eléctrico fluctúa en el tiempo*,

mientras que $g^{(2)}(\tau)$ cuantifica la intensidad de las fluctuaciones.

La expresión matemática para la función de correlación de segundo orden es ($I(t)$ representa la intensidad de la luz y $\langle f \rangle$ representa el promedio de la función f):

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle^2} \quad (1)$$

Para el caso de una haz de luz como un láser que tiene un tiempo de coherencia muy largo se satisface que $g^{(2)} = 1$, es decir, una recta. Para el caso de una luz pseudo-térmica que tiene tiempos de coherencia lo suficientemente largos como para ser medidos experimentalmente se espera que se satisfaga que $g^{(2)}$ es una curva gaussiana según la literatura [13].

3. Marco Experimental

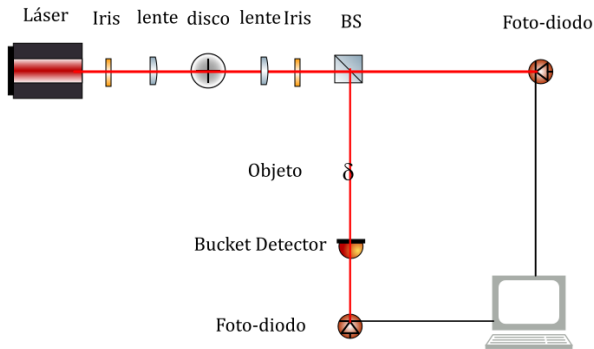


Figura 1: Diagrama del Montaje Experimental

A continuación se explicará cómo funciona el montaje de la Figura 3. La luz sale del **láser** (que tiene una longitud de onda de $\lambda = 633 \text{ nm}$) y atraviesa un primer **iris** (estos elementos ópticos funcionan como el iris del ojo, de ahí su nombre, permitiendo al abrirse o cerrarse dejar pasar o menor cantidad de luz), luego pasa a través de un **lente** que tiene una distancia focal de 30 mm, éste se encarga de hacer converger

los haces de luz en un sólo punto. Luego, la luz llega al **disco giratorio** opaco que se mueve alimentado por una fuente del laboratorio suficientemente buena para no calentarse durante largos periodos de trabajo; en esta parte del montaje experimental se produce el efecto de la luz *pseudotérmica* pues el disco al girar y dejar pasar la luz por un pequeño orificio hace que ésta se abra en varios puntos similar a una ventana recubierta de muchas gotas. (Este proceso de lograr una fuente de luz pseudotérmica con todo su análisis físico se puede encontrar en [14] mucho más detallado)

Al pasar por el disco, la luz atraviesa un **lente** que cumplirá la labor de tener el efecto 2f (i.e. far field) necesario para la técnica implementada clásicamente [14], aquí nuevamente la luz vuelve a converger en un sólo haz, luego pasará por un segundo **iris** y llegará al **beam splitter** que se encarga de dividir el haz de luz en dos haces con trayectorias diferentes. En uno de los brazos ópticos se deja pasar la luz sin ningún obstáculo y se escanea con los **foto-diodos** la luz que llega a cada punto espacial tal que cubra todo el haz de luz entrante. En el otro brazo óptico se pondrá el **objeto** del cual vamos a reconstruir la imagen con la técnica y después de atravesarlo se pasa por otro lente que haga converger la luz una última vez para luego finalmente atravesar por un **bucket detector** que reúne toda la información del objeto en un sólo punto espacial para que el otro **foto-diodo** pueda recibirla.

Por último, se deja el montaje listo, se apagan todas las luces del laboratorio y se procede a iniciar el experimento usando el software desde el computador. Al cabo de un tiempo de aproximadamente media hora (pues se hace un promedio de 100 mediciones por cada 0.5 mm de barrido para una mejor resolución) se obtienen las gráficas de intensidad y correlaciones. (Para un análisis mucho más formal y específico de la óptica detrás del experimento véase [14] donde dan paso a paso la explicación del Ghost Imaging para el caso de luz pseudo-térmica)

Calibraciones

Uno de los puntos más difíciles de lograr la implementación del Ghost Imaging clásicamente es la

caracterización de la luz *pseudo-térmica*, pues se necesita saber que efectivamente se está trabajando con este tipo de luz para poder utilizar la óptica clásica para explicar el fenómeno. Esta caracterización se hace un proceso tedioso y complicado debido a la calibración del montaje experimental: las distancias entre los elementos ópticos, la velocidad de giro del disco, las distancias focales de los lentes, etc. (Todo este proceso de calibración se puede ver en [14]).

4. Resultados

Los resultados expuestos a continuación buscan obtener la función de correlación espacial de segundo orden que en una fuente de luz pseudo-térmica es una curva $g^2(\tau)$ **gaussiana** (esto es crucial porque por ejemplo, el modelo estadístico que satisface un láser no es el mismo modelo estadístico que satisface una luz pseudo-térmica (para conocer más acerca de la física estadística detrás de los diferentes tipos de luz véase [15])).

Es por esto que el proyecto ha dado un giro inesperado y está en una etapa previa que no se había contemplado: *la caracterización de la fuente de luz pseudo-otérmica*. Sin el desarrollo correcto de esta etapa no se puede avanzar a la implementación de la técnica del Ghost Imaging usando este tipo de fuente de luz debido a que la curva que va a permitir observar el fenómeno del Ghost Imaging es la curva de correlación espacial de segundo orden (también conocida como $g^2(\tau)$). Si no se logra visualizar la curva $g^2(\tau)$ para una fuente de luz pseudo-térmica, no se logrará implementar la técnica del Ghost Imaging.

Las primera medición hecha fue con el montaje que se tiene en la Fig 3 y el resultado es la Fig 2 (a), como se puede observar no satisface ser una curva gaussiana. Lo que se intenta es modificar los parámetros de la medición. La Fig 2 (b) tiene el parámetro $p_1 = 50$ y la Fig 2 (c) tiene el parámetro $p_1 = 100$.¹ (este parámetro es muy importante en términos estadísticos porque es el que permite realizar una estadística

¹ p_1 es la cantidad de muestras por barrido. Es decir, la cantidad de mediciones que hace el fotodiodo al detenerse en una posición.

con los datos, tomar una sola muestra en cada coordenada sería muy pobre en términos estadísticos para poder trabajar con los datos, por ende, a mayor cantidad de tomas, mejor se pueden trabajar los datos) A estas medidas se les llamo medidas rápidas debidas a que el parámetro $p_2 = 200$,² es decir, el barrido será rápido.

Como estas mediciones no permitieron obtener la curva de correlación espacial de segundo orden necesaria se decidió introducir otro lente con distancia focal de 300 mm por el siguiente argumento: los saltos que está dando el foto-diodo son tan grandes que no están viendo el pico fino de la curva gaussiana.

La variable θ es proporcional a la variable q conjugada por medio de la siguiente relación:

$$q = \frac{2\pi}{\lambda f} x \quad (2)$$

$$x = \frac{\lambda f}{2\pi} q \quad (3)$$

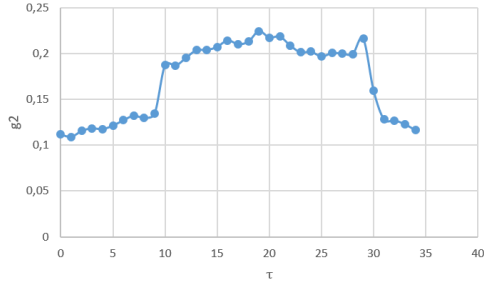
Lo que significa que si se incrementa el parámetro f del lente incrementará el x que es la distancia del pico de la gaussiana que se desea ver. Los resultados que se obtuvieron de este nuevo método para la curva gaussiana de correlación espacial fueron:

Como se puede observar en la Fig 4 no se obtiene el pico de la curva gaussiana que se espera obtener.

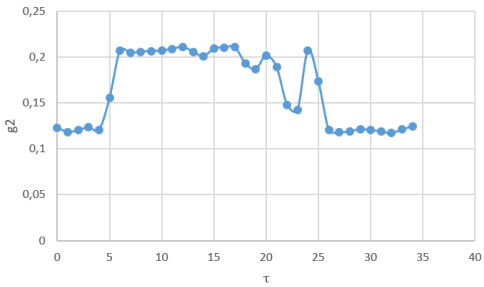
5. Conclusiones y trabajo futuro

- 1: La explicación de la técnica de *Ghost Imaging* puede darse desde las propiedades cuánticas de la luz [1], como también desde la física semi-clásica [2] [3] al punto donde ambas interpretaciones pueden coexistir sin conflictos físicos tal como explica [16].

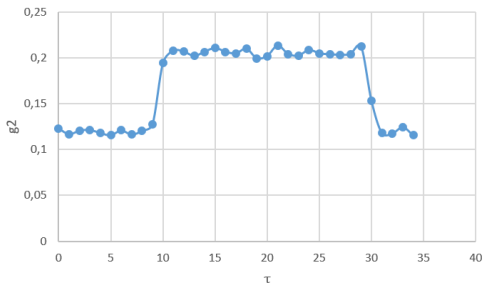
² p_2 es el número de pasos que da el fotodiodo, es inversamente proporcional a la distancia del diámetro del fotodiodo



(a) Medida sin lente con $p_1 = 20$, $p_2 = 200$



(b) Medida sin lente con $p_1 = 50$, $p_2 = 200$



(c) Medida sin lente con $p_1 = 100$, $p_2 = 200$

Figura 2: Medidas sin lente variando el parámetro p_1 de la curva $g^{(2)}(\tau)$

- 2: La técnica de Ghost Imaging está siendo fuertemente investigada para lograr aplicaciones industriales y militares [9] [10].

El trabajo que se está realizando actualmente en el laboratorio es cambiar los foto-diodos por detectores de fotones individuales para lograr obtener la curva gaussiana de correlación temporal y así poder hacer las mediciones de Ghost Im-

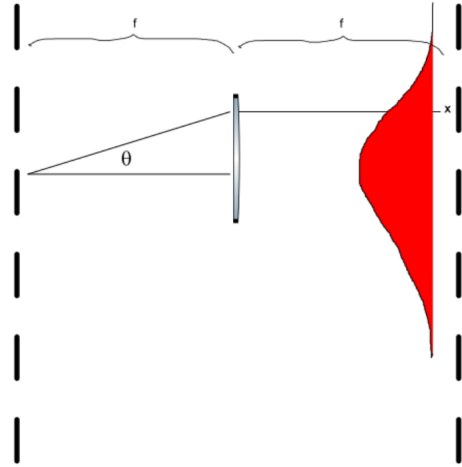
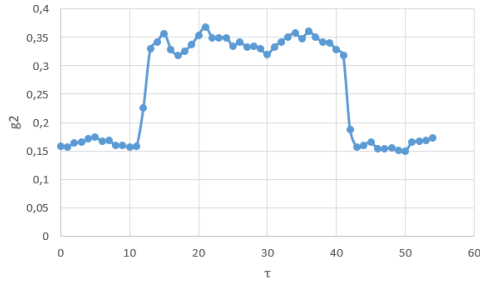


Figura 3: Justificación del nuevo lente introducido en el montaje (f es la distancia focal, θ el ángulo de desvío y x distancia del barrido)

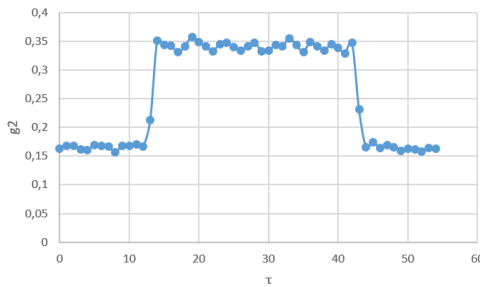
ging. La idea de hacer esta modificación es por los resultados presentados por [5] donde logran la medición con estos equipos experimentales.

Referencias

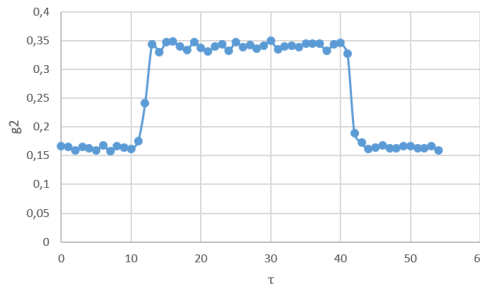
- [1] Pittman, T. B., et al. «Optical Imaging by Means of Two-Photon Quantum Entanglement». *Phys. Rev. A*, **52**, R342932, (noviembre de 1995).
- [2] Gatti, A., et al. «Ghost Imaging with Thermal Light: Comparing Entanglement and Classical Correlation». *Phys. Rev. Lett.*, **93**, R093602, (agosto de 2004).
- [3] O'Sullivan, Malcolm N., et al. «Comparison of the Signal-to-Noise Characteristics of Quantum versus Thermal Ghost Imaging». *Phys. Rev. A*, **82**, R053803, (noviembre de 2010).
- [4] Gatti, A., et al. «Entangled Imaging and Wave-Particle Duality: From the Microscopic to the Macroscopic Realm». *Physical Review Letters*, **90**, 133603. (abril de 2003)



(a) Medida con lente con $p_1 = 20$, $p_2 = 200$



(b) Medida con lente con $p_1 = 50$, $p_2 = 200$



(c) Medida con lente con $p_1 = 100$, $p_2 = 200$

Figura 4: Medidas con lente variando el parámetro p_1 de la curva $g^{(2)}(\tau)$

- [5] Valencia, Alejandra, et al. «Two-Photon Imaging with Thermal Light». *Phys. Rev. Lett.*, **94**, R063601, (febrero de 2005).
- [6] Moreau, Paul-Antoine, et al. «Ghost Imaging Using Optical Correlations». *Laser & Photonics Reviews*, **12**, 1700143, (enero de 2018).
- [7] Shapiro, Jeffrey H., et al. «Ghost Imaging wit-

hout Discord». *Scientific Reports*, **3**, 01849. (diciembre de 2013)

- [8] Shapiro, Jeffrey H. «Computational Ghost Imaging». *Physical Review A*, **78**, 061802. (diciembre de 2008)
- [9] McCaney, By Kevin. 2014 Jan 06. «ARL's 'Ghost Imaging' Cuts through Battlefield Turbulence -». Defense Systems, <https://defensesystems.com/articles/2014/01/06/ar1-quantum-ghost-imaging.aspx>. Accedido 9 de septiembre de 2018.
- [10] Kong, Ling-Jun, et al. «Encryption of Ghost Imaging». *Physical Review A*, **88**, 013852. (julio de 2013)
- [11] Welsh, Stephen S., et al. Multi-wavelength compressive computational ghost imaging. *Editado por Michael R. Douglass y Patrick I. Oden*, 2013, p. 86180I.
- [12] «Photon Statistics. Experiment 45». *Advanced Lab Course(F-Praktikum)*. Universitat Erlangen-Nurnberg. 2017
- [13] M. Fox. Quantum Optics. An Introduction. Ed. por Oxford University Press. Department of Physics y Astronomy. University of Sheffield., 2006.
- [14] Gatti, A., et al. «Coherent Imaging with Pseudo-Thermal Incoherent Light». *Journal of Modern Optics*, **53**, n.o 5-6. (marzo de 2006), pp. 739-60.
- [15] Dainty, J. C., editor. «Laser Speckle and Related Phenomena». **9**, Springer Berlin Heidelberg, 1975.
- [16] Shapiro, Jeffrey H., y Robert W. Boyd. «The Physics of Ghost Imaging». *Quantum Information Processing*, **11**, n.o 4, (agosto de 2012), pp. 949-93.