

Análisis del ruido: Desde lo clásico a lo cuántico.

Juan David Salamanca Castillo
201718401

Directora: Alejandra Catalina Valencia Gonzalez

Codirector: Alonso Botero Mejia

17 de agosto de 2021

1. Introducción

El ruido en física e ingeniería se define como una señal no deseada que interfiere en la comunicación, medición, percepción o procesamiento de una señal que porta información. Es de interés el análisis del ruido debido a que en múltiples escenarios es necesario reducirlo y en otros puede ser usado para entender características de la fuente de dicho ruido [1].

Se estudian dos tipos de ruidos, el ruido clásico y el ruido cuántico. Se entiende al ruido clásico como una señal indeseable producto de las imperfecciones de los elementos de medición. Por otro lado, el ruido cuántico se entiende como el ruido que es producto de la naturaleza estocástica de los procesos cuánticos. Además, el ruido clásico puede ser reducido mediante la implementación de distintas técnicas, mientras que el ruido cuántico representa un límite fundamental.

Por otro lado, en el contexto del ruido cuántico existen dos tipos de ruido, el asociado al *Quantum Noise Limit* (QNL) y el *shot noise*. El QNL es una consecuencia directa del principio de incertidumbre de Heisenberg. Por ejemplo, se encuentra presente en la medición de cuadraturas (fase y amplitud) de la luz, en donde es posible asociar un operador a cada cuadratura y así construir una relación de incertidumbre que impone el QNL en la precisión de las medidas [3]. Por otro lado, el shot noise [4] aparece debido a la naturaleza corpuscular y estocástica de procesos como el efecto fotoeléctrico; este tipo de ruido tiene un efecto que es más notorio en medidas de conteo de fotones de baja probabilidad de ocurrencia y en las medidas de corrientes de poca intensidad. El shot noise es ineludible y no es una propiedad de los detectores, sino que es una consecuencia de las fluctuaciones de intensidad de las fuentes de corriente o de fotones. En cambio, el QNL puede ser esquivado utilizando las técnicas apropiadas. Por ejemplo, la *luz squeezed* puede ser usada para disminuir el ruido en una cuadratura del campo

electromagnético a expensas de aumentarlo en la otra (debido naturaleza de los operadores de cuadratura [3]). Este efecto es el que se ha usado para la detección de ondas gravitacionales usando el interferómetro LIGO [5].

A pesar de que el ruido es una señal indeseada en la mayoría de los casos, en algunos ha resultado beneficioso. Un ejemplo del uso del ruido es la investigación de la estructura del universo mediante el análisis del fondo cósmico de microondas [6], descubierto en 1964 por Penzias y Wilson [7]. El fondo cósmico fue descubierto como un ruido de radiación electromagnética detectado en antenas, el cual concuerda con lo predicho por la teoría del big bang. Otro ejemplo de extracción de información del ruido se encuentra en la física del estado sólido, en donde el ruido medido por medio del voltaje de un resistor, se obtiene debido a las agitaciones térmicas de la materia, las cuales revelan propiedades del material e incluso permite medir la constante de Boltzmann [8].

Por otro lado, hay casos en los que el ruido resulta ser un impedimento y por lo tanto hay que reducirlo. En el contexto clásico se ha utilizado el análisis estadístico de las señales con el fin de minimizarlo. En el contexto cuántico, la detección de ondas gravitacionales se lleva a cabo mediante el uso de un interferómetro de Michelson y el uso de luz squeezing [9]. Además, en los últimos años se ha buscado implementar técnicas de machine learning para esta reducción [10].

El objetivo de esta monografía es entender de forma teórica y operacional el concepto de ruido en el contexto cuántico y clásico y su reducción en experimentos con luz. Con respecto a la reducción del ruido, se estudiarán métodos estadísticos de análisis de señal y se complementarán con el estudio e implementación de técnicas de machine learning. En particular, con machine learning se propone el reconocimiento del ruido introducido por un canal cuántico.

2. Objetivo General

Entender y caracterizar los diferentes tipos de ruido, en experimentos de mediciones de luz, así como la implementación de técnicas experimentales y computacionales para su reducción.

3. Objetivos Específicos

1. Caracterizar y entender de manera teórica y operacional el concepto de ruido clásico y cuántico en montajes ópticos.
2. Estudiar y aplicar las técnicas experimentales para reducir el ruido clásico y cuántico en el contexto de mediciones de la luz,

3. Aplicar técnicas de machine learning para la reducción de ruido clásico y cuántico en el contexto de las mediciones de la luz. Específicamente se plantea empezar por caracterizar el ruido introducido por un canal cuántico.

4. Marco teórico

4.1. Definiciones

La densidad espectral es una función que muestra cual es la distribución de energía o potencia en una señal dependiendo de la frecuencia. En el caso continuo, la densidad espectral $S(f)$ se puede definir como la magnitud al cuadrado de la transformada de Fourier de una señal $x(t)$, es decir:

$$S(f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i2\pi ft} x(t) dt \right|^2. \quad (1)$$

Para el caso de una señal discreta la transformada de Fourier pasa al dominio discreto. Por otro lado, la función de autocorrelación $r(j)$ es útil para detectar patrones en señales aparentemente aleatorias y en el caso discreto se define de la siguiente forma:

$$r(j) = \sum_n x_n x_{n-j}, \quad (2)$$

donde x_n es un punto de la señal en la serie temporal. La función de autocorrelación y la densidad espectral se encuentran relacionadas mediante la transformada de Fourier, según el teorema Wiener-Khinchin [2].

5. Metodología

Para lograr el objetivo general de este proyecto se utilizarán los elementos ópticos previamente disponibles del laboratorio de óptica cuántica (Q-402) de la Universidad de los Andes.

Con el fin de cumplir con el objetivo específico 1 se llevará a cabo una revisión bibliográfica con el fin de concretizar el concepto de ruido y la forma en cómo este se encuentra en la física. Además, se llevarán a cabo distintos montajes experimentales que permitan diferenciar entre el ruido clásico y el ruido cuántico, específicamente el shot noise. La caracterización del ruido de estos elementos es fundamental para poder distinguir entre el ruido cuántico y el ruido clásico.

Los montajes que se usarán para este fin son los que se muestran en las figuras 1, 2, 3 y 4. Las figuras 3 y 4 muestra un montaje para detección homodina de las cuadraturas de la luz analizando la serie de tiempo y de frecuencia. La toma de datos se realizará

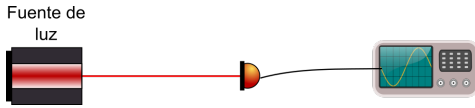


Figura 1: Montaje para el análisis del ruido clásico en la serie de tiempo.

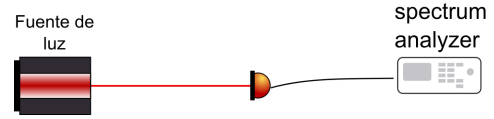


Figura 2: Montaje para el análisis del ruido clásico en la serie de frecuencia.

con luz coherente, luz pseudo-térmica y el vacío, para los tres casos se analizará el ruido de la detección de la resta de las señales. Por otro lado, los montajes que se encuentran en la figura 1 y 2 tiene cómo objetivo medir una señal producida por la luz coherente y pseudotérmica, ya sea con un fotodiodo o con un SPCM (*Single Photon Counter Module*) con el fin de analizar su densidad espectral con un *spectrum analyzer* y su serie de tiempo con un osciloscopio.

Para cumplir el objetivo 2 se propone hacer un estudio bibliográfico completo de las técnicas de reducción de ruido experimentales y computacionales que resultan útiles en el contexto de los montajes ópticos. Se propone empezar por el estudio de [12], para aprender técnicas experimentales, y por el estudio de [1] y [13], para aprender sobre la reducción de ruido mediante métodos estadísticos de análisis de señales. Luego, se implementarán dichas técnicas en montajes experimentales de interés para la óptica cuántica (medición de la estadística de la luz, tomografía en variables continuas y detección homodina de cuadraturas) y se evaluará su rendimiento. El primer montaje que se propone con el fin de analizar la reducción de ruido es la medición de los anillos producidos por el proceso *spontaneous parametric down conversion* mediante el uso de una cámara CCD. La cámara CCD que se encuentra en laboratorio de la Universidad de Los Andes tiene un sistema de enfriamiento integrado, el cual se usa con el fin de reducir el ruido en las imágenes y se usará este sistema para evaluar que tan eficientemente es reducido el ruido de las imágenes.

Para alcanzar el objetivo específico 3 se realizará una revisión bibliográfica de las técnicas de machine learning, específicamente las técnicas *maximum a posteriori probability estimate* y descenso del gradiente [10]. Luego de estudiar y profundizar en las técnicas se buscará la caracterización de canales cuánticos, específicamente en canales de desfaseamiento [11].

6. Consideraciones Éticas

El proyecto es computacional y experimental. Se planea hacer revisión bibliográfica, hacer experimentos en el laboratorio de óptica de la universidad y realizar trabajo computacional. Se considera que ninguna de estas actividades va a generar algún tipo de conflicto ético que se deba llevar al comité de ética. Por lo tanto no es necesario que

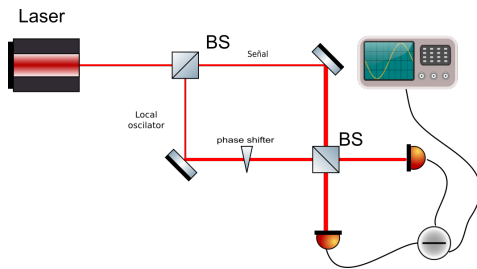


Figura 3: Montaje para el análisis del ruido cuántico en la serie de tiempo.

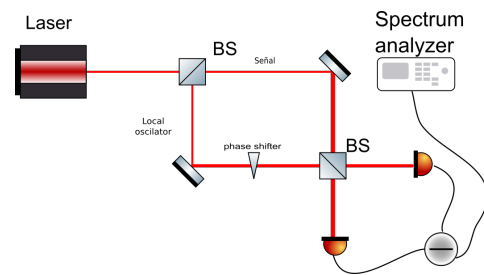


Figura 4: Montaje para el análisis del ruido clásico en la serie de frecuencia.

el proyecto sea evaluado por el comité de ética.

7. Cronograma

Plan de trabajo / Semanas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Tarea 1: Se llevará a cabo con el fin de cumplir el objetivo específico 1																
Tarea 1.1: Revisión bibliográfica sobre el concepto de ruido y las técnicas que se usan para reducirlo.	X	X														
Tarea 1.2: Realizar los montajes de la figura 1 para distintas fuentes de luz e identificar el shot noise.		X	X													
Tarea 1.3: Realizar el montaje de la figura 2 para entender el QNL.				X	X											
Tarea 2: Se llevará a cabo con el fin de cumplir el objetivo específico 2																
Tarea 2.1: Estudio bibliográfico de la reducción de ruido.					X	X										
Tarea 2.2: Implementar técnicas de reducción de ruido clásico en montajes ópticos.						X	X	X								
Tarea 2.3: Estudiar y proponer montajes ópticos para la reducción de ruido cuántico.							X	X	X							
Evaluación del 30%.								X								
Tarea 3: Se llevará a cabo con el fin de cumplir el objetivo específico 3																
Tarea 3.1: Estudio bibliográfico de las técnicas de machine learning útiles en la reducción de ruido.									X	X						
Tarea 3.2: Usar las técnicas de machine learning para estudiar el ruido introducido por un canal cuántico de desfasamiento.												X	X			
Tarea 4: Escritura del texto final y sustentación.																
Tarea 4.1: Escritura del texto final.					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tarea 4.2: Socialización de avances en el seminario de óptica cuántica.								X								X

8. Personas Conocedoras del Tema

- Juan Gabriel Ramírez, Universidad de Los Andes.
- Jaime Forero, Universidad de los Andes.
- Luis Quiroga Puello, Universidad de los Andes.

Referencias

- [1] Vaseghi, S.. Advanced digital signal processing and digital noise reduction. Chichester: Wiley, (2000).
- [2] Chatfield, C. The analysis of time series: an introduction. Chapman and Hall/CRC, (2003).
- [3] Gerry, C. and Knight, P. Introductory quantum optics. 1st ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press,(2008).
- [4] Beenakker, C. W. J., and Schönenberger, C. Quantum shot noise. Physics Today, 37, (2003).
- [5] Zhao, Y., Aritomi, N., Capocasa, E., et al. Frequency-Dependent Squeezed Vacuum Source for Broadband Quantum Noise Reduction in Advanced Gravitational-Wave Detectors. Phys. Rev. Let., **124**, 171101, (2020).
- [6] de Bernardis, P., Ade, P. A., Bock, J. J., Bond, et al. A flat Universe from high-resolution maps of the cosmic microwave background radiation. Nature, **404**, 955, (2000).
- [7] Penzias, A. A., and Wilson, R. W. A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s. The Astrophysical Journal, **142**, 419, (1965).
- [8] Spiegel, D. R., and Helmer, R. J. Shot-noise measurements of the electron charge: An undergraduate experiment. Ame. Jou. Phys., **63**, 554, (1995).
- [9] McKenzie, K., Shaddock, D. A., McClelland, D. E., et al. Experimental demonstration of a squeezing-enhanced power-recycled Michelson interferometer for gravitational wave detection. Phys. Rev. Let. **88**, 231102, (2002).
- [10] Murphy, K. P. Machine learning: a probabilistic perspective. MIT press, (2012).
- [11] Urrego, D. F., Álvarez, J. R., Calderón-Losada, O., et al. Implementation and characterization of a controllable dephasing channel based on coupling polarization and spatial degrees of freedom of light. Optics express, **26**, 11940, (2018).

- [12] Bachor, H. A., Ralph, T. C., Lucia, S., and Ralph, T. C. A guide to experiments in quantum optics (Vol. 1). Weinheim: wiley-vch, (2004).
- [13] Riley, W. and Howe, D. .Handbook of Frequency Stability Analysis, Special Publication (NIST SP), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=50505, (2008).

Firma del director

Alejandra Catalina Valencia Gonzalez, PhD.

Firma del codirector

Alonso Botero Mejia, PhD.

Firma del Estudiante

Juan David Salamanca Castillo.