

Proyecto I: LIGO-VIRGO Procesamiento de Señal

IEEE Publication Technology, *Javier González Paredes*

Abstract—El documento presenta un estudio sobre el procesamiento de señales de ondas gravitacionales, con el objetivo de identificar y aislar la señal proveniente de eventos astronómicos extremos del ruido presente en los datos de los observatorios LIGO y VIRGO. Para lograrlo, se utiliza una metodología que combina el análisis de Fourier para identificar las componentes de ruido, la búsqueda de picos para delimitar el rango de tiempo relevante, y técnicas de procesamiento como el Hann windowing y el filtrado pasa-banda para suavizar la señal y eliminar el ruido en frecuencias específicas. Finalmente, se realiza un resampling a una frecuencia más baja para reconstruir la señal sin añadir ruido adicional.

Index Terms—Onda gravitacional, señal, Fourier, filtro, resampling, windowing.

I. INTRODUCCIÓN

La detección de ondas gravitacionales ha representado un hito significativo en nuestra comprensión del universo. Este logro fue posible gracias a la colaboración entre dos experimentos, LIGO y VIRGO. Las ondas gravitacionales son señales que surgen de eventos astronómicos extremos, como la fusión de agujeros negros, supernovas o sistemas binarios de estrellas. Estos eventos generan perturbaciones en el campo gravitacional que se propagan a través del espacio-tiempo.

Detectar estas señales ha sido un desafío monumental, ya que las ondas gravitacionales viajan por el universo durante millones de años y producen perturbaciones extremadamente sutiles en el campo gravitacional. Los observatorios como LIGO y VIRGO están equipados con instrumentación sofisticada, como interferómetros láser, diseñados para detectar estos cambios en el campo gravitacional. Sin embargo, la señal de interés está oculta entre enormes cantidades de ruido, lo que requiere un procesamiento cuidadoso para separarla del fondo.

La colaboración LIGO-VIRGO consta de tres observatorios: Livingston, Hanford y Virgo. Cada uno de estos contribuye con mediciones para contrastar y verificar los resultados obtenidos. Por lo tanto, los datos recopilados de cada detector están marcados con sus respectivas iniciales: L1, H1 y V1.

II. MARCO TEÓRICO

Las ondas gravitacionales son perturbaciones en el espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Estas ondas fueron predichas por Albert Einstein en su teoría de la Relatividad General en 1916. A diferencia de las ondas electromagnéticas, las ondas gravitacionales no son ondas de materia o energía, sino que son ondas de distorsión del espacio-tiempo mismo. Este fenómeno se produce cuando hay cambios acelerados en la distribución de masa-energía en el universo, como la colisión de agujeros negros o la explosión de supernovas.

Las ondas gravitacionales pueden ser detectadas utilizando interferómetros láser extremadamente sensibles, como los utilizados en los experimentos LIGO y VIRGO. Estos interferómetros son capaces de medir cambios infinitesimales en la longitud de los brazos del detector causados por el paso de una onda gravitacional. Una vez detectadas, estas ondas proporcionan información valiosa sobre eventos astrofísicos catastróficos y nos permiten estudiar fenómenos astrofísicos que no son accesibles a través de la observación electromagnética convencional.

III. METODOLOGÍA

En esta sección, se describe el enfoque metodológico utilizado para llevar a cabo el estudio de procesamiento de señales de ondas gravitacionales, basado principalmente en la información proporcionada por el paper [] "A guide to LIGO-Virgo detector noise and extraction of transient gravitational-wave signals".

Se sigue un procedimiento el cual consiste en lo siguiente:

- 1) Se realiza un análisis de Fourier, para buscar las componentes de ruido que afectan al instrumento y revisar si se destacan algunos picos en la señal.
- 2) Se aplica un algoritmo de búsqueda de picos para aproximar un el tiempo de evento y de esta manera trabajar con un rango de tiempo ajustado.
- 3) A partir del rango de tiempo ajustado (4 segundos), se analiza la gráfica antes de aplicar windowing.
- 4) A partir de lo obtenido en el último paso, se aplica Hann windowing a la gráfica anterior.
- 5) Luego se realiza ajusta un filtro pasa-banda para eliminar ruido en un rango de frecuencias.
- 6) Finalmente se resamplea la señal a una frecuencia escogida con el objetivo de no sumar ruido.

IV. RESULTADOS

A. Análisis de Fourier

Al realizar el análisis de Fourier de los datos se obtienen dos gráficas observadas en la Figura 1. En la gráfica superior la línea en color violeta representa la Densidad Espectral de Potencia(PSD) de los datos sin ventaneo. En cambio en el subplot inferior se observa en color anaranjado la PSD de los datos luego de aplicarle Windowing con la función Hann.

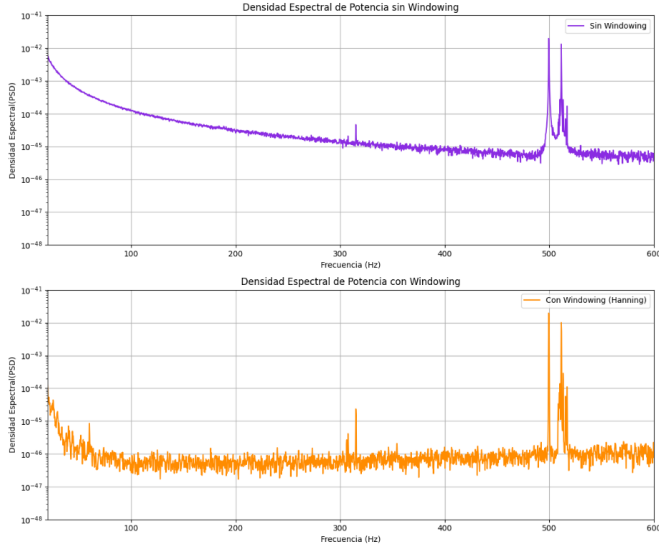


Fig. 1. Densidades Espectrales de Potencia sin/con Hann Windowing

B. Pre-windowing

Luego de encontrar el tiempo de evento aproximado, aplicando un algoritmo de detección de picos en la señal, se utiliza para analizar en un rango de 4 segundos los datos ajustados, obteniendo la gráfica que se observa en la Figura 2.

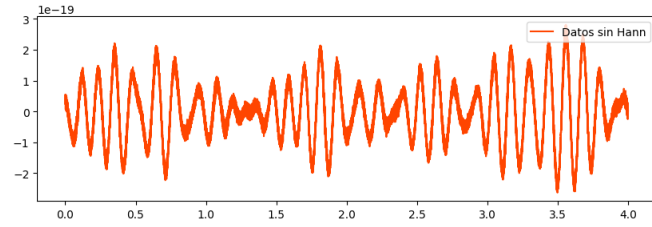


Fig. 2. Señal con los datos originales

C. Hann windowing

Luego, a partir del resultado de la gráfica anterior se aplica un ventaneo con la función Hann, lo cual se observa en la Figura 3.

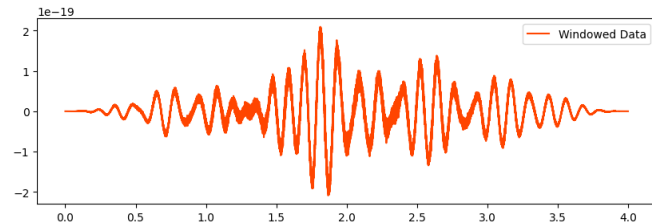


Fig. 3. Señal después de aplicar Hann windowing

D. Filtro pasa-banda

Se ajusta un filtro pasa-banda entre las frecuencias de [15-150] Hz, el cual se aplica a la gráfica de la señal ventaneada, obteniendo el resultado de la Figura 4.

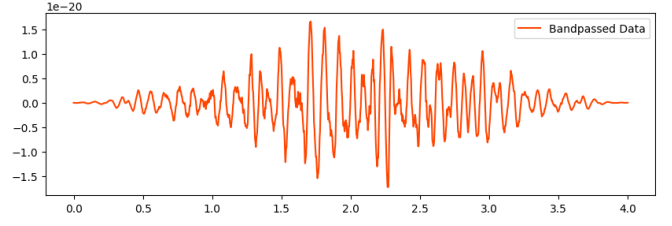


Fig. 4. Señal después de aplicar filtro pasa-banda

E. Resampling

Finalmente se realiza un resampling a la señal filtrada a una frecuencia de 4096 Hz, es decir una cuarta parte de la frecuencia de muestreo original, con el objetivo de reconstruir la señal evitando agregar ruido.

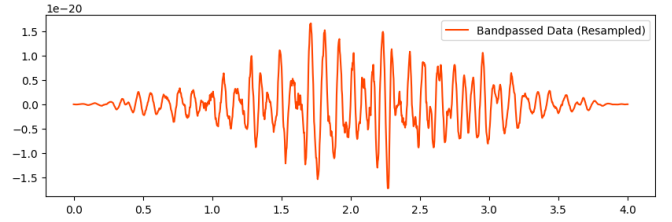


Fig. 5. Señal después del resampling

V. CONCLUSIONES

El análisis y procesamiento de las señales provenientes de los detectores LIGO-VIRGO revelaron la presencia de ruido inherente al proceso de medición. A través de la aplicación de técnicas de procesamiento digital de señales, como el análisis de Fourier, la aplicación de ventanas (Hann windowing), el filtrado pasa-banda y el remuestreo, se logró atenuar el ruido presente en la señal, permitiendo una mejor visualización y análisis de la misma.

Se destaca la importancia del análisis de Fourier para identificar las componentes de frecuencia del ruido y la señal de interés. La aplicación de la ventana de Hann permitió minimizar el efecto de las discontinuidades en los extremos de la señal, mejorando la precisión del análisis de Fourier. El filtro pasa-banda se empleó para eliminar las componentes de ruido fuera del rango de frecuencia de interés, mientras que el remuestreo a una frecuencia menor permitió reducir la cantidad de datos sin comprometer la información relevante de la señal. A pesar de la complejidad del proceso y la presencia de ruido, los resultados obtenidos demuestran la efectividad de las técnicas de procesamiento digital de señales para la detección de ondas gravitacionales. El análisis metódico de las señales, en conjunto con la colaboración internacional entre los observatorios LIGO y VIRGO, ha abierto una nueva ventana al estudio del universo, revelando eventos cósmicos de gran energía que antes eran inaccesibles a la observación directa.

REFERENCES

- [1] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Abraham, S., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., Adya, V. B., Affeldt, C., Agathos, M., Agatsuma, K., Aggarwal, N., Aguiar, O. D., Aiello, L., Ain, A., Ajith, P., Alford, T., Allen, G., Allocca, A., . . . Zweizig, J. (2020). A guide to LIGO–virgo detector noise and extraction of transient gravitational-wave signals. *Classical and Quantum Gravity*, 37(5), 055002. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ab685e>
- [2] Belahcene, I. (2020, June 23). Searching for gravitational waves produced by Cosmic Strings in LIGO-Virgo Data. theses. <https://theses.hal.science/tel-02878783>
- [3] Raman, A. (2018). On signal estimation, detection and interference mitigation in ligo. 2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). <https://doi.org/10.1109/globalsip.2018.8646464>
- [4] Abbott, B. P. (2017). GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Physical Review Letters*, 119(16). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.119.161101>