

LIGO-VIRGO Procesamiento de señal

Matías Nicolás Armijo González

Abstract—Este documento describe el procesamiento de la señal GW150914, medida por los experimentos LIGO y VIRGO, correspondiente a la detección de ondas gravitacionales utilizando interferometría. Debido al ruido presente en las mediciones obtenidas por los instrumentos llamados Livingston, Hanford y Virgo, se desarrollarán distintos procesos de filtraje por medio de un código en python, para poder detectar el comportamiento de la onda gravitacional, trabajando la señal en cada proceso como una señal de audio.

Index Terms—Interferometría, ondas gravitacional, filtraje, LIGO, VIRGO.

I. INTRODUCCIÓN

LA detección de ondas gravitacionales ha marcado un hito trascendental en la exploración del universo. Este logro es el resultado de una colaboración entre dos experimentos emblemáticos: LIGO y VIRGO. Las ondas gravitacionales son emisiones que surgen de eventos astronómicos, como la fusión de agujeros negros, supernovas o sistemas estelares binarios en rápida evolución. Estas ondas, que se propagan por el cosmos, generan perturbaciones en el tejido del espacio-tiempo, detectables gracias a tecnologías de vanguardia desarrolladas tras décadas de esfuerzo. [1] Los observatorios LIGO y VIRGO están equipados con instrumentación altamente sofisticada, basada en interferometría láser, que permite aislar mecánica y eléctricamente las señales de las ondas gravitacionales. A pesar de esta avanzada tecnología, la señal de interés se encuentra oculta entre un mar de ruido cósmico, lo que requiere procesamiento exhaustivo para identificarla, especialmente cuando se presenta como un patrón característico conocido como “chirp” [2]. La colaboración entre LIGO y VIRGO se sustenta en tres observatorios clave: Livingston, Hanford y Virgo, cada uno proporcionando mediciones para validar y contrastar los resultados. Este enfoque colaborativo y riguroso ha permitido abrir una ventana completamente nueva para la exploración del universo. En el desarrollo de este trabajo se estudiara y comprenderá sobre el tratamiento necesario a realizar en la señal, para poder obtener la medición de una onda gravitacional, utilizando un código en lenguaje de programación Python.

II. MARCO TEÓRICO

Las ondas gravitacionales, fenómenos predichos por la teoría de la relatividad general de Einstein, han revolucionado nuestra comprensión del universo al proporcionar una nueva ventana para explorar eventos cósmicos extremos, como la fusión de agujeros negros y estrellas de neutrones. La detección y caracterización precisa de estas ondas requiere técnicas avanzadas de procesamiento de señales para separar las señales débiles de los ruidos inherentes en los datos experimentales [2].

A. Transformada de fourier

La transformada de Fourier es una herramienta fundamental en el análisis de señales que descompone una señal en sus componentes de frecuencia, lo que permite analizar su contenido espectral. En el contexto de las ondas gravitacionales, la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a las mediciones proporciona una representación en el dominio de la frecuencia que revela información crucial sobre la naturaleza de las ondas.

B. Densidad espectral de potencia (PSD)

La densidad espectral de potencia (PSD, por sus siglas en inglés) representa la distribución de la potencia de una señal en el dominio de la frecuencia. Es una medida de cuánta potencia está contenida en cada banda de frecuencia de la señal. En el contexto del procesamiento de señales de ondas gravitacionales, la PSD se utiliza para caracterizar el ruido presente en los datos experimentales y para normalizar la señal mediante el proceso de blanqueamiento. Blanqueamiento de la Señal.

C. Whitening

El blanqueamiento de la señal es un proceso esencial para mejorar la detección de señales débiles en presencia de ruido. Consiste en ajustar la densidad espectral del ruido para que sea constante en todas las frecuencias, lo que iguala la contribución del ruido en todo el espectro y mejora la relación señal-ruido.

D. Espectrograma

El espectrograma es una representación visual de la evolución del contenido de frecuencia de una señal en función del tiempo. Es especialmente útil para analizar señales que varían en el tiempo, como las ondas gravitacionales. Comparar el espectrograma de una señal antes y después del tratamiento permite evaluar la eficacia del procesamiento de señales en la eliminación del ruido y la preservación de las características de interés.

III. METODOLOGÍA

Se comienza cargando los datos de la medición en un arreglo, definiendo la frecuencia de muestreo y la duración de la señal GW150914. En este caso, la señal a estudiar corresponde a los datos registrados por el instrumento Hanford, con una frecuencia de muestreo de 16[kHz] y una duración de 32 segundos. El primer paso en muchos análisis realizados en el LVC (LIGO Scientific and Virgo Collaborations) implica convertir los datos del dominio del tiempo mediante una técnica conocida como transformada rápida de Fourier (FFT). Dado

que esta técnica asume que el conjunto de datos analizado es periódico en el tiempo, es necesario aplicar funciones de ventana para reducir la distorsión espectral [3]. Una opción común es utilizar una función de ventana *Tukey* (conocida por su forma de función coseno atenuada). La medición de 32 segundos se divide en segmentos de 4 segundos para posteriormente aplicar el análisis correspondiente a cada segmento. El procedimiento aplicado a un segmento de la señal se muestra en la figura 1.

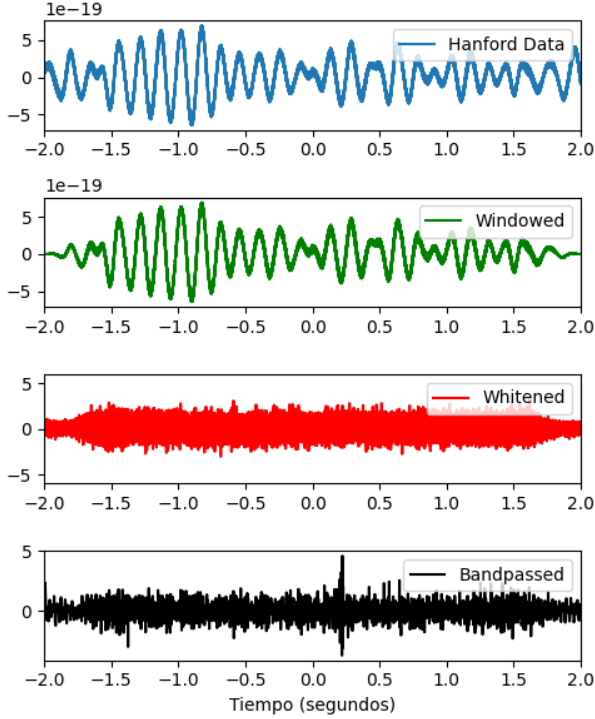


Fig. 1. Procedimiento sobre el segmento de medición, donde se muestra la aplicación de la ventana *Tukey*, el blanqueamiento de la señal y el posterior filtrado según la banda de frecuencia determinada, observándose la presencia de la onda gravitacional en la señal filtrada (*bandpassed*)

Los datos sin procesar están predominantemente afectados por ruido de baja frecuencia. Es por esto que se aplica una ventana *Tukey* con regiones de transición de 0.25 segundos a los datos sin procesar. Luego, los datos fueron blanqueados dividiendo los coeficientes de Fourier por una estimación de la densidad espectral de amplitud del ruido, lo que asegura que los datos en cada intervalo de frecuencia tengan igual importancia al reducir el peso de las frecuencias donde el ruido es fuerte. El método de promediado de Welch [4] puede emplearse para disminuir la variabilidad en la estimación del espectro de potencia, aunque esto conlleva la reducción de la resolución en frecuencia o la necesidad de segmentos de datos más extensos. La estimación espectral utilizada para normalizar los segmentos, se obtuvo mediante la aplicación de un promedio de Welch al período de 32 segundos de datos. Posteriormente, los datos fueron transformados inversamente a Fourier para regresar al dominio del tiempo. Las muestras blanqueadas se escalaban para tener una varianza unitaria en el dominio del tiempo. Como paso final, los datos fueron filtrados pasa-banda utilizando un filtro *Butterworth* de orden ocho y

fase cero con una banda de paso de [35 Hz, 450 Hz según el espectro obtenido]. El filtrado pasa-banda mejora la visibilidad de las características de interés en esta banda al eliminar el ruido fuera de la banda.

IV. RESULTADOS

En la figura 1, se puede observar que entre el rango de los 0 y 0.5 segundos (señal *bandpassed*), la señal con forma de *chirp*, representando la presencia de la señal de onda gravitacional GW150914. Para observar lo obtenido de mejor manera, se generan los espectrogramas (utilizando la familia de wavelets *Frequency B-Spline wavelets*) en la figura 2 de la señal filtrada, y la señal residual (con muchas componentes de ruido de fondo).

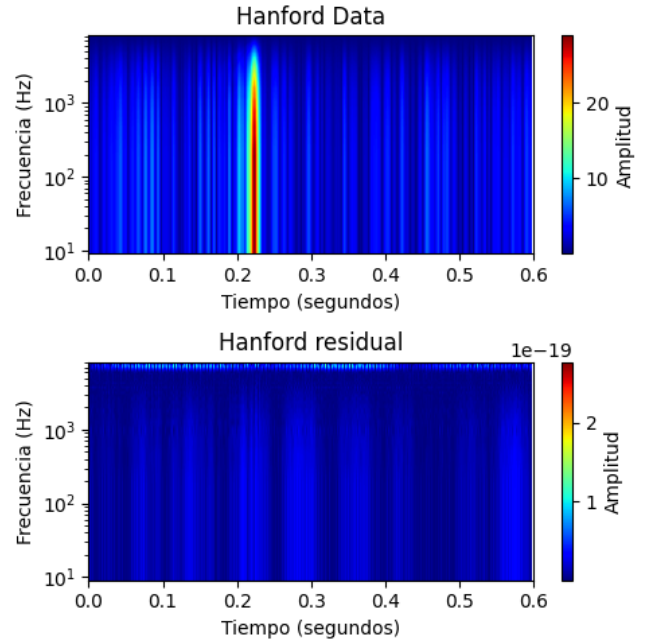


Fig. 2. Espectrograma de señal filtrada y residual, donde se puede observar la presencia de potencia de la onda gravitacional muy cercana al valor de 0.2 segundos tomados de muestra.

V. CONCLUSIONES

Este informe presentó un método para el tratamiento de señales de ondas gravitacionales, que incluye la selección de un segmento de medición, la aplicación de una ventana *Tukey* para mitigar discontinuidades, la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtener la representación en frecuencia, el crucial paso de blanqueamiento de la señal para normalizar los datos y reducir el ruido, seguido de la Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT) para regresar al dominio del tiempo y la generación de un espectrograma de la señal tratada, comparándola con la señal sin tratamiento. Los resultados destacan la eficacia del método para mejorar la detección y análisis de ondas gravitacionales, mostrando una reducción significativa del ruido y la preservación de características de interés, proporcionando una herramienta valiosa para la investigación en física y astrofísica.

REFERENCES

- [1] Belahcene, Imène. *Searching for gravitational waves produced by cosmic strings in LIGO-Virgo data*. Université Paris Saclay (COMUE). Oct 2019. [Online]. Disponible: https://theses.hal.science/tel-02878783/file/82248_BELAHCENE_2019_archivage.pdf.
- [2] B. P. Abbott et al. *A guide to LIGO-Virgo detector noise and extraction of transient gravitational-wave signals*. Feb. de 2020. [Online]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6382/ab685e>
- [3] Harris, F.J. *On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform*. vol. 66, no. 1, pp. 51-83, Jan. 1978,
- [4] Welch, P. *The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms*, in IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, vol. 15, no. 2, pp. 70-73, June 1967