

Procesamiento Digital Multimedia: Proyecto 1

Esteban Córdova, *Ingeniería Civil en Telecomunicaciones*

Abstract—Los observatorios LIGO y VIRGO en 2015 lograron un gran avance científico detectando las ondas gravitacionales. Este proyecto presenta una aplicación del procesamiento digital de señales logrando cargar y analizar datos detectados por los observatorios.

I. INTRODUCCIÓN

Las ondas gravitacionales son deformaciones del espacio - tiempo provocada por eventos cósmicos violentos. Los observatorios LIGO y VIRGO utilizan interferometría con láseres aislados para detectar cambios en el campo gravitacional causado por ondas gravitacionales, la señal de interés tiene una gran cantidad de ruido que debe ser procesada para identificar la señal relevante.

II. MARCO TEÓRICO

Las ondas gravitacionales son perturbaciones en la curvatura del espacio - tiempo que se propagan a la velocidad de la luz, generadas por sistemas con aceleraciones extremas, como fusiones de agujeros negros o estrellas de neutrones. LIGO y VIRGO son interferómetros láser de gran escala capaces de medir desplazamientos del orden $10^{-18}m$. El funcionamiento de este ocurre cuando dos láseres recorren trayectorias perpendiculares y se recombinan. La interferencia de los haces detecta cambios en la longitud de los brazos causados por el paso de una onda gravitacional. Las señales típicas de estos eventos tienen forma de chirp, esto es una señal cuya frecuencia y amplitud aumentan rápidamente en el tiempo hasta un punto máximo, seguido por una caída brusca. No obstante, los datos obtenidos por los interferómetros están altamente contaminados por diversos ruidos. El ruido registrado se modela como un proceso estocástico con propiedades estadísticas descritas por su media y matriz de covarianza. Si el ruido sigue una distribución normal se considera gaussiano, si sus propiedades no varían con el tiempo, se considera estacionario. El ruido estacionario se caracteriza por su función de correlación temporal y su densidad espectral de potencia (PSD), la raíz cuadrada de esta función da la densidad espectral de amplitud (ASD). Por siguiente la densidad espectral de ruido determina la relación señal/ruido (SNR), los detectores LIGO alcanzaron niveles de ruido promedio cercanos a $10^{-23}Hz^{-1/2}$ a $100Hz$, las frecuencias por encima de los $100Hz$ están principalmente limitadas por ruido cuántico, mientras que las bajas frecuencias están dominadas por movimiento del suelo. Entender el comportamiento del ruido es fundamental para identificar señales gravitacionales reales y evitar interpretaciones erróneas.

III. METODOLOGÍA

El análisis se llevo a cabo utilizando datos públicos del detector LIGO obtenidos a través de la pagina de GWOSC,

correspondiente a eventos transitorios de ondas gravitacionales confirmados. El objetivo fue visualizar, procesar y extraer características relevantes de la señal en presencia de ruido, utilizando herramientas de procesamiento digital de señales implementadas en python.

A. Carga y visualización de datos

Se cargaron los datos mediante Numpy, descartando encabezados innecesarios. Se genero una gráfica de la señal temporal completa para observar la forma de onda.

B. Conversión a audio

La señal se recorto en el intervalo de 0 a 32 segundos. Se creo un vector de tiempo asociado y se utilizo la función audio para escuchar la señal, facilitando la detección de eventos.

C. Señal gravitacional con data chirp

Se genero una señal tipo chirp desde 0 a $16kHz$ utilizando `scipy.signal.chirp`, normalizando para no saturar la señal original. Esta se sumo a la señal recortada.

D. Transformada de fourier y densidad espectral de potencia (PSD)

Se aplico la transformada de fourier utilizando el método de welch para obtener su densidad espectral de potencia. Además se mejoro el análisis aplicando una ventana tukey, que mejora la resolución espectral y reduce fugas.

E. Ventaneo, Whitening y filtrado pasa banda

El ventaneo se realizo aplicando una ventana tukey sobre la señal para suavizar los bordes, el whitening o blanqueamiento se normalizo la señal por la raíz del PSD interpolado para obtener una señal con ruido blanco, por ultimo se utilizo un filtro pasa banda de cuarto orden entre 10 Hz y 1000 Hz, eliminando componentes de baja frecuencia y alta frecuencia.

F. Remuestreo

La señal filtrada se remuestro de $16kHz$ a $200Hz$ utilizando la funcion `resample` para reducir el tamaño de los datos y adaptarlos.

G. Espectrograma

Finalmente, se grafico el espectrograma con la función `spectrogram` de SciPy, permitiendo visualizar la distribución energética de la señal en el dominio tiempo - frecuencia.

IV. RESULTADOS

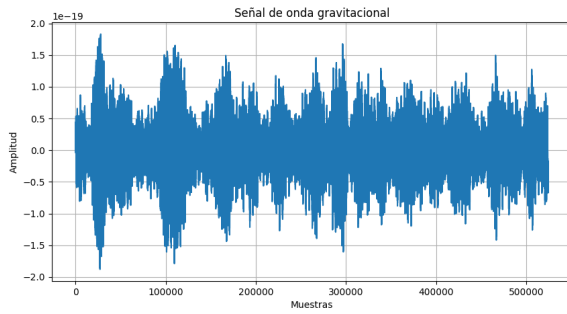


Fig. 1. Señal de onda gravitacional extraída de los datos

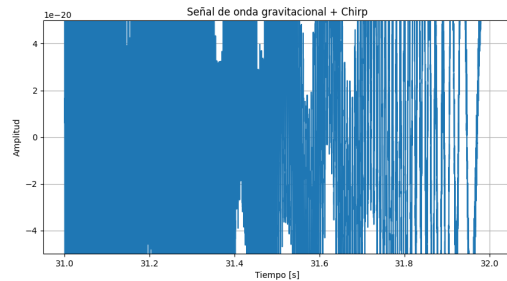


Fig. 2. Señal gravitacional agregándole data chirp

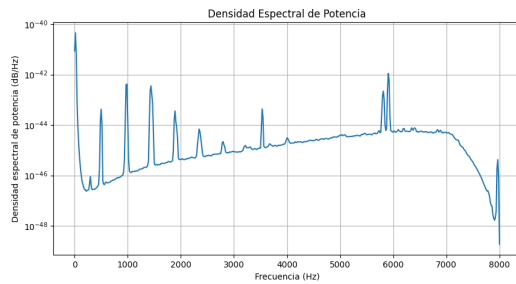


Fig. 3. Densidad espectral de potencia (PSD)

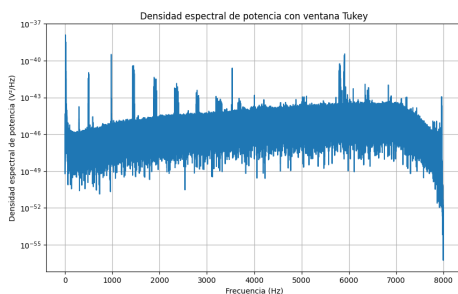


Fig. 4. Densidad espectral de potencia con ventana tukey

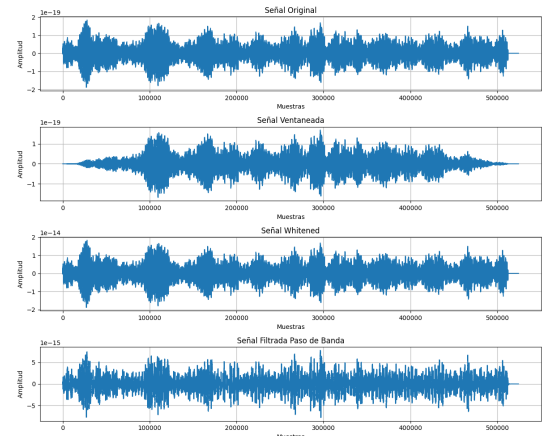


Fig. 5. Comparación de la señal original con la señal ventaneada, la señal blanqueada y la señal con filtro pasa banda

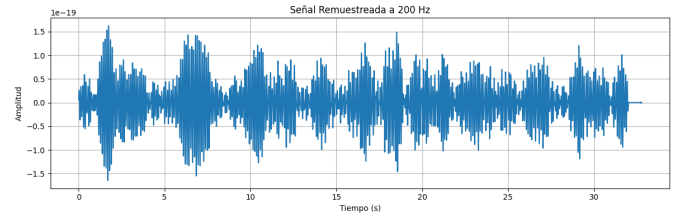


Fig. 6. Resamplado de la señal a una frecuencia de 200 Hz

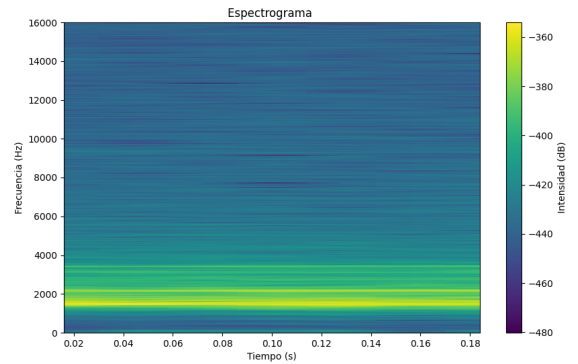


Fig. 7. Espectrograma de la señal entre las frecuencias 0 y 16kHz

V. CONCLUSIÓN

Este proyecto demostró la aplicabilidad de las herramientas de procesamiento digital de señales en la detección y análisis de ondas gravitacionales. A partir de datos reales del observatorio LIGO, se logró visualizar y tratar señales contaminadas con ruido mediante técnicas como el ventaneo, blanqueamiento, filtrado pasa banda y remuestreo. El uso del espectrograma permitió una mejor comprensión de la distribución energética en el dominio tiempo-frecuencia. Estas técnicas no solo permiten mejorar la relación señal-ruido, sino que también facilitan la identificación de eventos relevantes en registros altamente ruidosos, contribuyendo al avance en la interpretación de fenómenos astrofísicos complejos.

REFERENCES

- [1] B. P. Abbott et al. A guide to LIGO-Virgo detector noise and extraction of transient gravitational-wave signals. Feb. de 2020. doi: 10.1088/1361-6382/ab685e
- [2] Im'ene Belahcene. "Searching for gravitational waves produced by cosmic strings in LIGO-Virgo data". En: (2019)
- [3] Primera detección de ondas gravitacionales.(2016). Revista De Enseñanza De La Física, 28(1), 59-72.
- [4] LIGO - A Gravitational-Wave Observatory [Online]. Available: <https://www.ligo.caltech.edu/page/ligo-gw-interferometer>
- [5] Noise reduction in gravitational-wave data via deep learning Published 14 July, 2020 DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.033066>