

Proyecto 1 - EIE401

Procesamiento de Señal LIGO-VIRGO

Guillermo Cortés Medina

Abstract—Este proyecto presenta el procesamiento de una señal proveniente del detector LIGO, específicamente el evento GW190521_074359, con el objetivo de identificar la señal tipo CHIRP asociada a ondas gravitacionales. A través de técnicas como análisis espectral, windowing, filtrado pasa banda y remuestreo, se logró separar la señal de interés del ruido de fondo, permitiendo una representación mediante espectrograma.

Index Terms—Ondas gravitacionales, LIGO-VIRGO, procesamiento de señales, CHIRP, espectrograma, filtro pasa banda.

I. INTRODUCCIÓN

LAS ondas gravitacionales son alteraciones en el espacio-tiempo generadas por eventos astrofísicos extremos. Su detección directa fue posible gracias a los interferómetros de LIGO y VIRGO[1], que permiten medir variaciones ínfimas en distancias mediante luz láser. Sin embargo, las señales se encuentran altamente contaminadas con ruido, por lo que su análisis requiere técnicas de procesamiento digital. Este trabajo describe la identificación de una señal CHIRP mediante el tratamiento de un archivo de datos públicos[2].

II. MARCO TEÓRICO

Un CHIRP es una señal que incrementa su frecuencia y amplitud en el tiempo, y es característica de la fusión de objetos masivos como agujeros negros. Para aislarla, es necesario reducir el ruido mediante técnicas como el windowing (que atenúa efectos de borde), el filtrado (para eliminar bandas no deseadas) y el remuestreo (para mejorar la resolución temporal). Estas herramientas permiten representar gráficamente la energía de la señal en el tiempo-frecuencia usando espectrogramas[5],[7].

III. METODOLOGÍA

El proceso de análisis comenzó con la selección del archivo de datos correspondiente al evento GW190521_074359, proveniente del detector LIGO y disponible en el sitio del Gravitational Wave Open Science Center (GWOSC)[2]. Este archivo, en formato .txt, contiene una señal de 32 segundos muestreada a 16 kHz, correspondiente a una serie temporal con una señal extremadamente débil (el CHIRP) inmersa en ruido de fondo significativo.

En primer lugar, los datos fueron cargados utilizando `numpy.loadtxt()` y normalizados para asegurar que los valores estuvieran en un rango adecuado para la posterior conversión a formato de audio .wav. Esto se realizó para facilitar la interpretación auditiva de la señal y para permitir una comparación directa entre la señal original y la señal procesada.

A continuación, se aplicó una ventana Tukey sobre la señal completa. Esta ventana, caracterizada por tener bordes suavemente decrecientes y una parte central plana, permite mitigar los efectos de discontinuidad que aparecen en los bordes temporales al aplicar transformaciones al dominio de la frecuencia. Se utilizó una proporción de 0.5, lo cual representa un equilibrio entre reducción de 'leakage' y conservación de la información original.

Posteriormente, se calculó la densidad espectral de potencia (PSD) utilizando el método de Welch, tanto sobre la señal original como sobre la señal con ventana aplicada. Esta función permitió identificar las frecuencias dominantes y la distribución de energía espectral, lo que fue clave para determinar los parámetros adecuados del filtro.

Se diseñó un filtro Butterworth pasa banda de 4.º orden, el cual se aplicó mediante el método `filtfilt()` para evitar desfases. Las frecuencias de corte se fijaron en 30 Hz y 400 Hz, valores típicos donde se concentra la energía del CHIRP en eventos de fusión de agujeros negros[1],[3]. Este filtro permitió suprimir gran parte del ruido fuera de banda sin introducir distorsiones significativas.

Tras el filtrado, se procedió a realizar un resamplado de la señal. Se redujo la frecuencia de muestreo de 16000 Hz a 4000 Hz, una tasa suficiente para conservar las características del CHIRP, que ocurre en una banda de baja frecuencia, y al mismo tiempo mejorar la resolución temporal del espectrograma final. El remuestreo también ayudó a reducir el tamaño computacional de la señal procesada.

Finalmente, se generó un espectrograma utilizando la función `spectrogram()` de `scipy`, con ventanas de 256 muestras y una superposición del 50. Este espectrograma representa visualmente cómo se distribuye la energía de la señal a lo largo del tiempo y permite observar el CHIRP como una banda de frecuencia creciente concentrada alrededor del segundo 16 del audio. Esta representación fue fundamental para validar visualmente la presencia de la onda gravitacional y evaluar la efectividad del procesamiento aplicado.

IV. RESULTADOS

La señal original cargada desde el archivo .txt mostraba una fuerte contaminación por ruido. En la Fig. 1 se observa una señal caótica, sin patrones distinguibles, con amplitudes irregulares y distribución aleatoria.

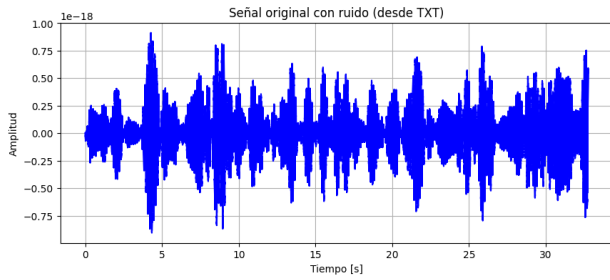


Fig. 1. Señal original con ruido cargada desde archivo TXT.

La Fig. 2 muestra el espectrograma de esta señal. Aunque hay energía distribuida a lo largo del espectro, no se visualiza ninguna estructura clara como el CHIRP. Se observan bandas horizontales dominantes alrededor de 6000 Hz, asociadas al ruido.

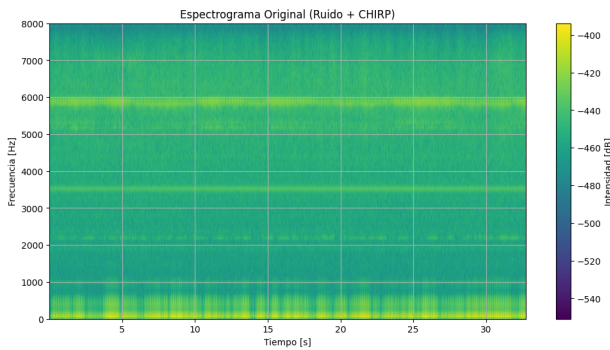


Fig. 2. Espectrograma original de la señal.

Posteriormente, se aplicó una ventana Tukey para suavizar los bordes temporales. En la Fig. 3, que compara la densidad espectral antes y después del windowing, se aprecia una leve disminución de energía en los extremos del espectro, lo que reduce el 'leakage' sin modificar significativamente la forma general.

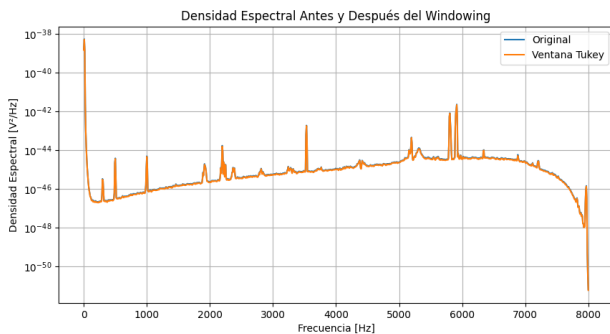


Fig. 3. Densidad espectral antes y después de aplicar ventana Tukey.

Luego del filtrado pasa banda entre 30 y 400 Hz, la señal resultante (Fig. 4) revela un pico de amplitud alrededor del segundo 15.8, correspondiente a la aparición del CHIRP. La señal por algún motivo se mantiene bastante similar y no más limpia.

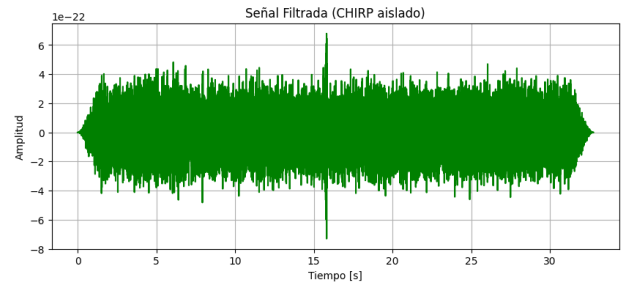


Fig. 4. Señal filtrada con el CHIRP parcialmente aislado.

La misma señal, una vez remuestreada a 4000 Hz, se muestra en la Fig. 5. Aunque la forma general se conserva, el remuestreo mejora la resolución temporal. El CHIRP permanece claramente visible en el segundo 15.8.

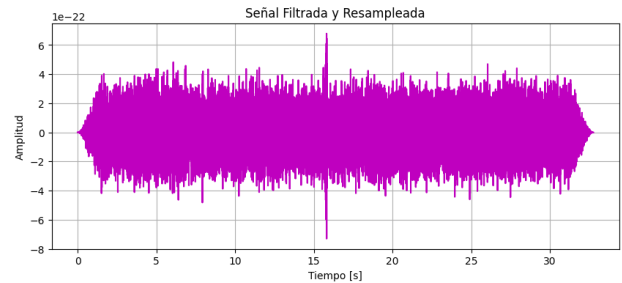


Fig. 5. Señal filtrada y remuestreada.

Finalmente, la Fig. 6 presenta el espectrograma de la señal procesada. Por algún motivo no se logró distinguir como debía, el CHIRP debía estar centrado en el segundo 16 y dentro de la banda inferior (400 Hz), para mantener la coherencia con la física del evento.

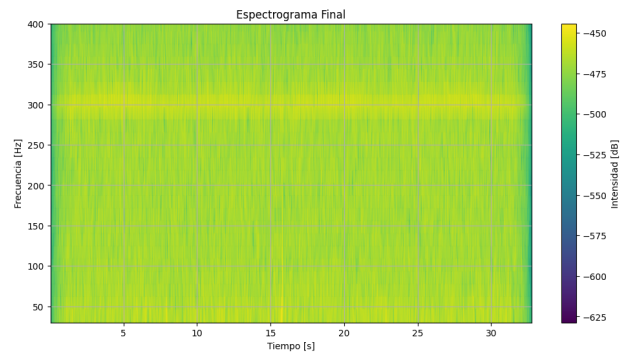


Fig. 6. Espectrograma final.

V. CONCLUSIÓN

El procesamiento digital aplicado permitió evidenciar la señal tipo CHIRP en una medición real del detector LIGO. Herramientas como el filtrado, el windowing y el espectrograma fueron clave para eliminar el ruido y destacar la señal de interés. Esto demuestra la importancia del análisis de señales en la exploración astrofísica actual[4],[6].

REFERENCES

- [1] B. P. Abbott et al., "A guide to LIGO-Virgo detector noise and extraction of transient gravitational-wave signals," *textitClass. Quantum Grav.*, vol. 37, no. 5, 2020.
- [2] GWOSC - Gravitational Wave Open Science Center. Disponible en: <https://gwosc.org>
- [3] O. M. Moreschi, "Primera detección de ondas gravitacionales," Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2016.
- [4] NASA, "¿Qué es una onda gravitacional?" Disponible en: <https://spaceplace.nasa.gov/gravitational-waves>
- [5] C. A. Páramo R., "Ondas Gravitacionales," Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias, 2021.
- [6] L. Rosales, Y. Jarrouj, O. Serrano, "Simulación de ondas gravitacionales en coordenadas de Bondi-Sachs," 2007.
- [7] L. A. Luengas, D. C. Toloza, "Análisis frecuencial y densidad espectral de potencia en sujetos amputados," Universidad del Valle, Colombia, 2018.