

Proyecto 1 EIE 401-1

Procesamiento de señal LIGO-VIRGO

Alejandra Villalobos

Abstract—Este proyecto utilizó técnicas para detectar ondas gravitacionales con datos de LIGO-Virgo. Se aplicó una metodología basada en el paper "A guide to LIGO-Virgo detector noise and extraction of transient gravitational-wave signals", que incluyó cálculo de densidad espectral, windowing, blanqueamiento, filtrado Butterworth, remuestreo y espectrograma. Se logró identificar y separar la señal de interés del ruido, destacando el fenómeno del "chirp". Este estudio demuestra la eficacia del procesamiento de señales en la detección de eventos gravitacionales.

Index Terms—Ondas gravitacionales, LIGO-VIRGO, Detección y procesamiento de señales, Ruido, Chirp, windowing, whitening, filter, resampling.

I. INTRODUCCIÓN

LAS ondas gravitacionales son disturbios en el espacio-tiempo causados por el movimiento de la materia y la energía [1]. Las ondas gravitacionales son tan débiles que son muy difíciles de detectar [2]. Por esto es que la detección de estas ondas es importante para aprender sobre el universo [3] e intentar observar y comprender fenómenos cósmicos que de otra manera serían invisibles. La colaboración entre LIGO y Virgo, utilizando interferómetros láser gigantes, ha sido fundamental en esta detección, lo cual es de gran interés para la comunidad científica [3].

II. MARCO TEÓRICO

Las ondas gravitacionales, predichas por Albert Einstein, son generadas por masas aceleradas [5]. Se producen cuando objetos como estrellas o agujeros negros, se mueven a velocidades extremadamente altas [7]. LIGO y Virgo emplean interferometría láser para detectar estas ondas, midiendo cambios en la distancia entre espejos [6]. El término "chirp" describe el cambio gradual en la frecuencia y amplitud de una señal, evidente en el acercamiento de masas masivas antes de fusionarse.

III. METODOLOGÍA

Para el análisis de los datos se seleccionó el archivo GW190521_074359 de los datos de Livingston del catálogo de observaciones de GWOSC. Estos datos, representados en audio a 16kHz, fueron sometidos a un procesamiento de señales para separar la señal de interés del ruido de fondo.

El proceso de análisis se realizó en las siguientes etapas:

- 1) **Cargar datos y convertir en audio:** Se cargaron los datos y se convirtieron en audio para facilitar su análisis.

Se identificó el intervalo de 15 a 16 segundos como donde se espera encontrar el fenómeno del "chirp".

- 2) **Cálculo de la densidad espectral de potencia:** Se calculó la densidad espectral de potencia de los datos originales. Esta densidad espectral es una función matemática que da a conocer la distribución de la potencia de dicha señal sobre las distintas frecuencias en donde esta formada [4].
- 3) **Aplicación de la ventana Tukey:** Se aplicó una ventana Tukey a los datos de audio para reducir discontinuidades en los bordes temporales al realizar transformaciones de frecuencia. Se eligió la ventana Tukey por su menor impacto en las señales [3], preservando la información espectral durante las transformaciones posteriores.
- 4) **Blanqueamiento del audio:** Se llevó a cabo un proceso de blanqueamiento con el propósito de eliminar la correlación temporal de los datos. Este proceso se realizó dividiendo los datos por la desviación estándar de la señal, mejorando la detección de patrones o características de interés en la señal.
- 5) **Filtrado con filtro Butterworth:** Se aplicó un filtro Butterworth de orden 4 en modo pasa banda con frecuencias de corte de 30 Hz y 100 Hz, seleccionadas después de un proceso de prueba y error. El filtro se utilizó para eliminar el ruido fuera de la banda de interés, logrando un equilibrio entre selectividad y suavidad de la respuesta en frecuencia.
- 6) **Remuestreo de la señal:** La señal filtrada se remuestreó a 32000 Hz para garantizar consistencia en la frecuencia de muestreo. Este aumento mejora la resolución en el dominio del tiempo para un análisis más detallado.
- 7) **Generación del espectrograma:** Se generó el espectrograma de la señal remuestreada, ofreciendo una representación visual de la energía de la señal en función del tiempo y la frecuencia. Esto facilita la identificación de patrones y características en la señal.

IV. RESULTADOS

Se graficaron los datos como una señal de audio en un intervalo de 15 a 16 segundos, como se ve en la Fig. 1, donde el eje "x" es el tiempo, y el eje "y" la amplitud. Esta representación proporciona una visión inicial de la forma y características de la señal, sirviendo como referencia para el análisis posterior.

El windowing de la señal, como se observa en la Fig. 2, no muestra un cambio claro dentro del intervalo de interés. Sin embargo, en la señal completa se observa una atenuación gradual en los extremos debido al efecto de la ventana.

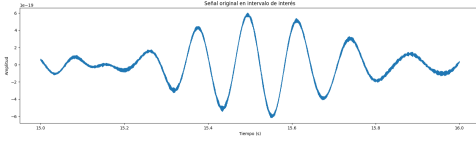


Fig. 1. Señal de audio original entre 15 y 16 segundos.

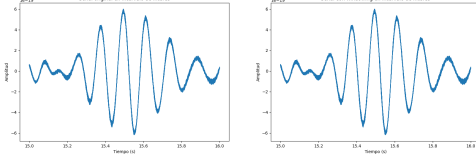


Fig. 2. Señal de audio original y señal de audio con windowing entre 15 y 16 segundos.

En la Fig. 3, se aprecian diferencias en las frecuencias más bajas entre la densidad espectral de potencia de la señal original y la señal con windowing. Esta disminución de energía espectral en el dominio frecuencial refleja la atenuación gradual en los bordes de la señal en el dominio del tiempo. Los picos de la densidad espectral indican las frecuencias dominantes presentes en la señal.

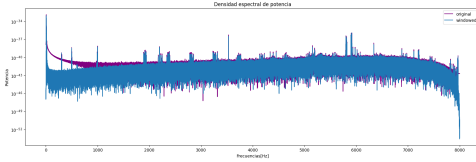


Fig. 3. Densidad espectral de potencia de señal original y señal con windowing.

Como se observa en la Fig. 4, el blanqueo de la señal con windowing asegura una importancia uniforme en cada intervalo de frecuencia al reducir la ponderación de las frecuencias ruidosas [3]. Se observa cómo el blanqueo ha nivelado la energía en diferentes intervalos de frecuencia, resaltando las características de interés y reduciendo la influencia del ruido. Además, aprecia levemente la presencia del "chirp" alrededor del segundo 15.8, lo que sugiere que el proceso de blanqueo ha ayudado a destacar esta característica en la señal.

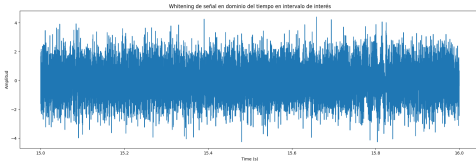


Fig. 4. Señal de audio blanqueada entre 15 y 16 segundos.

En la Fig. 5, el "chirp" buscado es claramente visible en el audio filtrado, confirmando el logro en la identificación de la señal de interés. Este "chirp", coherente con el efecto del blanqueamiento previo, se encuentra alrededor del segundo 15.8 del audio.

Al comparar la Fig. 5 con la Fig. 6, no se aprecia una diferencia evidente entre la señal antes y después del remuestreo

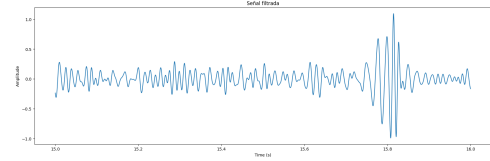


Fig. 5. Señal de audio filtrada entre 15 y 16 segundos.

debido al nivel de zoom limitado en el gráfico. Aunque a simple vista hay cambios notables, el proceso de remuestreo ha ajustado la frecuencia de muestreo de la señal en el dominio del tiempo, lo que se vería con mayor claridad al hacer zoom en los gráficos.

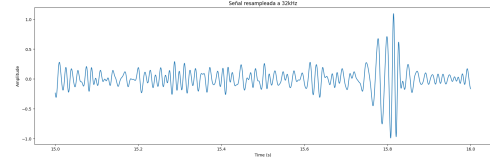


Fig. 6. Señal remuestreada con 32kHz entre 15 y 16 segundos.

Finalmente, en la Fig. 7, el espectrograma muestra claramente el "chirp" de la señal en función del tiempo y la frecuencia. Las regiones de mayor intensidad de color indican una mayor energía en esas frecuencias y momentos específicos en el tiempo. Como concluimos previamente, se observa una mayor energía concentrada alrededor del segundo 15.8 y en la banda de frecuencia entre 0 y 200 Hz aproximadamente.

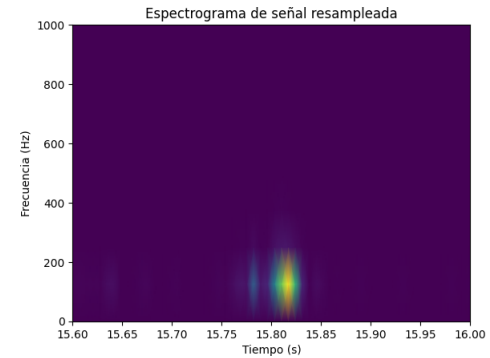


Fig. 7. Espectrograma entre 15 y 16 segundos.

V. CONCLUSIÓN

En conclusión, el análisis de los datos de los observatorios LIGO-Virgo mediante técnicas de procesamiento de señales ha sido efectivo para la detección y análisis de ondas gravitacionales. La metodología implementada identificó con éxito la señal de interés y separó el ruido de fondo, destacando el fenómeno del "chirp". Estos resultados resaltan la importancia del procesamiento de señales en la investigación de eventos cósmicos extremos y su contribución al avance de nuestra comprensión del universo.

REFERENCES

- [1] Juan David Garcia Fuentes, *Ondas Gravitacionales*. Universidad de Murcia.
- [2] Osvaldo M. Moreschi, *Primera detección de ondas gravitacionales*. Facultad de Matemática Astronomía, Física y Computación, Universidad Nacional de Córdoba, Instituto de Física Enrique Gaviola, CONICET, Ciudad Universitaria, (5000) Córdoba, Argentina, 2016.
- [3] B P Abbott et al 2020 Class. Quantum Grav. *A guide to LIGO-Virgo detector noise and extraction of transient gravitational-wave signals*.
- [4] Lely A. Luengas C. y Daissy C. Toloza. *Análisis frecuencial y de la densidad espectral de potencia de la estabilidad de sujetos amputados*.
- [5] Carlos Andrés Páramo Rojas. *Ondas Gravitacionales*, Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias, 2021.
- [6] Luis Rosales, Yolian Jarrouj y Orlando Serrano. *Simulación de ondas gravitacionales en coordenadas de bondi-sachs*, 2007.
- [7] *¿Qué es una onda gravitatoria?*, 2020. [Online]. Available: <https://spaceplace.nasa.gov/gravitational-waves/sp/#:~:text=Qu%20causa%20las%20ondas%20gravitatorias,de%20una%20estrella%20llamada%20supernova..>