

Procesamiento Digital de Señales para la Detección de Ondas Gravitacionales: Caso GW150914

France Martínez, *Estudiante EIE PUCV, france.martinez@pucv.cl*

Abstract—En este proyecto se realizó el procesamiento de una señal strain proveniente del detector LIGO H1, con el objetivo de identificar la presencia de un evento tipo chirp asociado a ondas gravitacionales. Para ello, se aplicaron técnicas de procesamiento como la ventana Tukey para atenuar discontinuidades de borde, el blanqueamiento espectral para mejorar la relación señal-ruido, y un filtrado pasabanda en el rango de 40 Hz a 300 Hz. Posteriormente, se generaron espectrogramas de alta resolución para analizar la evolución temporal y espectral de la señal. A pesar de la presencia de ruido residual, se logró identificar un incremento de energía en el intervalo de tiempo correspondiente al evento GW150914, en concordancia con los reportes oficiales.

Index Terms—Gravitational waves, signal processing, LIGO, GW150914, bandpass filtering, whitening, spectrogram.

I. INTRODUCCIÓN

LA detección de ondas gravitacionales ha abierto una nueva forma de explorar el universo, permitiendo observar fenómenos astrofísicos extremos a través de perturbaciones en el espacio-tiempo. Estas señales, predichas por Albert Einstein en 1916 en su Teoría General de la Relatividad, fueron finalmente detectadas de manera directa por el observatorio LIGO en 2015, marcando un hito en la historia de la ciencia.

Detectar ondas gravitacionales no es sencillo. Las señales que llegan a la Tierra tienen amplitudes extremadamente pequeñas y se ven afectadas por distintos tipos de ruido instrumental y ambiental. Esto hace que, para poder identificarlas, sea necesario aplicar técnicas de procesamiento de señales que ayuden a mejorar la relación señal-ruido y a resaltar los eventos de interés.

En este proyecto se analiza la señal strain obtenida del detector LIGO H1, asociada al evento GW150914, el primer evento confirmado de ondas gravitacionales producto de la fusión de dos agujeros negros. Para este análisis, se utilizaron técnicas de procesamiento digital como la aplicación de una ventana Tukey para minimizar efectos de borde, el blanqueamiento espectral para corregir las irregularidades en la distribución de energía, un filtrado pasabanda para enfocar el análisis en el rango de frecuencias donde se espera encontrar la señal, y un espectrograma de alta resolución para observar la evolución temporal del fenómeno.

El objetivo principal es detectar la característica firma tipo chirp, que se manifiesta como un aumento progresivo en la frecuencia y amplitud de la señal a medida que dos objetos masivos se acercan y finalmente se fusionan. Todo este trabajo busca replicar de manera simplificada las técnicas usadas en

investigaciones profesionales, pero adaptadas a un contexto académico para facilitar la comprensión de los métodos involucrados.

II. MARCO TEÓRICO

Las ondas gravitacionales son perturbaciones del espacio-tiempo propagándose a la velocidad de la luz, generadas por eventos extremos como la fusión de agujeros negros o estrellas de neutrones [1]. Su débil amplitud al llegar a la Tierra exige un procesamiento avanzado de señales para su detección [3]. Estas ondas transportan información única sobre los sistemas astrofísicos que las generan, imposible de obtener mediante observaciones electromagnéticas tradicionales.

La ventana Tukey [4] permite reducir fugas espectrales atenuando bordes en el dominio temporal, minimizando efectos de discontinuidad en el análisis de Fourier. El blanqueamiento espectral [5] consiste en normalizar la densidad espectral de potencia, uniformizando la contribución de cada frecuencia y facilitando la identificación de señales transitorias.

El filtrado pasabanda [6] es crucial para focalizar el análisis en las bandas de frecuencia donde se espera encontrar el chirp, eliminando componentes de ruido fuera del rango objetivo. Finalmente, el espectrograma [7] proporciona una representación tiempo-frecuencia que permite visualizar la evolución espectral de eventos como los chirps gravitacionales, mostrando cómo la frecuencia de la señal cambia con el tiempo.

III. METODOLOGÍA

Se procesó una señal strain del detector LIGO H1 muestreada a 16 kHz [1]. Primero, se eliminaron los primeros 0.1 segundos para evitar artefactos iniciales asociados al arranque de los instrumentos. Luego, se aplicó una ventana Tukey con parámetro $\alpha = 0.25$ para suavizar los extremos de la señal, reduciendo fugas espectrales [4].

La densidad espectral de potencia (PSD) fue estimada mediante el método de Welch, utilizando bloques de 4096 muestras y una superposición del 50%. Posteriormente, se realizó el blanqueamiento espectral dividiendo la transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal por la raíz de la PSD interpolada [5]. Esta etapa fue fundamental para lograr una energía espectral uniforme y facilitar la posterior aplicación del filtro.

Se aplicó un filtro Butterworth de cuarto orden configurado como pasabanda entre 40 Hz y 300 Hz [6], lo cual permitió aislar la región de interés donde se esperaban las principales características del chirp. A continuación, se seleccionó el

intervalo temporal de 15.4 a 16.2 segundos, centrado en el evento GW150914.

Sobre este segmento, se generó un espectrograma de alta resolución utilizando una ventana Hann, bloques de 512 muestras y 50% de solapamiento, permitiendo visualizar la evolución espectral en detalle.

IV. RESULTADOS

El procesamiento de la señal strain permitió evidenciar cambios significativos en la energía espectral.

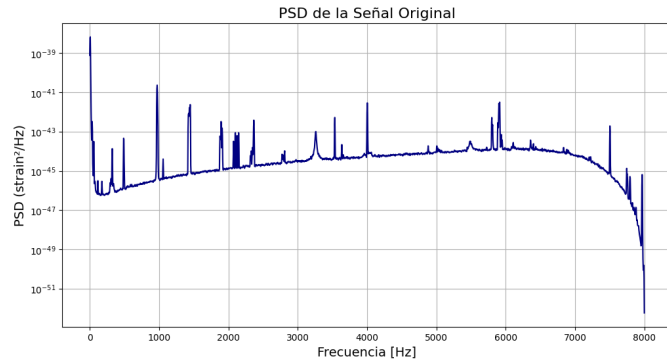


Fig. 1. Densidad espectral de potencia (PSD) de la señal original.

En la figura 1 se observa la distribución inicial de la energía, dominada por ruido de baja y alta frecuencia, lo cual justifica la necesidad de aplicar técnicas de procesamiento específicas.

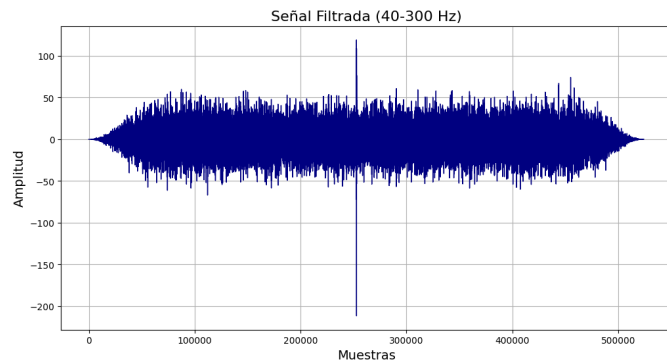


Fig. 2. Señal blanqueada y filtrada en el rango 40-300 Hz.

Tras aplicar el procesamiento mostrado en la figura 2, la señal presenta un contenido espectral más uniforme, lo que facilita la posterior localización de eventos transitorios.

La evolución ascendente observada en el espectrograma (figura 3) es típica de la coalescencia de objetos compactos, donde la frecuencia y la energía aumentan rápidamente antes de la fusión final [1]. Esta característica, además de su localización temporal consistente con la predicción, respalda la interpretación del evento como una detección de ondas gravitacionales.

V. CONCLUSIÓN

El procesamiento de la señal strain permitió replicar, en forma simplificada, las técnicas aplicadas en la detección

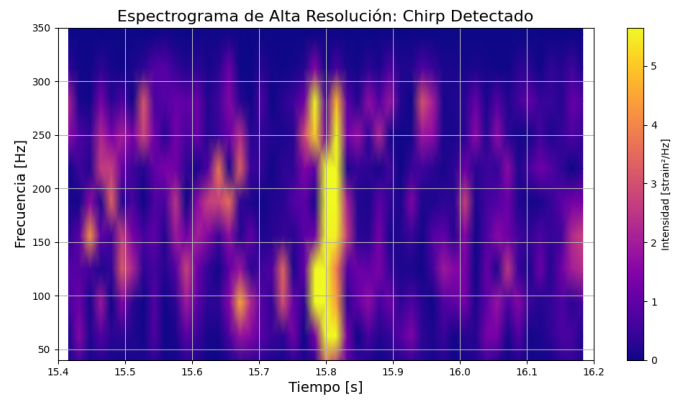


Fig. 3. Espectrograma mostrando la evolución ascendente en frecuencia del chirp.

del evento GW150914. A pesar de la persistencia de ruido residual, el análisis espectrogramal y auditivo mostró patrones consistentes con la evolución ascendente en frecuencia típica de chirps gravitacionales [2].

Estos resultados evidencian la viabilidad de utilizar herramientas básicas de procesamiento digital para identificar eventos astrofísicos transitorios en entornos de alta contaminación de ruido. Asimismo, refuerzan la importancia de la correcta selección de parámetros de análisis, como el tipo de ventana, el ancho de banda del filtro y el intervalo temporal analizado.

Para futuros trabajos, se podría considerar el uso de técnicas más avanzadas como matched filtering, análisis de coherencia o metodologías de aprendizaje automático, que permitirían aumentar la sensibilidad y reducir las tasas de falsas detecciones en la búsqueda de eventos gravitacionales.

REFERENCES

- [1] B. P. Abbott *et al.*, "Observation of gravitational waves from a binary black hole merger," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, no. 6, p. 061102, 2016.
- [2] B. P. Abbott *et al.*, "GW150914: The advanced LIGO detectors in the era of first discoveries," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, no. 13, p. 131103, 2016.
- [3] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, McGraw-Hill, 1991.
- [4] F. J. Harris, "On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform," *Proc. IEEE*, vol. 66, no. 1, pp. 51–83, 1978.
- [5] B. Allen, "A chi-squared time-frequency discriminator for gravitational wave detection," *Phys. Rev. D*, vol. 71, p. 062001, 2005.
- [6] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall, 2010.
- [7] M. Hayes, *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*, Wiley, 1996.
- [8] Gravitational Wave Open Science Center, "Data release for event GW150914," 2015. [Online]. Available: <https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC/GW150914/>