



Trabajo especial de Licenciatura en Física

Estudio de señales de ondas gravitacionales por medio de un nuevo método de filtros y comparación de datos de los observatorios LIGO/Virgo

Autor: Camilo Crisman

Director: Dr. Osvaldo M. Moreschi

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación

Marzo 2023



Esta obra se distribuye bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Abstract

Gravitational waves were predicted by Albert Einstein in his development of the theory of general relativity in 1915. However, their direct detection was not possible until almost a century later. They have had a great impact on the understanding and study of the universe since they provide information that was undetectable until now.

The objective of the present work is to study in detail the gravitational waves of events GW190521 and GW190521_074359, which were detected in a time span of less than 5 hours. The GW190521 event breaks all current records for the amount of mass of the black holes involved in the coalescing binary system, and was recorded by the three wave detectors: Hanford, Livingston and Virgo. On the other hand, the event GW190521_074359 is one of the events with the best signal-to-noise ratio in the catalog.

For each event we will initially perform a preliminary study of the available data. Then each event is treated separately to clean the signal. The techniques used consist in the use of FIR filters, in contrast to the pre-processing of the data performed by the LIGO-Virgo collaboration. The proposal of this method is based on eliminating the intrinsic noise of the detectors, typical of this type of instruments, affecting as little as possible the time series, so as not to lose information of the astrophysical signal. In addition, the detections are analyzed in a wider time interval than the one seen in most of the works, which allowed finding a possible new astrophysical signal.

After filtering, the results suggest that the event GW190521 does not have a quasi-circular orbit, but a hyperbolic orbit. Therefore, it is expected that these findings will motivate future works that will deepen the study of these events by processing the filtered signal.

Resumen

Las ondas gravitacionales fueron predichas por Albert Einstein en su desarrollo de la teoría de la relatividad general en 1915. Sin embargo, su detección directa no fue posible hasta casi un siglo después. Éstas han tenido un gran impacto en la comprensión y estudio del universo dado que aportan información hasta ahora indetectable.

El objetivo del presente trabajo es estudiar en detalle las ondas gravitacionales de los eventos GW190521 y GW190521_074359, que fueron detectados en un lapso de tiempo menor a 5 horas. El evento GW190521 bate los récords al presente de la cantidad de masa de los agujeros negros intervinientes en el sistema binario coalescente, y fue registrado por los tres detectores de ondas: Hanford, Livingston y Virgo. Por su parte, el evento GW190521_074359 es uno de los que presentan mejor relación señal ruido en el catálogo.

Para cada evento realizaremos inicialmente un estudio preliminar de los datos disponibles. Luego se trata cada evento por separado para limpiar la señal. Las técnicas utilizadas consisten en el uso de filtros FIR, en contraste con el pre-procesado de los datos que realiza la colaboración LIGO-Virgo. La propuesta de este método se basa en eliminar el ruido intrínseco de los detectores, típico de este tipo de instrumentos, afectando lo menos posible la serie temporal, de modo de no perder información de la señal astrofísica. Además se analizan las detecciones en un intervalo temporal más amplio que el visto en la mayoría de los trabajos, lo que permitió encontrar una posible señal astrofísica nueva.

Luego del filtrado, los resultados sugieren que el evento GW190521 no presenta órbita cuasi-circular, sino hiperbólica. Por eso se espera que estos hallazgos motiven futuros trabajos que profundicen el estudio de estos eventos procesando la señal filtrada.

Agradecimientos

Este logro es en parte personal pero no podría haber sido posible sin la ayuda de muchas personas.

En primer lugar quiero agradecer a Mabel y Dante, mis padres, que me apoyaron mucho no sólo económica sino también emocionalmente al decidir mudarme de provincia para estudiar. A mi hermana Lucila que admiro y de la cual aprendo todos los días.

Quiero agradecer también a Osvaldo, que dedicó largo tiempo a enseñarme. Aunque este trabajo fue comenzado en la pandemia, por su buena predisposición y paciencia no sólo logré finalizar la carrera sino que además confirmé mi vocación.

A mis amigos de Mendoza porque siempre que necesité me hicieron sentir la distancia como un accesorio y no algo definitivo.

A los amigos en Córdoba que me contuvieron y acompañaron en el trayecto universitario. En especial a Mili que se hizo mi familia en esta provincia.

También a las y los docentes que con tanta pasión transmiten sus conocimientos en la Universidad Nacional de Córdoba. Entre ellos quisiera destacar a Eugenia que con su gran calidad de docente y calidez de persona me hizo descubrir el área que hoy estudio. A Emanuel, por su amabilidad y entusiasmo al enseñar. A Yamila por escucharme siempre y compartir muchas risas.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 10 |
| 1.1. Sobre Relatividad General y ondas gravitacionales | 10 |
| 1.2. Sobre los detectores | 13 |
| 1.3. Sobre los filtros digitales | 16 |
| 1.4. Contenido del trabajo | 17 |
| 2. Antecedentes y técnicas | 18 |
| 2.1. Antecedentes | 18 |
| 2.2. Diseño de filtros | 20 |
| 2.3. Aplicar un filtro FIR a un caso particular | 22 |
| 3. Estudio del evento GW190521 | 26 |
| 3.1. Estudio preliminar | 26 |
| 3.2. Gráficos luego del primer filtro pasa-banda | 30 |
| 3.3. ASD luego del filtrado | 32 |
| 3.4. Espectrogramas luego del filtrado | 33 |
| 3.5. Diagramas de fase luego del filtrado | 34 |
| 3.6. Gráficos en el dominio temporal | 35 |
| 3.6.1. Estudio del desplazamiento temporal | 35 |
| 3.6.2. Desde -0,30s hasta 0,10s | 39 |
| 3.6.3. Desde -0,90s hasta -0,20s | 42 |
| 3.7. Discusión | 44 |
| 4. Estudio del evento GW190521_074359 | 48 |
| 4.1. Estudio preliminar | 48 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.2. | ASD luego del primer filtro: pasabanda | 50 |
| 4.3. | ASD luego del filtrado | 51 |
| 4.4. | Espectrogramas luego del filtrado | 52 |
| 4.5. | Diagramas de fase luego del filtrado | 53 |
| 4.6. | Gráficos en el dominio temporal | 54 |
| 4.6.1. | Estudio del desplazamiento temporal | 54 |
| 4.6.2. | Desde -0.40s hasta 0.00s | 57 |
| 4.6.3. | Desde -1.30s hasta -0.30s | 60 |
| 4.7. | Discusión | 63 |

5. Comentarios finales **66**

Capítulo 1

Introducción

1.1. Sobre Relatividad General y ondas gravitacionales

La Teoría de la Relatividad es una teoría física desarrollada por Albert Einstein a principios del siglo XX que revolucionó nuestra comprensión del espacio, el tiempo y la gravedad. Se divide en dos partes: la Relatividad Especial [1] y la Relatividad General [2]. La Especial describe la relación entre espacio, tiempo y movimiento a partir del hecho de que hay una velocidad máxima para las interacciones que coincide con la velocidad de la luz. Es así que la velocidad de la luz en el vacío es una constante Universal en la física. De ahí que el tiempo es relativo al observador y que es necesario pensar en el espacio-tiempo como un volumen 4-dimensional.

Según la teoría de la Relatividad General, este espacio-tiempo no es plano sino que puede ser “deformado” y se entiende a la gravedad como una consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo causada por la presencia de objetos con masa. Esto significa que la gravedad no es una fuerza misteriosa que atrae a los objetos hacia sí, sino que es producto de la geometría espacio-temporal. La teoría de la relatividad ha sido probada y verificada en numerosas ocasiones a lo largo del siglo XX y ha sido crucial para muchos avances en la física, incluyendo la comprensión de los agujeros negros y las ondas gravitacionales.

Cuando se mencionan las ondas gravitacionales, se refiere a deformaciones periódicas en el tejido del espacio-tiempo. Se entienden basándose en que la teoría de Einstein indica que el espacio-tiempo no es una estructura rígida, sino que reacciona a la presencia de materia y energía.

Cualquier objeto con masa y aceleración produce ondas gravitatorias, pero dependerá de la

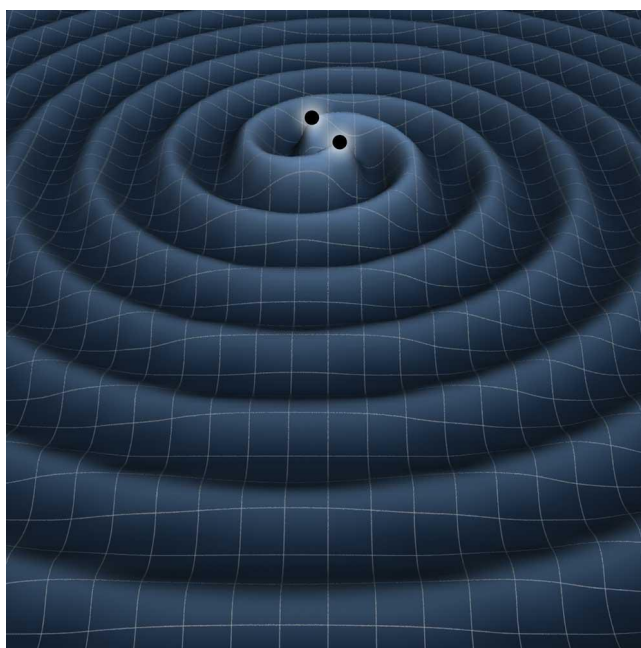


Figura 1.1: Representación de las ondas gravitacionales de dos agujeros negros en órbita. [Imagen: K. Thorne (Caltech) y T. Carnahan (NASA GSFC)]

precisión del equipo para poder cuantificarlas. Actualmente sólo se ha logrado captarlas a raíz de sucesos de una muy elevada energía. Por ejemplo, en la figura 1.1 se representan dos agujeros negros orbitando en un sistema binario ligado. En ese caso, causarán que el espacio-tiempo se ondule o “tambalee”, dispersando energía.

Se tiene evidencia indirecta de las ondas gravitacionales desde 1970, debido a que puede medirse cuánta energía pierde un sistema mediante radiación gravitacional. Hulse y Taylor lograron esto monitoreando atentamente la frecuencia orbital de un sistema binario de púlsares. Si el sistema pierde energía, las dos estrellas se acercan orbitando más rápidamente al rededor de la otra. Las predicciones de ondas gravitacionales encajaron perfectamente con las observaciones. Gracias a ese impresionante trabajo [5], Hulse y Taylor obtuvieron un premio Nobel en 1993.

Sin embargo para la detección directa de ondas gravitacionales se debe medir la deformación del espacio tiempo que causan y esto puede realizarse utilizando interferómetros de alta sensibilidad. La detección de ondas gravitacionales da inicio a una era en que los físicos y astrónomos pueden utilizar nuevos “ojos” para entender agujeros negros y otras componentes invisibles, hasta ahora escondidas en el universo. Cuando dos objetos masivos tales como agujeros ne-

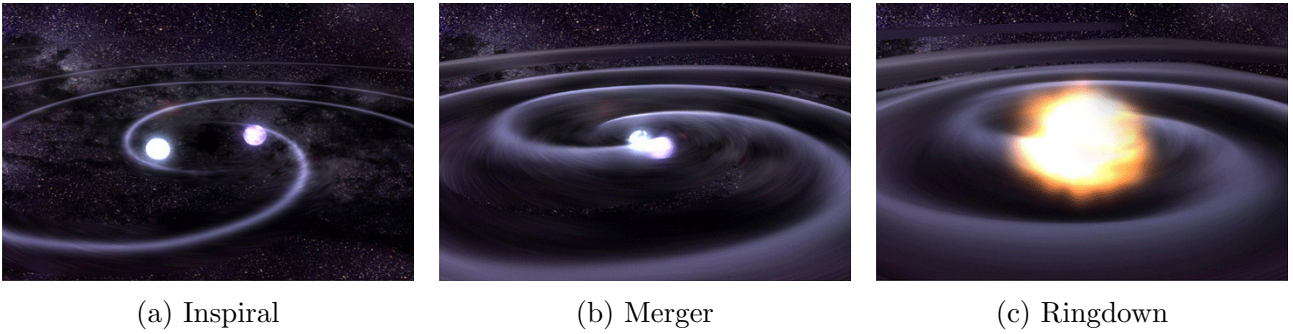


Figura 1.2: Representación de dos enanas blancas orbitando mutuamente y acercándose (de izquierda a derecha) a su fusión, con las correspondientes ondas gravitacionales. [Imagen: NASA]

gros o estrellas de neutrones forman un sistema binario, es posible separar la evolución en tres etapas. En la figura 1.2 se ilustra dicha situación.

Durante el *inspiral* (figura 1.2a) la órbita se achica gradualmente en forma espiralada. Aquí nos tomamos la licencia para usar algunas palabras en inglés denotando los estadios, dado que no hay traducciones fieles y se han convertido en términos usuales en la comunidad. Este proceso toma mucho tiempo dado que la atracción gravitatoria es más débil cuando los objetos se encuentran muy distanciados. A medida que los objetos se acercan, aumentan sus velocidades, la frecuencia de movimiento y así también la emisión de radiación gravitacional.

En segunda instancia ocurre la fusión o *merger*, momento en que los objetos coalescen y emiten la máxima intensidad de onda gravitacional.

Inmediatamente después del *merger* sigue el *ringdown*, ilustrados en las figuras 1.2b y 1.2c respectivamente. El *ringdown* comienza cuando los horizontes de eventos de los agujeros negros se fusionan en uno solo final. En este último estadio la intensidad de la radiación gravitacional se reduce muy rápidamente. Las ondas gravitacionales detectadas desde la Tierra presentan una oscilación con amplitud rápidamente decreciente, como un eco de la coalescencia de los dos objetos del sistema. Las masas de los objetos involucrados en la coalescencia son las que dictan muchas características de la señal de onda gravitacional, como su intensidad. Otro parámetro importante del sistema es su distancia a la Tierra. Objetos pesados, como agujeros negros, transitan el “inspiral” (justo antes de la fusión) mucho más rápidamente que objetos “luminosos” como estrellas de neutrones. Esto significa que la duración de una señal proveniente de un sistema de agujeros negros sea significativamente más corta. Por ejemplo, el primer par de agujeros negros cuya coalescencia fue detectada por LIGO [7] produjo una señal de un par de décimas de segundo. En contraste, la primera fusión de estrellas de neutrones detectada por LIGO [9]

en Agosto del 2017 generó una señal extendida por decenas de segundos en los instrumentos, por lo que la relación es de 1 a 100.

1.2. Sobre los detectores

Un interferómetro, esquematizado en la figura 1.3, utiliza la luz de un láser haciéndola pasar por un vidrio semi-espejado. El semi-espejo divide el haz en dos rayos que viajan de un lado a otro en dos direcciones ortogonales para luego ser combinados nuevamente. La luz es una onda y dependiendo de si las crestas de dichas ondas provenientes de las dos direcciones coinciden o no, la señal resultante puede ser más fuerte o más débil, debido a la interferencia constructiva o destructiva. Lo que pase dependerá del camino óptico que realice la onda, muy sensible a la distancia que recorre la luz. Así es que puede usarse el patrón de interferencia para entender si una de las dos direcciones fue temporalmente mayor o menor que la otra. La primera detección de este tipo fue conseguida por la colaboración LIGO en septiembre de 2015, usando dos interferómetros que se encuentran en Hanford (Washington) y Livingston (Luisiana), ambos en Estados Unidos. Más adelante, precisamente el día 1 de agosto de 2017, el detector Virgo ubicado en Cascina, Italia, se unió al segundo periodo de observación.

LIGO, cuyas siglas en inglés corresponden a Observatorio de Ondas Gravitacionales con Interferómetro Láser, es el mayor de los detectores de ondas, con sus brazos de 4 km de longitud. Para medir la longitud relativa de los brazos, un haz de luz láser es separado en dos en la intersección de los dos brazos. La mitad de la luz del láser se transmite a un brazo mientras que la segunda mitad se desvía al segundo brazo. Cerca del divisor de rayos y al final de cada brazo se encuentran los espejos suspendidos como péndulos. La luz láser dentro de cada brazo rebota una y otra vez en los espejos y, finalmente, regresa a la intersección, donde interfiere con la luz del otro brazo. Si las longitudes de los brazos no han cambiado, entonces las ondas de luz, al combinarse, deberían restarse completamente (interferencia destructiva) y no se observará nada de luz en la salida del detector. Por el contrario, si una onda gravitacional estirara un brazo y comprimiera el otro ligeramente, los dos haces de luz no se restarían completamente el uno del otro, produciendo patrones de luz en la salida del detector. Codificada en estos patrones de luz se encuentra la información del cambio relativo de longitud entre los dos brazos, que a su vez otorga información sobre lo que produjo las ondas gravitacionales. Numerosos factores terrestres causan constantes y minúsculos cambios en la longitud relativa de los brazos de LIGO. Estas ubicuas señales terrestres se consideran ruido (y de hecho suenan como un sonido estático si

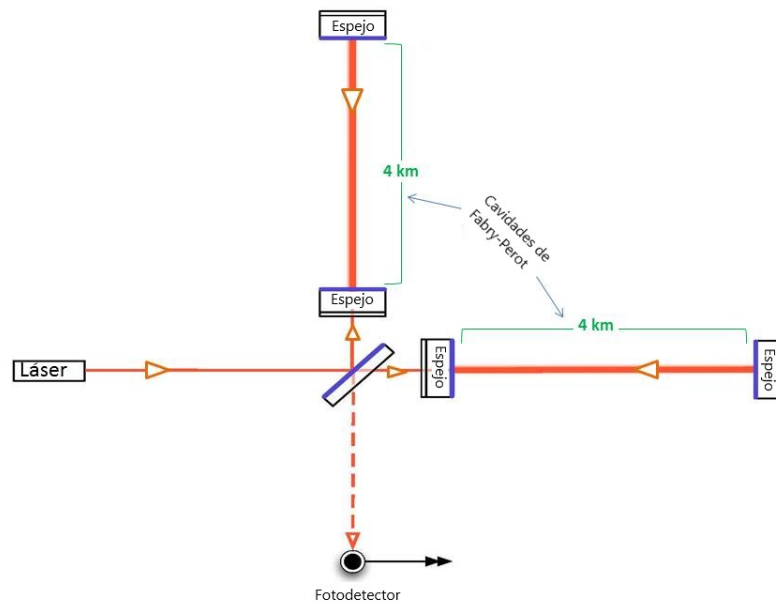


Figura 1.3: Diagrama del diseño de un interferómetro básico. [Imagen: LIGO]

la señal se envía a un altavoz). Se puede definir el ruido como aquella señal que el detector registra de forma no deseada. En este caso, LIGO trata de medir el cambio en la longitud de sus brazos causado por una onda gravitacional y no por los incesantes pequeños movimientos de los componentes de LIGO provocados por el ambiente. Para ayudar a minimizar los efectos locales en el detector, LIGO ha realizado mejoras sobre el diseño de un interferómetro básico (además de requerir que los dos detectores detecten la misma señal dentro del tiempo que tarda la luz en viajar entre ellos).

Una mejora es la colocación de los componentes ópticos de LIGO en el vacío. En principio, esto evita que las corrientes de aire perturben los espejos (incluso en un sistema bien aislado y cerrado, las diferencias de temperatura a lo largo de los brazos del detector pueden provocar vientos) pero fundamentalmente el vacío asegura que el láser pueda viajar a través de una línea recta en los brazos. Leves cambios de temperatura en el brazo provocan que la luz se curve debido a la dependencia del índice de refracción con la temperatura. Incluso una pequeña desviación de la luz en los brazos provoca que el láser choque contra las paredes del tubo, que tiene un diámetro de aproximadamente 1,2 metros en sus 4.000 metros de longitud. LIGO es el mayor sistema de vacío sostenido del mundo, manteniendo 8.500 metros cúbicos a una presión

de una billonésima de la atmósfera terrestre.

Otra mejora son los sistemas internos y externos de aislamiento sísmico. En el interior se encuentran unos imanes minúsculos sujetos al dorso de cada espejo. Las posiciones de estos imanes se detectan por las sombras que producen cuando se iluminan con fuentes de luz LED. Si los espejos se mueven demasiado, un electroimán crea un campo magnético en contra que empuja o tira de los imanes hasta colocar el espejo de vuelta en su posición. Además en el exterior se encuentran los sistemas hidráulicos que minimizan las vibraciones de la superficie terrestre (medidas por los sismómetros cercanos) antes de que provoquen vibraciones en los componentes internos de LIGO.

Por otro lado Japón cuenta con KAGRA, un interferómetro con brazos de 3km que se encuentra cerca de Kamioka, Hida. Comenzó a operar el 25 de febrero de 2020, cuando empezó a coleccionar datos. Es el primer observatorio de ondas gravitacionales en Asia y el primero en el mundo en ser construido bajo tierra. También es el único en usar espejos criogénicos y se espera que tenga una sensibilidad operacional comparable o mayor a la de LIGO y Virgo.

GEO600 es otro observatorio ubicado en Hannover, Alemania. Es uno de los interferómetros más pequeños del mundo con una longitud de solo 600 metros y es la causa del número que lleva en el nombre. A pesar de su pequeño tamaño ha contribuido significativamente al campo de la astrofísica de ondas gravitacionales. Aunque GEO600 no ha detectado ondas gravitacionales ha jugado un rol importante probando y desarrollando nuevas tecnologías que se usaron en los detectores más grandes. Además ha sido involucrado en obras educativas y de divulgación, ofreciendo visitas y workshops.

En India se encuentra INDIGO, el compañero de LIGO en el proyecto LIGO-India, que se espera comience a operar en 2024, mientras que se planifican detectores como el Einstein Telescope y el Cosmic Explorer para la década próxima.

Mediante la detección simultánea de un mismo evento desde múltiples detectores, se puede determinar con precisión una ubicación en el cielo para la fuente de las ondas detectadas. Por ejemplo, las primeras ondas gravitacionales detectadas por LIGO sólo pueden estimar la ubicación de la fuente en una amplia área del cielo del hemisferio sur. Utilizando triangulación, la información sobre el lugar de procedencia de la señal será notablemente mejor.

1.3. Sobre los filtros digitales

En este trabajo se estudian los datos observados por los detectores de ondas gravitacionales ya descritos y se los somete a una serie de filtrados especiales. Por este motivo realizamos una breve introducción al tipo de filtros que usamos.

Un filtro digital es un sistema que, dependiendo de las variaciones de las señales de entrada en el tiempo y amplitud, realiza un procesamiento matemático sobre dicha señal, generalmente mediante el uso de la Transformada rápida de Fourier, obteniéndose en la salida su resultado.

Los filtros digitales tienen como entrada una señal analógica o digital y en su salida tienen otra señal analógica o digital, pudiendo haber cambiado en amplitud, frecuencia o fase dependiendo de las características del filtro. El filtrado digital es parte del procesado de señal digital. Se le da la denominación de digital más por su funcionamiento interno que por su dependencia del tipo de señal a filtrar, así podríamos llamar filtro digital tanto a un filtro que realiza el procesamiento de señales digitales como a otro que lo haga de señales analógicas. Comúnmente se usa para atenuar o amplificar algunas frecuencias. Por ejemplo, se puede implementar un sistema para controlar los tonos graves y agudos de cualquier sistema de audio. El procesamiento interno y la entrada del filtro serán digitales, por lo que puede ser necesario una conversión analógica-digital o digital-analógica para uso de filtros digitales con señales analógicas.

Hay varios tipos de filtros digitales así como distintas clasificaciones de éstos. Según la parte del espectro sobre la cual actúan pueden dividirse en pasa alta/baja, o pasa/rechaza banda. Pero según su respuesta ante entrada unitaria pueden definirse los filtros de respuesta infinita al impulso (IIR) y los de respuesta finita FIR.

FIR corresponde a las siglas en inglés para Finite Impulse Response. Se trata de un tipo de filtros digitales cuya respuesta a una señal impulso como entrada tendrá un número finito de términos no nulos. Para obtener la salida solo se basan en entradas actuales y anteriores. Los filtros FIR tienen la gran ventaja de que pueden diseñarse para ser de fase lineal, lo cual hace que presenten ciertas propiedades en la simetría de los coeficientes. Este tipo de filtros tiene especial interés en aplicaciones de audio. Además son siempre estables. Sin embargo también tienen la desventaja de necesitar un orden mayor respecto a los filtros IIR para cumplir las mismas características, lo que se traduce en un mayor gasto computacional.

Por otro lado los filtros IIR constituyen una familia de filtros donde la señal de salida depende tanto de la entrada actual como de entradas y salidas pasadas. Son de estructura recursiva y contienen una cantidad infinita de coeficientes. Una de las ventajas de los filtros IIR

es su capacidad de conseguir transiciones más agudas o afiladas entre frecuencias pasa-banda y rechaza-banda. Sin embargo son más susceptibles a problemas de estabilidad, además de tener comportamiento no deseado de las fases.

1.4. Contenido del trabajo

Para finalizar con este primer capítulo se resume el modus operandi del trabajo, que quedará más claro a medida que el mismo avance. Vale la pena aclarar que el objetivo del trabajo es realizar un pre-procesado de señales de onda gravitacional con una técnica que preserve lo mejor posible los datos, no así realizar un procesado que estime parámetros de la fuente de dicha onda.

En primer lugar, en el capítulo 2 se explica brevemente acerca del tipo de dato a trabajar y el acceso al mismo. También se expone el modo de uso y diseño de filtros FIR.

Los capítulos 3 y 4 describen las diferencias entre las múltiples versiones de los datos extraídos del portal de eventos, optando por manipular el más crudo, es decir, el menos intervenido.

A las señales de ambos eventos, y de cada interferómetro, se les realizó un análisis preliminar que otorgó una idea de las características de cada detección particular. Así se le diseñó y aplicó un primer filtro pasa-banda para eliminar las frecuencias más bajas y más altas con gran aporte de ruido. A continuación se muestra el diseño minucioso de filtros rechaza-banda, denominados notch, que atenuaron cada pico de frecuencia ruidosa.

Una vez finalizada la aplicación de este último conjunto de filtros se grabó la señal limpia o pre-procesada, la cual es nuevamente analizada con las mismas técnicas que en el estudio preliminar. Luego se graficaron los datos en el dominio temporal y se compararon con los resultados obtenidos mediante otras técnicas.

Al final del trabajo, en el capítulo 5 se discute acerca de las ventajas que pueden tener los métodos aquí utilizados y se comenta sobre la utilidad de estas investigaciones en posteriores estudios teóricos de estos eventos.

Capítulo 2

Antecedentes y técnicas

2.1. Antecedentes

El Centro Abierto de Ciencia de Ondas Gravitacionales, GWOSC por sus siglas en inglés y previamente conocido como el Centro Abierto de Ciencia LIGO, fue creado para proveer acceso público a los datos producidos por ondas gravitacionales. Las colaboraciones en curso son LIGO, Virgo, GEO600 y KAGRA. Han acordado usar el GWOSC como punto primario de acceso al conjunto de datos públicos. Este enfoque colaborativo presenta la ventaja para los usuarios de proveer una interfaz uniforme (catálogo de observaciones) para acceder a datos de múltiples observatorios.

Hasta el momento, el catálogo del GWOSC provee acceso a una larga colección de eventos de ondas gravitacionales detectados por los observatorios de LIGO y Virgo. Para cada evento pueden encontrarse múltiples versiones o lanzamientos de datos e información asociada. Estas diferentes versiones pueden variar en la manera en que son procesados los datos, los métodos de análisis y los criterios usados para identificar y caracterizar el evento. Por ejemplo podrían modificarse los parámetros estimados del evento tales como la masa y *spin* de los agujeros negros del sistema.

La figura 2.1 muestra una aproximación del esquema de observación esperado para cada periodo de observación. Se ve en la figura también la distancia a la cual los detectores de LIGO podrían observar la fusión de una estrella binaria de neutrones (BNS) con una relación señal-ruido (SNR) de 8, luego de promediar sobre la ubicación de la fuente. Dado que los detectores reciben mejoras entre periodos de observación, se incrementa la sensibilidad para las

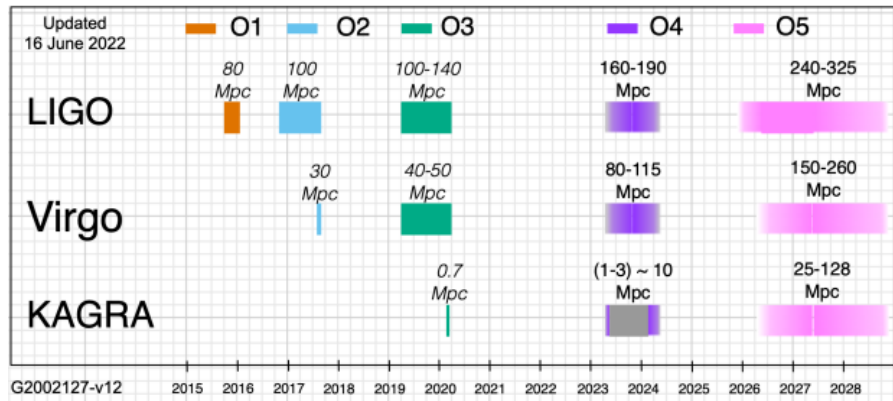


Figura 2.1: Cronología prevista de las observaciones pasadas y futuras. El cronograma y la sensibilidad pueden evolucionar con el tiempo. [Imagen: LIGO]

detecciones. Durante un periodo de observación la serie temporal del dato se colecta y graba en archivos de formato “Gravitational Wave Frame” con la apropiada metadata. Los datos se graban desde numerosas fuentes, incluyendo sensores que monitorean el estado del instrumento (por ej. foto-diodos), el ambiente (por ej. sismómetros) y el estado de la gran colección de controles y filtros procesadores digitales. Con todo esto en cuenta, al rededor de 250,000 canales de información son asociados con cada instrumento, para un total de data de aproximadamente 1,5 petabytes por año entre los dos instrumentos LIGO, Hanford y Livingston, en formato “crudo”. Mientras cada uno de estos canales puede ser utilizado con objetivo de diagnóstico, la salida crítica para las observaciones astrofísicas ocurre a través de los canales llamados “strain”, los cuales se calibran para producir un canal que representa la suma entre el ruido instrumental y las señales astrofísicas en unidades de onda gravitacional. Cada serie temporal de LIGO, o canal, incluye campos para información clave del metadata incluyendo el nombre del canal, frecuencia de muestreo (fs), instante de comienzo y duración. Las versiones del dato analizadas son registradas con una frecuencia de muestreo de 16384Hz, haciendo que se graben cerca de 450MB de información por hora de observación de cada detector. Para facilitar el acceso, además de empaquetar los datos en el formato GWF estándar dentro de la comunidad de ondas gravitacionales, también se graba en formato HDF5, ampliamente utilizado y el que se usó para realizar el presente trabajo. Actualmente, solo se incluyen en el catálogo público los registros que contienen datos válidos (es decir, cuando pasa el canal principal de calidad de dato CAT 1). Durante los primeros tres periodos de observación de Advanced LIGO, se publicaron tanto la serie temporal con $fs = 16384\text{Hz}$ completa, utilizada en este trabajo, como también

el vector reducido a $fs = 4096\text{Hz}$. Por su parte, LIGO aplica una técnica llamada *whitening* o “blanqueamiento” a los datos de ondas gravitacionales que colecta y luego filtros IIR.

El proceso de *whitening* es usado para remover las componentes de frecuencia debidas al ruido de los datos, para que la señal de onda gravitacional sea más fácilmente detectada. Esencialmente, el whitening aplanar el espectro del ruido para que tenga igual potencia en todas las frecuencias.

Este proceso trabaja dividiendo la serie temporal en pequeños intervalos de tiempo, para luego calcular el espectro de potencias de cada intervalo. El espectro de potencias es una manera de representar la distribución de las potencias a lo largo de las diferentes frecuencias que conforman la serie temporal. Luego los datos son divididos por la raíz cuadrada del espectro de potencias en cada frecuencia, lo cual efectivamente aplanar el espectro.

El whitening es típicamente aplicado antes de cualquier análisis de datos, o incluso antes de buscar señales de onda gravitacional. Ha ayudado a mejorar la sensibilidad del análisis y ha facilitado la identificación de señales débiles que de otra manera serían invisibles frente al ruido.

Luego aplican un filtro IIR pasabanda (Butterworth [16]) de 30 – 350Hz y filtros IIR de rechazo de banda para eliminar líneas espectrales instrumentales fuertes que no han sido suprimidas con el blanqueamiento.

En este trabajo se plantea un análisis alternativo debido a que el whitening es un proceso veloz pero agresivo para la señal [11], pudiendo eliminar información útil.

2.2. Diseño de filtros

Los filtros FIR con método de ventanas son una técnica comúnmente utilizada para diseñar filtros digitales con características de respuesta en frecuencia específicas [15].

El método de ventanas implica multiplicar la respuesta al impulso de un filtro ideal (que tendría una respuesta en frecuencia ideal) por una función de ventana para obtener los coeficientes del filtro FIR. Esta función de ventana ayuda a limitar el tiempo de respuesta del filtro en el dominio del tiempo y suaviza los efectos de los flancos de transición en el dominio de la frecuencia, lo que puede mejorar el rendimiento del filtro.

Los filtros FIR con método de ventanas se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde la eliminación de ruido en señales de audio hasta la separación de señales en sistemas de comunicaciones. El método de ventanas permite diseñar filtros con una respuesta en frecuencia

más precisa que la que se puede lograr con otras técnicas de diseño, como el método de respuesta en frecuencia o el método de la transformada inversa de Fourier.

Existen varios tipos de ventanas que se pueden utilizar. A continuación se presentan algunos de los tipos más comunes:

Rectangular: esta función de ventana tiene un valor constante de 1 para todos los valores de tiempo.

Triangular: también conocida como “ventana de Bartlett”, esta función de ventana crece de forma lineal de 0 a 1 y luego disminuye de 1 a 0.

Hamming: esta ventana se utiliza a menudo en aplicaciones de procesamiento de señales de audio. Tiene una forma similar a una “campana”, con una caída suave de los valores de amplitud hacia los extremos.

Hanning: también conocida como *ventana de Hann*, esta ventana tiene una forma similar a la ventana de Hamming, pero con un aumento y disminución más suaves.

Blackman: esta ventana tiene una forma de campana más pronunciada que la ventana de Hamming, lo que significa que los valores de amplitud caen más rápidamente hacia los extremos.

Kaiser: utilizada a menudo en aplicaciones de procesamiento de señales digitales que requieren una respuesta en frecuencia muy precisa.

Cada tipo de ventana tiene sus propias características únicas y se utiliza en diferentes aplicaciones según las necesidades de la aplicación. En este trabajo para aplicar los filtros se utiliza la ventana *Kaiser*. La forma de la ventana Kaiser es de la forma

$$w_n = \begin{cases} \frac{I_0\left(\beta\sqrt{1-\left(\frac{2n}{M-1}\right)^2}\right)}{I_0(\beta)} & \text{si } -\frac{M-1}{2} \leq n \leq \frac{M-1}{2} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

donde I_0 es la función de Bessel modificada de primer tipo de orden cero, β es un número real arbitrario que determina la forma de la ventana y M es un número natural que determina el número de coeficientes no nulos de la ventana. El hecho de que esta ventana sea ajustable mediante el parámetro β , permite un mayor control sobre el ancho de banda y la atenuación en las frecuencias de corte.

Dado el tipo de colección de dato en forma de serie temporal con muestreo regular, resulta muy útil el uso de la transformada de Fourier para llevar la señal al dominio de frecuencias. En este caso se utilizan funciones de Densidad Espectral de Amplitudes (ASD) y espectrogramas. Ambas utilizan la transformada rápida de Fourier (FFT)

El espectro de potencia de una serie temporal describe la distribución de la potencia en las componentes de frecuencia que componen esa señal. De acuerdo al análisis de Fourier, cualquier señal física puede ser descompuesta en un número discreto de frecuencias, o un espectro de frecuencias sobre un rango continuo. El promedio estadístico de una señal particular o de un tipo de señales (incluyendo el ruido) analizado en términos de las frecuencias que contiene, es a lo que se llama espectro.

La densidad espectral de potencia, o espectro de potencia, aplica a señales existentes en todo tiempo, o sobre un periodo temporal tan extenso en comparación al tiempo de muestreo que podría bien haberse tratado de un intervalo de tiempo infinito. Así es que la densidad espectral de potencia (PSD) refiere a la distribución espectral de energía medida por unidad de tiempo. Luego si la señal es una onda de cualquier naturaleza (electromagnética, acústica, vibracional), el PSD de la onda describe la potencia presente en la señal como función de la frecuencia, por unidad de frecuencia. En este trabajo se utiliza la densidad espectral de amplitudes (ASD), que se relaciona con la PSD dado que es su raíz cuadrada.

Por otro lado un espectrograma es una representación visual del espectro de frecuencias que se vuelve interesante al incluir un eje temporal, indicando cómo varía el espectro de frecuencias de una señal en el tiempo. Son extensamente utilizados en campos como música, lingüística, radar, sismología, entre otros, y usualmente se ilustran como mapa de color asociando diferentes intensidades con una gama de colores. Así, entonces, la ASD es función solo de la frecuencia y los espectrogramas muestran amplitudes para cada par tiempo-frecuencia.

2.3. Aplicar un filtro FIR a un caso particular

En la figura 2.2a se observa una ventana Kaiser, con $M = 40960$ y $\beta = 14$. Para el diseño de filtros con método de ventana se utiliza la función `signal.firwin` de la biblioteca `scipy` de python.

Esta función tiene los siguientes parámetros:

numtaps : la cantidad de coeficientes del filtro.

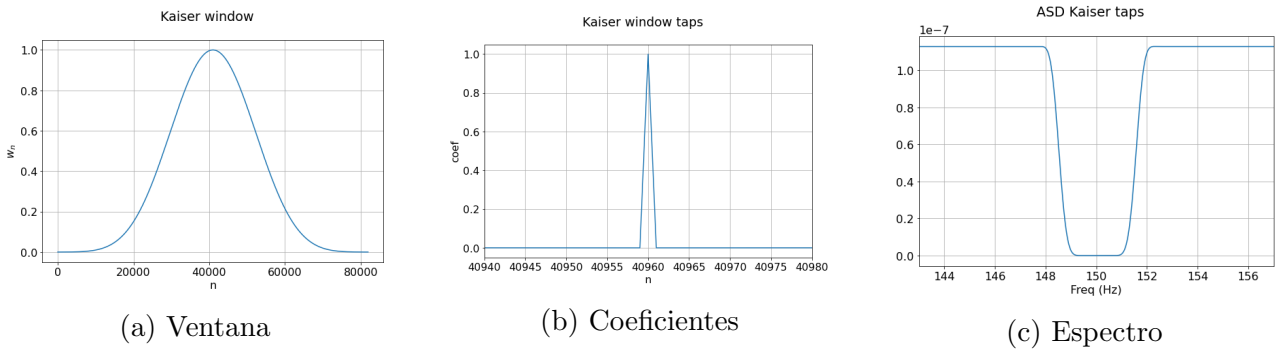


Figura 2.2: Filtro Kaiser, diseñado para 81921 puntos. En (a) la ventana, en (b) los coeficientes del filtro y en (c) el espectro de amplitudes de (b).

cutoff : frecuencia de corte para el filtro o un arreglo de frecuencias de corte (extremos de cada banda) divididas por la frecuencia de Nyquist $nyq = fs/2$. En el último caso, las frecuencias de corte deben ser positivas y monótonamente crecientes.

window : ventana que se desea usar y parámetros que necesite esa ventana.

pass_zero : parámetro opcional, *True* para filtros pasa-baja.

Utilizando `numtaps=81921`, `cutoff=[148.5,151.6]/nyq`, `window=('kaiser',14)` como argumentos la función retorna el arreglo `taps` que contiene los coeficientes del filtro y se ilustra en la figura 2.2b.

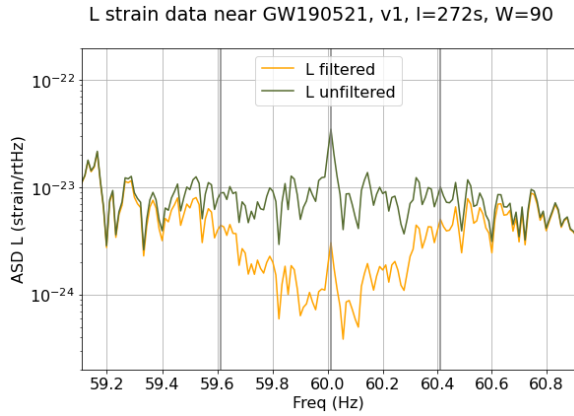
Luego, computando la ASD del vector `taps` se obtiene el espectro de la figura 2.2c.

Finalmente, cuando se tienen los coeficientes del filtro, se realiza la convolución del vector `taps` con el espectro de la señal a filtrar mediante la función `scipy.signal.fftconvolve`, resultando la señal filtrada.

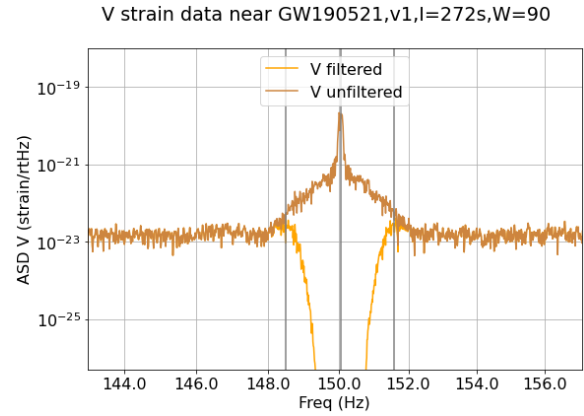
En la figura 2.3 se presentan algunos ejemplos del efecto de la aplicación de filtros. En 2.3a se observa el filtro aplicado al espectro de la señal de Livingston, denotada según L , al rededor de 60Hz debido al ruido de la corriente alterna. Mientras tanto en la figura 2.3b se aprecia el filtrado del pico de 150Hz en la señal de Virgo, denotada según V , causada por el armónico de la corriente alterna de Italia.

La intensidad de la componente de Virgo alrededor de 150Hz representa un desafío a la hora del diseño de filtro, debido a que debe desarrollarse lo suficientemente ancho como para atenuar los picos entre 148Hz y 152Hz. En el caso de la figura 2.3b las frecuencias de corte para el filtro

son 148,5Hz y 151,6Hz. Al estar estas frecuencias tan separadas, el efecto del filtro es bastante agresivo, eliminando una ancha banda de frecuencias.



(a) Filtro para *Livingston*, pico de 60Hz.



(b) Filtro para *Virgo*, pico de 150Hz.

Figura 2.3: Algunos de los filtros aplicados a las señales del evento *GW190521*. En verde (izquierda) el espectro de *Livingston* en crudo y en marrón (derecha) el de *Virgo* en crudo. En amarillo, los espectros de la señal filtrada para cada detector.

Capítulo 3

Estudio del evento GW190521

3.1. Estudio preliminar

El evento GW190521 fue registrado tanto por Livingston (L) y Hanford (H), como por Virgo (V). Al momento de realizar el presente trabajo, el evento GW190521 tiene 4 versiones, por lo que la primera instancia es decidir con cuál trabajar. Además puede ser encontrado en algunas publicaciones, o catálogos, como GW190521_030229 o bien S190521g.

En el catálogo del GWOSC estas 4 versiones presentan diferencias en los parámetros estimados para las masas de los agujeros negros, redshift, distancia luminosa, entre otros. En este trabajo se realizó una comparación directa entre las series temporales encontrando que no son iguales. Sin embargo resulta más instructivo comparar sus densidades espectrales. Al ver los espectros, la única diferencia observada fue una atenuación en los picos de frecuencia correspondiente a la corriente alterna (60Hz para LIGO y 50Hz para Virgo) en dos de las versiones. Mientras tanto, como las otras dos versiones restantes resultaron indistinguibles, se trabajó con la versión publicada como “versión 1” que no presenta dicha atenuación en su ASD.

La serie temporal original, descargada del portal de eventos del GWOSC, tiene frecuencia de muestreo $f_s = 16\text{kHz}$ y corresponde a un registro de 4096 segundos. A esta serie temporal se le extraen los 288 segundos centrales, donde en la mitad se encuentra la señal de onda gravitatoria.

Así es que el primer tratamiento se hace sobre el vector correspondiente a 288s de señal sin filtrado previo. En la figura 3.1 se encuentra la densidad espectral de amplitud para los detectores involucrados y se observa un importante aporte en componentes de bajas frecuencias no pertenecientes a una onda gravitacional. Los tres gráficos de esta figura se construyen con

ventanas de 4s (negro), 21s (azul) y 90s. A medida que se aumenta el ancho de la ventana aumenta la estadística y la ASD muestra mayores variaciones que las calculadas con ventanas cortas, dado que tienen mayor resolución en frecuencias.

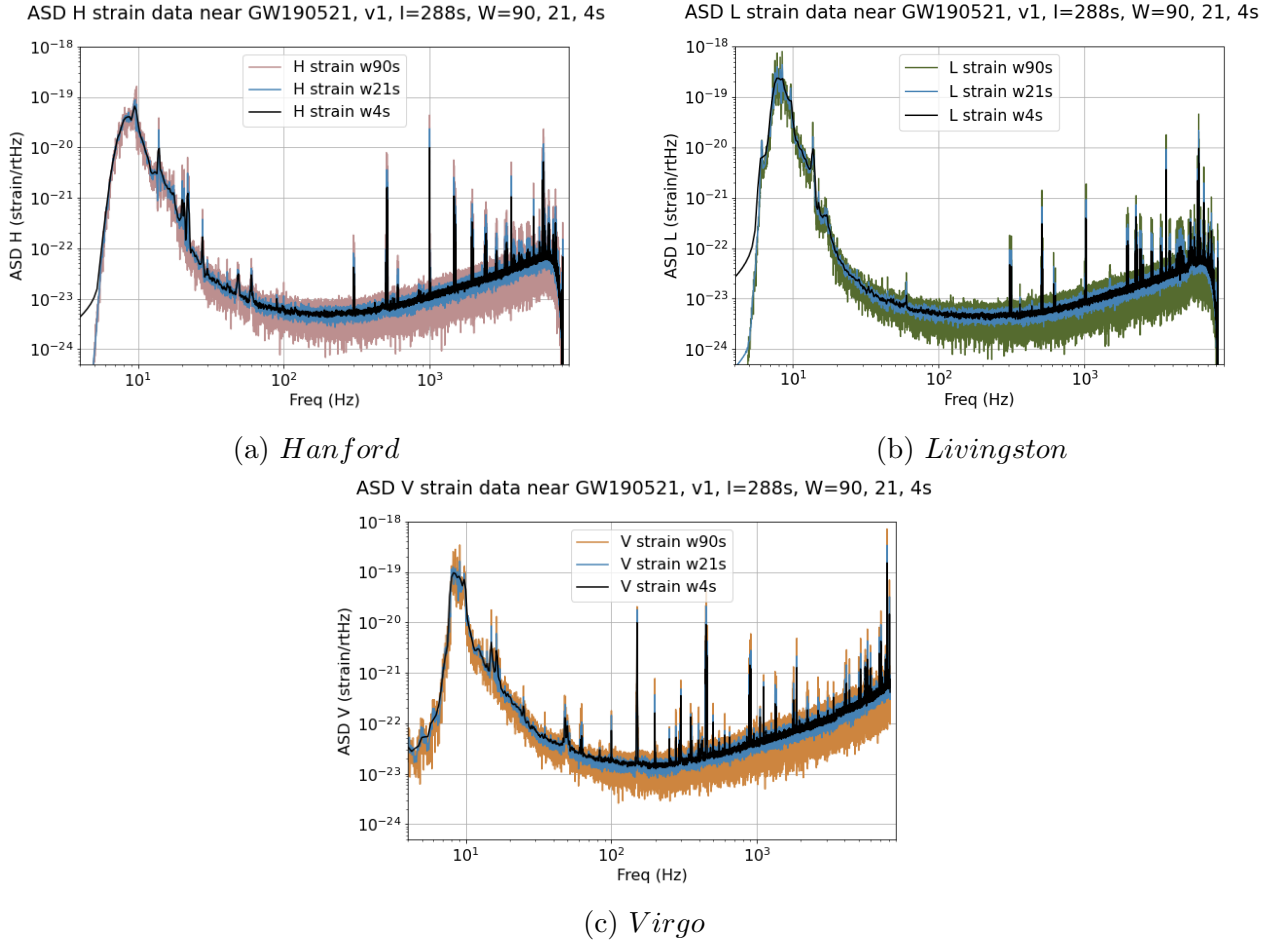


Figura 3.1: ASD de detecciones en crudo para evento GW190521

Si bien los espectros del registro de cada interferómetro son similares en estructura, presentan algunas diferencias notables. Todos los espectros cuentan con un importante aporte de frecuencias menores a 50Hz y la causa es posiblemente la presencia de ruido sísmico. Este tipo de ruido es a veces llamado ruido de color. Luego de esa “montaña” de ruido, hay una “meseta” donde el espectro es más llano o uniforme, exceptuando picos de frecuencias particulares. Esta meseta tiene componentes en frecuencia con magnitudes comprendidas entre 10^{-24} y 10^{-23} . Sin embargo la señal de Virgo, en la figura 3.1c, tiene un espectro cuya porción central es de un

orden de magnitud mayor a la de los detectores estadounidenses y esto otorga indicios de la comparación que se obtendrá al observar en el dominio temporal las señales filtradas.

Por otro lado, es instructivo analizar cómo cambia el espectro de amplitudes a lo largo del tiempo. En el caso de los eventos elegidos para el trabajo, la duración de la onda gravitacional detectable es de orden 10^{-1} segundos. Por eso el intervalo temporal analizado en el espectrograma será de 1 segundo al rededor del evento.

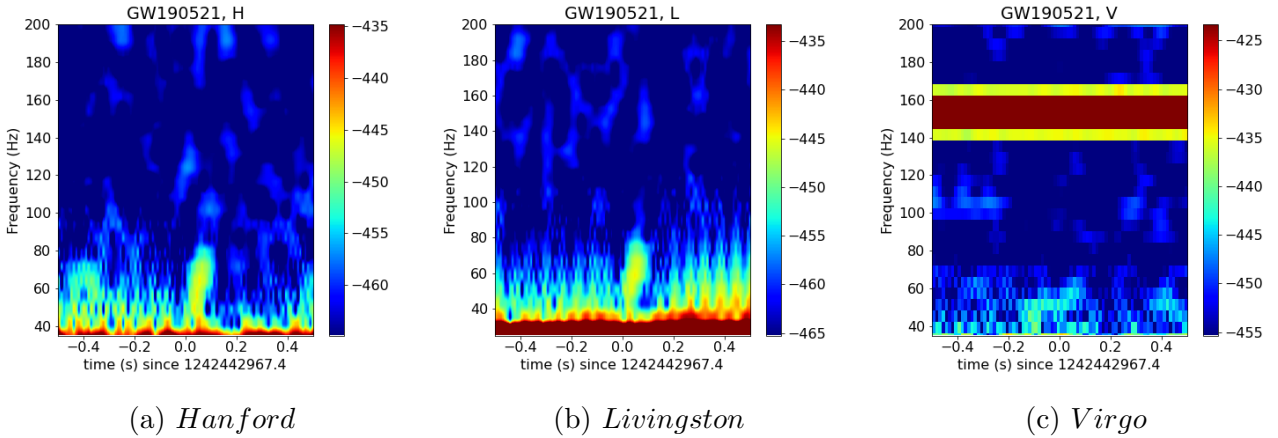


Figura 3.2: Espectrograma de señales crudas para GW190521

Típicamente los espectrogramas de ondas gravitacionales muestran componentes en frecuencias que se visualizan como una “*J*”. Sin embargo, en este evento la forma en el espectrograma es un poco diferente. En la figura 3.2 se pueden ver los espectrogramas para el evento GW190521. Al igual que en las otras imágenes de este evento, el origen temporal se corresponde al tiempo del evento $t_{event} = 1242442967,4$ GPS. Este valor es extraído directamente del portal de eventos.

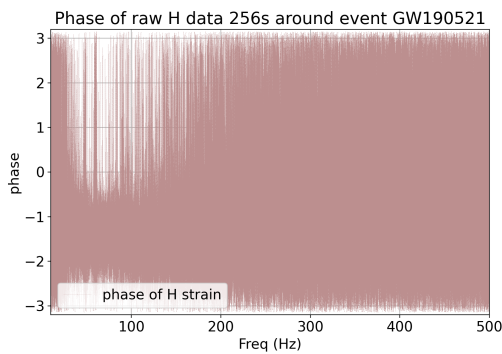
Vale aclarar que el tiempo utilizado comúnmente o *tiempo UTC* es poco usado en ámbitos en que se necesita un preciso control y transmisión de esta variable. De hecho, si una persona quisiera indicar un instante de tiempo, debería informar múltiples valores: año, mes, día, hora, minutos, segundos. Es por eso que se encuentra gran utilidad en el tiempo GPS, medido con relojes atómicos, que consta de un único número correspondiente a la cantidad de *segundos* que transcurrieron desde las 00 : 00 del día 6 de Enero de 1980.

Así es que el t_{event} para el evento GW190521 equivale en tiempo UTC a las 03 : 02 del día 21 de Mayo de 2019.

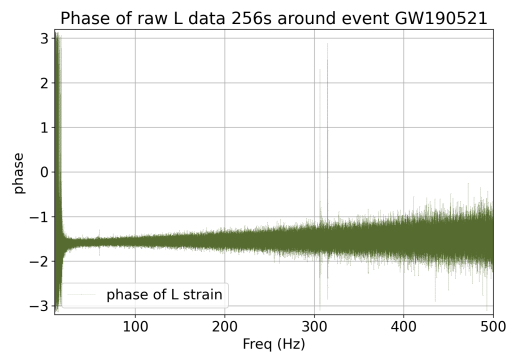
Respecto a los espectrogramas de la señal sin filtrar, o cruda, en las figuras 3.2a y 3.2b correspondientes a Hanford y Livingston respectivamente, se destaca una zona muy cercana a

t_{event} que presenta componentes interesantes de frecuencias entre 30 y 90 Hz, lo que indica una posible onda gravitacional. A pesar de eso también se ve una saturación en frecuencias bajas, lo cual es esperable luego de ver el ruido de color presente en los espectros de amplitud.

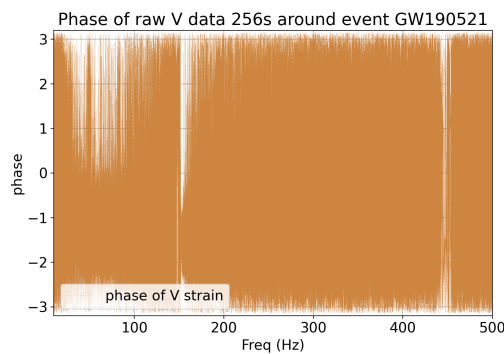
Por otro lado en el espectrograma crudo para Virgo, en la figura 3.2c, lo más llamativo es el hecho de que se encuentra una saturación en la banda de frecuencias alrededor de 150Hz. Además, no presenta un aporte de frecuencias cerca del origen comparable con los otros interferómetros de la colaboración.



(a) *Hanford*



(b) *Livingston*



(c) *Virgo*

Figura 3.3: Diagrama de fases de señales crudas para GW190521

En la figura 3.3 se presentan los diagramas de fase para las detecciones, utilizando el dato crudo de 288s para frecuencias menores a 500Hz. La fase y la frecuencia se calculan usando las funciones de la biblioteca de `python`, `numpy`, que contiene `fft.rfftfreq`, `fft.rfft` y `angle` donde el argumento de la última es el resultado de aplicar `fft.rfft` al strain.

Este tipo de diagramas muestra la distribución de las fases de la señal en función de la

frecuencia y en este caso se puede ver que hay una fuerte correlación, lo que implica serios problemas con el ruido de todos los detectores. Además se refuerza la interpretación de que en el dato crudo el ruido no tiene distribución Gaussiana, ya visto en las anteriores ASD.

3.2. Gráficos luego del primer filtro pasa-banda

En esta sección se presentan los gráficos ASD y del dominio temporal luego de aplicar el primer filtro pasa-banda diseñado para cada detector.

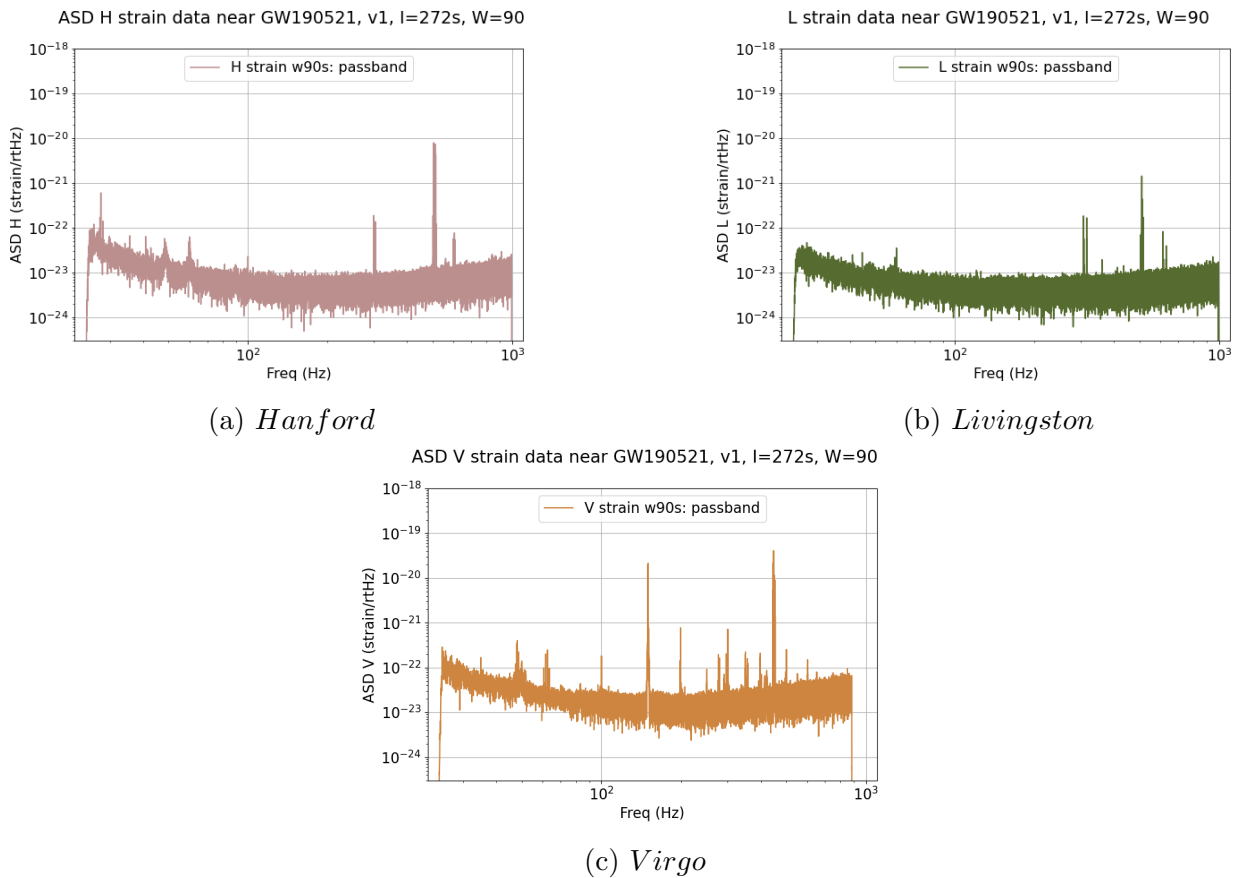


Figura 3.4: ASD de detecciones con filtro pasa banda para evento GW190521

Para comenzar el pre-procesado se trabaja con el aporte en frecuencias bajas, que presentan gran amplitud y consisten principalmente en ruido. Es por eso que se aplica un filtro pasa-alta para conservar solo componentes de frecuencia mayor a 25Hz. El objetivo de esto es elegir una

frecuencia que permita evitar el ruido de color pero que a su vez mantenga la mayor cantidad posible de aporte en frecuencias bajas, muy importantes al analizar la etapa del inspiral.

En segunda instancia se utiliza un filtro pasa-baja para frecuencias menores a 995Hz de modo de recluir la zona de frecuencias que rodean los 1000Hz y presentan mucho ruido. El espectro que resulta luego de utilizar estos filtros en cada detector es presentado en la figura 3.4, donde se encuentran Hanford (a), Livingston (b) y Virgo (c). Para el caso de Virgo se usa una frecuencia de corte en 883Hz debido al gran ruido al rededor de los 900Hz.

Luego de aplicar estos filtros se recortan los extremos del vector de 288 segundos para que resulte una serie temporal de 272s al rededor del tiempo del evento. Sin embargo esta serie conserva muchos picos ruidosos, por lo que el vector de 272s es grabado para el posterior filtrado.

A continuación se presenta en la figura 3.5 esta señal resultante en el dominio temporal, para un intervalo de 4 décimas de segundo de longitud y centrado en t_{event} .

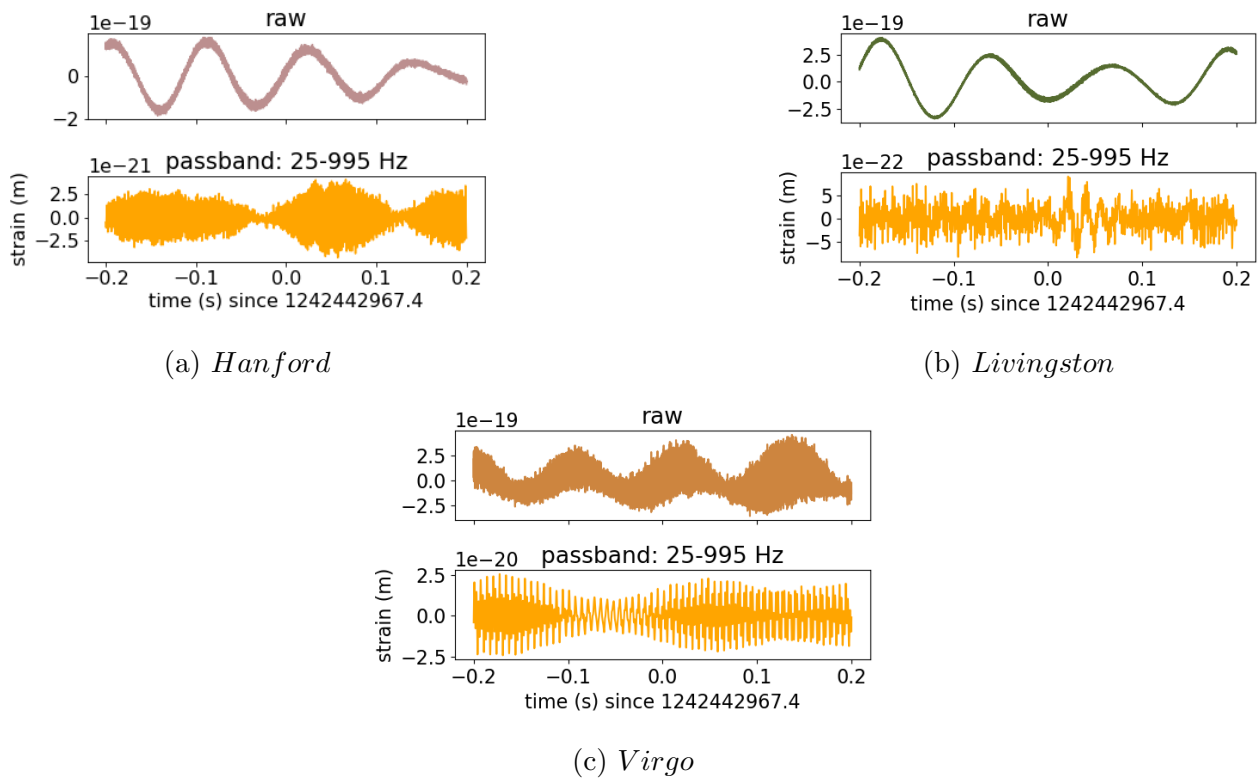


Figura 3.5: Detecciones con filtro pasa banda para evento GW190521

Se puede ver en la figura que para el detector de Virgo, la aplicación del filtro pasa-banda

produce una disminución en el strain de un orden de magnitud. En cuanto a la detección de Hanford, el filtro produce un efecto más pronunciado, ya que en la figura 3.5a se observa que en el strain se reducen dos órdenes de magnitud, pasando a presentar amplitud de orden 10^{-21} .

Mientras tanto, en la figura 3.5b la señal con filtro pasa-banda de Livingston muestra una mejora más impresionante, al reducirse la magnitud llegando a obtenerse un strain con amplitud de orden 10^{-22} . Vale la pena enfatizar aquí que solo con el uso de un filtro pasa-banda Livingston ya puede mostrar a partir del origen temporal la onda gravitatoria.

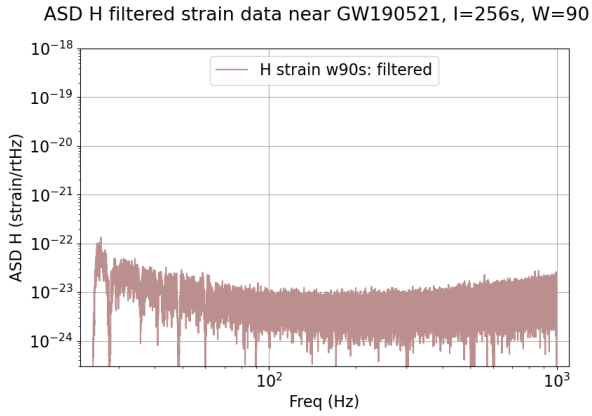
3.3. ASD luego del filtrado

Ahora, partiendo de la señal de 272 segundos que se corresponde a la ASD de la figura 3.4, deben tratarse los picos de frecuencias ruidosas. Para esto se utilizan filtros suprime-banda, también llamados filtros notch, que atenúan el aporte de las frecuencias no deseadas.

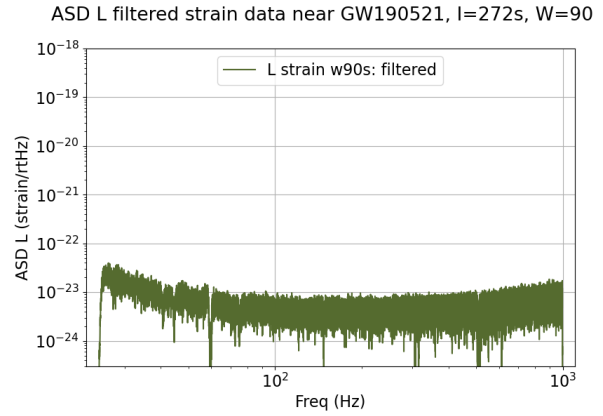
La corriente estándar utilizada en Estados Unidos es de 60 ciclos por segundo, es decir que es esperable que aparezca en los espectros una fuerte componente de frecuencia 60Hz; en Europa la corriente alterna se genera con 50 ciclos por segundo o 50Hz. Así es que los detectores Hanford y Livingston presentan un gran aporte en la componente de 60Hz, pero también se registran los armónicos ubicados en los múltiplos de esa frecuencia, por ejemplo 120Hz. Mientras tanto en el caso de Virgo los armónicos presentes están en 100Hz, 150Hz, etc. Se procede entonces a utilizar filtros rechaza-banda con frecuencias de corte lo más cercanas posible con el fin de reducir el aporte del ruido a una amplitud menor a la del resto de la señal.

Para la señal de Livingston se diseñaron 68 filtros, siendo el de la figura 2.3a uno de ellos. Para el caso de Hanford se diseñaron otros 28 y en Virgo se aplicó un total de 37 filtros, entre los cuales se encuentra el de la figura 2.3b.

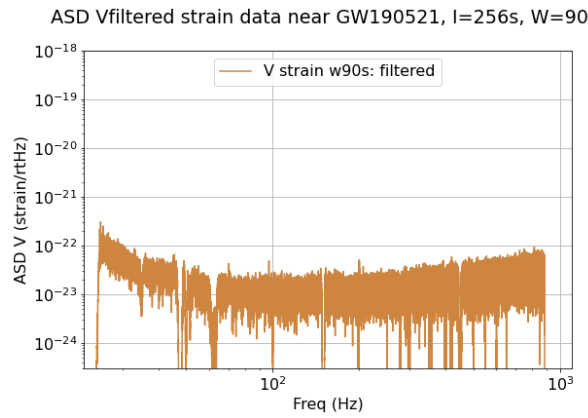
Luego de la aplicación de los filtros elegidos se recortan nuevamente los extremos de la serie temporal, para obtener un vector de 256 segundos correspondiente a la señal completamente filtrada. Los ASD se presentan en la figura 3.6. En ella se observa un espectro de amplitudes sin picos de ruido para los interferómetros de Hanford, Livingston y Virgo en 3.6a, 3.6b y 3.6c respectivamente. Cabe destacar que salvo por la curvatura en las bajas frecuencias, el comportamiento que presenta el espectro filtrado es casi llano. Esta curvatura es más pronunciada para el espectro de Virgo, como era esperado dados sus espectros anteriores, pero también muestra una pronunciada supresión en algunas bandas de frecuencias como la de 150Hz.



(a) *Hanford*



(b) *Livingston*



(c) *Virgo*

Figura 3.6: ASD de detecciones filtradas para evento GW190521

3.4. Espectrogramas luego del filtrado

Nuevamente para analizar cómo cambia la intensidad de las componentes de diferentes frecuencias a lo largo del tiempo, es preciso utilizar espectrogramas. Los espectrogramas de la señal filtrada en la figura 3.7 muestran, al igual que los ASD, una gran disminución del ruido en comparación a los gráficos de la señal sin filtrar. En las figuras 3.7a y 3.7b se tienen los espectrogramas de Hanford y Livingston, mientras que para mejorar la relación señal-ruido puede realizarse un promedio entre ambas señales filtradas, cuyo gráfico se presenta en la figura 3.7c.

En las figuras 3.7d y 3.7e se tienen dos espectrogramas de la señal filtrada de *Virgo*. La primera (d) utiliza un rango de intensidades, o escala de color, que destaca únicamente las

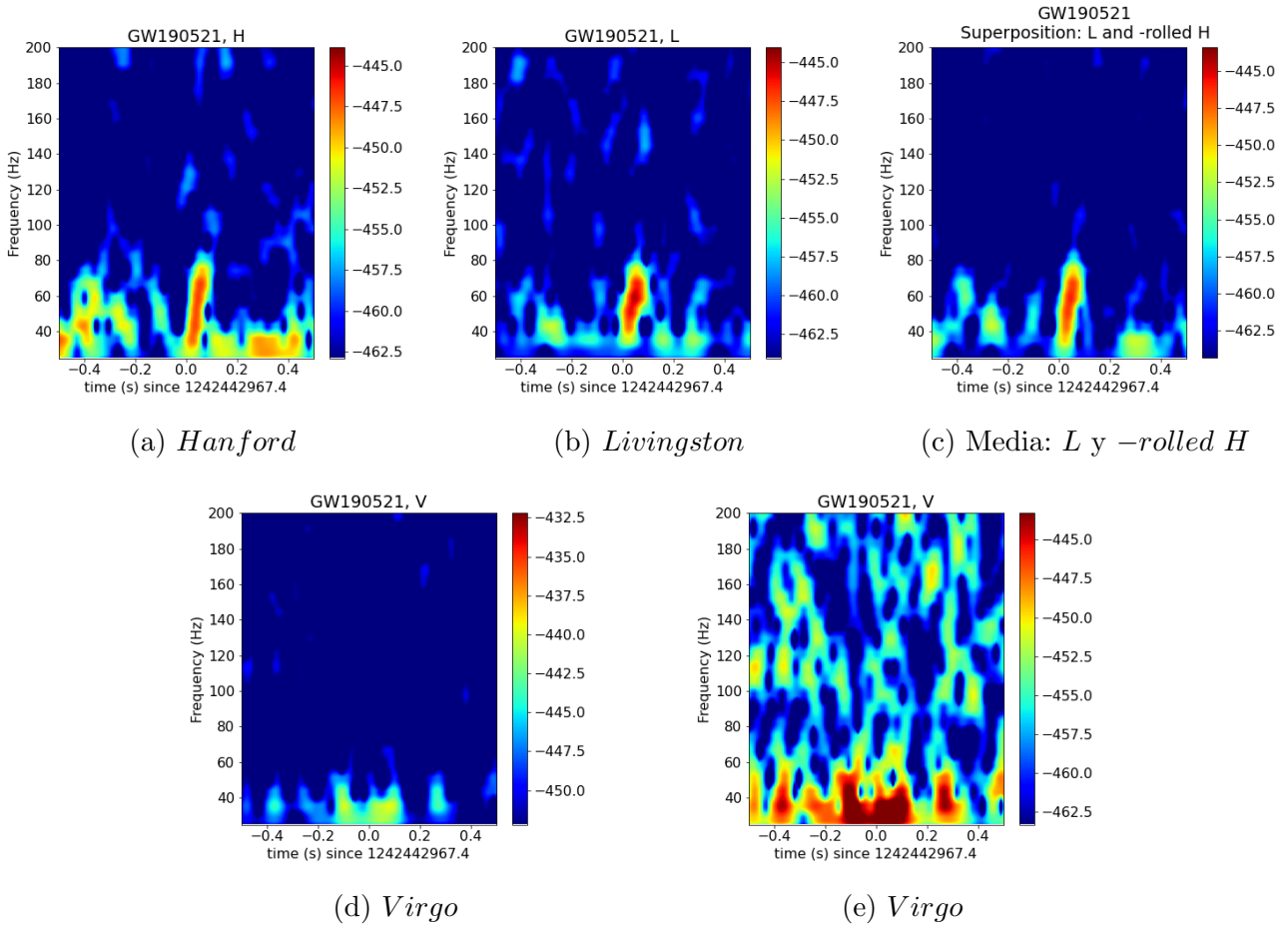


Figura 3.7: Espectrograma de señales filtradas para GW190521. Las figuras 3.7d y 3.7e corresponden a la misma señal pero se muestran en distinto rango de intensidad.

componentes más intensas; mientras que la segunda (e) es coloreada en la misma escala que las imágenes de los detectores estadounidenses y muestra muchísima contaminación que no pudo ser filtrada, posiblemente debido a su baja precisión.

3.5. Diagramas de fase luego del filtrado

Luego se recurre nuevamente a los diagramas de fase de cada una de las señales filtradas, que se encuentran la figura 3.8. En esta ocasión, en los diagramas de Livingston y Hanford se ve una distribución uniforme para el rango de frecuencias de interés, dando a entender que el ruido es gaussiano después del filtrado. Sin embargo el diagrama de Virgo, en la figura 3.8c,

presenta numerosas bandas blancas. Estas bandas aparecen por el agresivo filtrado que se debió aplicar para atenuar o incluso eliminar el aporte de las frecuencias ruidosas.

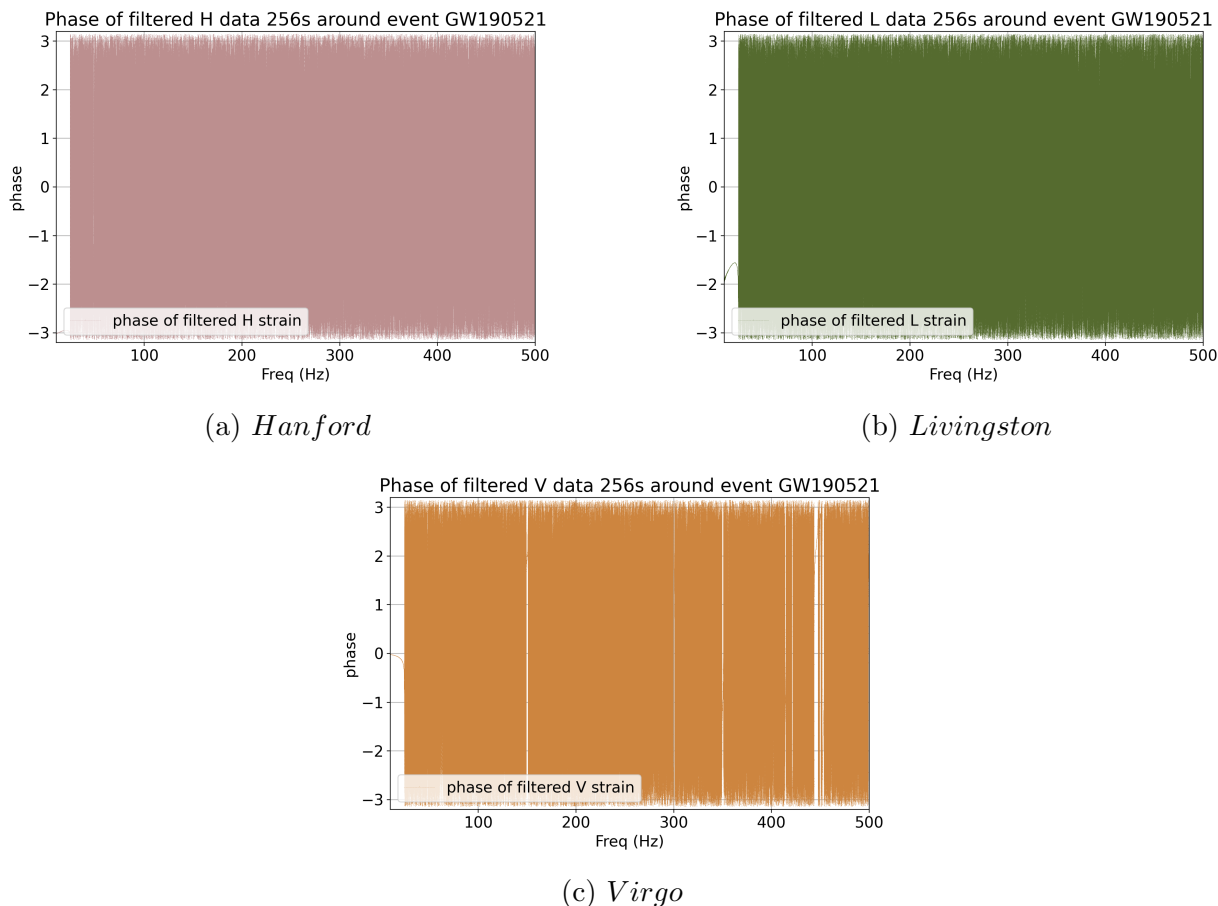


Figura 3.8: Diagrama de fases de señales filtradas para GW190521

3.6. Gráficos en el dominio temporal

3.6.1. Estudio del desplazamiento temporal

Una vez terminado el diseño de filtros se vuelve a representar la señal en el dominio temporal y se estudian diferentes intervalos del mismo.

Ahora bien, es natural querer comparar las señales superponiendo las ondas, pero como los detectores estadounidenses están distanciados por cerca de 3000km , no detectan la señal al

mismo tiempo ni de la misma forma y, por ejemplo, el intervalo en que se encuentra la señal variará según el interferómetro consultado.

Entonces imaginemos a cada interferómetro y su par de brazos como una “L”. Esos brazos determinan un plano que contiene a los haces de luz cuya interferencia es medida. Así, pensando en que como toda onda la gravitatoria posee un frente de onda determinado, no puede asumirse que todo detector registrará la misma señal, sino que ésta se verá afectada por el ángulo existente entre el plano que contiene los brazos del interferómetro y el plano del frente de onda.

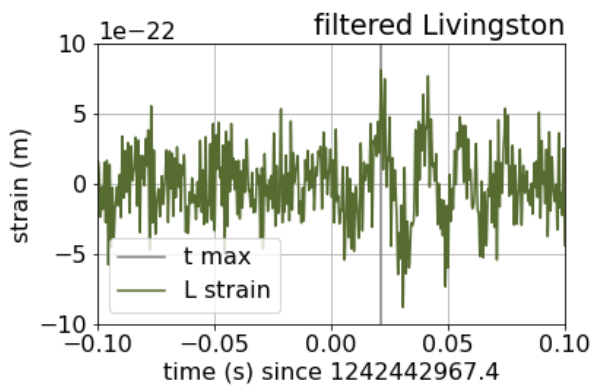
Sin embargo dada la posición y orientación de los detectores estadounidenses, para comparar las señales de *Livingston* y *Hanford* se realiza un procedimiento similar a lo que se sugiere en el trabajo [8] realizado por LIGO/Virgo, donde puede reflejarse una señal respecto al eje de las abscisas y desplazarla horizontalmente de forma que coincidan las ondas de cada una. Esto es posible debido a que los planos que forma cada uno de esos interferómetros son casi paralelos y los brazos están rotados cerca 90 grados, por lo que se toma esa aproximación.

Al ser *Livingston* el de mayor precisión, se lo eligió para definir el denominado t_{max} . Este tiempo corresponde al instante en que la señal astrofísica presenta la mayor amplitud. Por supuesto esto depende del rango de frecuencias que se visualice, por lo que en la figura 3.9 se observa un intervalo de $0,2s$ al rededor del t_{event} con diferentes frecuencias de corte. Para esto se aplicó un filtro pasa-baja que permite analizar las componentes de la serie temporal que presenten frecuencias menores a 995Hz, 700Hz, 400Hz, 200Hz y 150Hz.

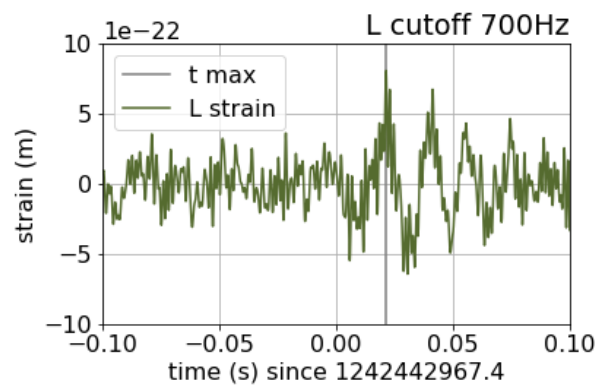
Se determina para este evento un tiempo máximo dado por $t_{max} = t_{event} + 0,0215s$.

Como aproximación para estimar la diferencia de tiempo de llegada a cada uno de ellos, se desplaza la señal de *Hanford* multiplicada por -1 (simbolizada como $-H$), para encontrar las figuras 3.10a y 3.10b con los valores de desplazamiento $-2,5ms$ y $-1,7ms$ respectivamente. Ese desplazamiento se lleva a cabo mediante la función `roll` de `numpy` por lo que se llama al strain trasladado como *rolled Hanford*.

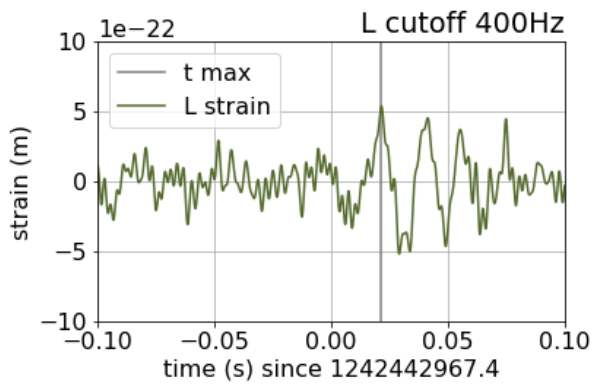
El objetivo de la figura 3.10 es ilustrar la dificultad de elegir un valor de desplazamiento o *shift* de la señal $-H$. Con un *shift* de $-1,7ms$ puede verse una mejor coincidencia de los picos más pronunciados, mientras que con $-2,5ms$ hay una mayor similitud en las pendientes al centro de la imagen. Se elige trabajar con el *shift* de $-2,5ms$ para ilustrar el dominio temporal en el pasado de la señal.



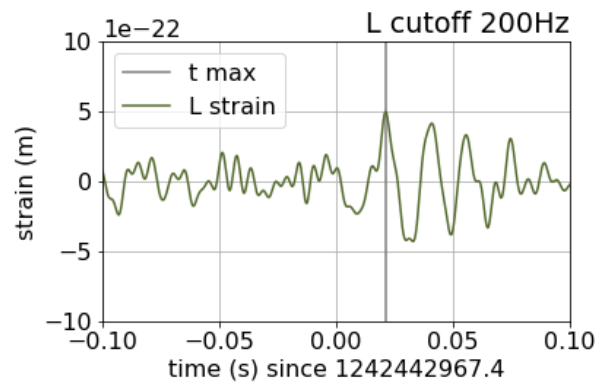
(a)



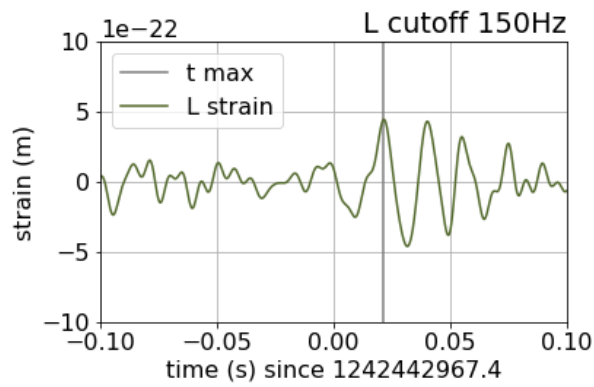
(b)



(c)

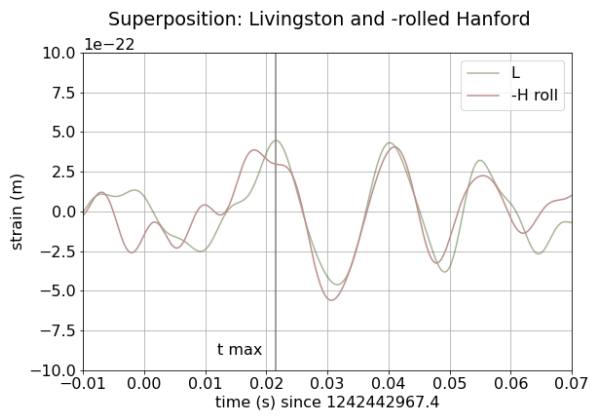


(d)

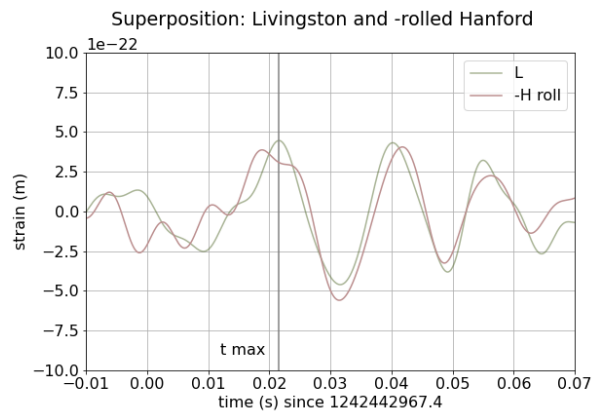


(e)

Figura 3.9: Señal de Livingston utilizada para determinar t_{max}



(a) Shift: -2,5ms



(b) Shift: -1,7ms

Figura 3.10: Diferentes valores de shift para la señal de Hanford, con frecuencias menores a 150Hz

3.6.2. Desde -0,30s hasta 0,10s

En las figuras 3.11 y 3.12 se representa en el dominio temporal la superposición de las series temporales de 256s de Livingston (verde) y -rolled Hanford (rosado). El intervalo de tiempo que se grafica es $[-0,30; 0,10]$ s y nuevamente el origen se corresponde con t_{event} .

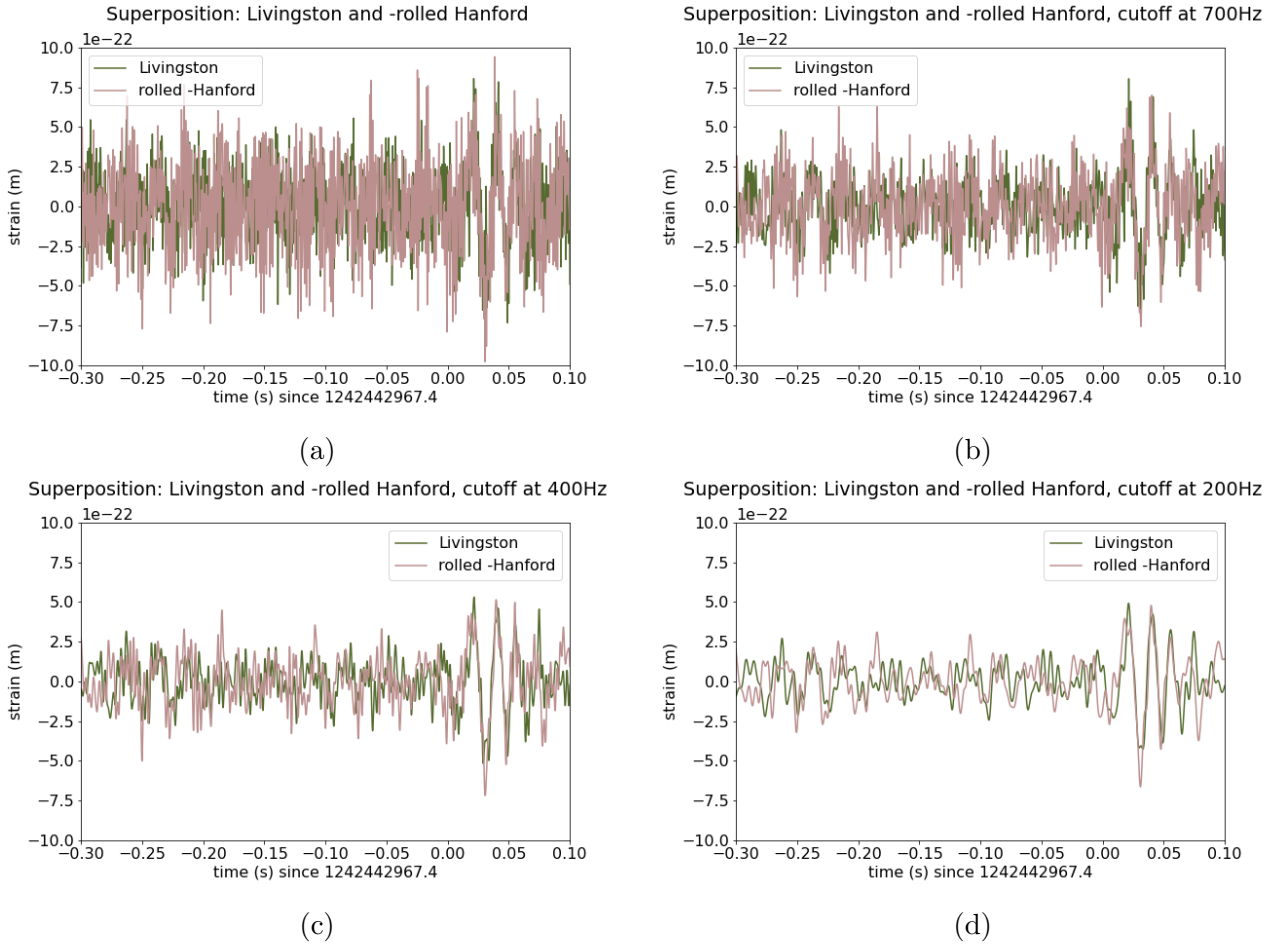
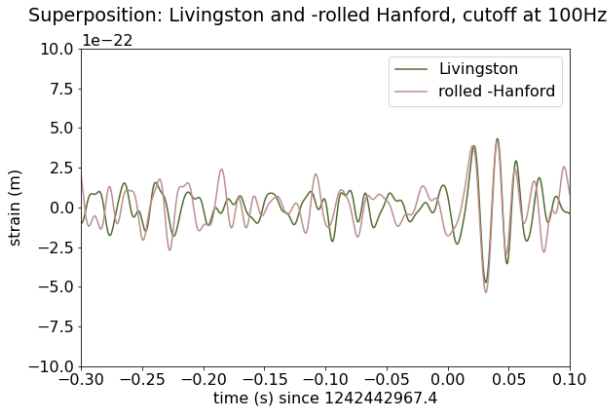


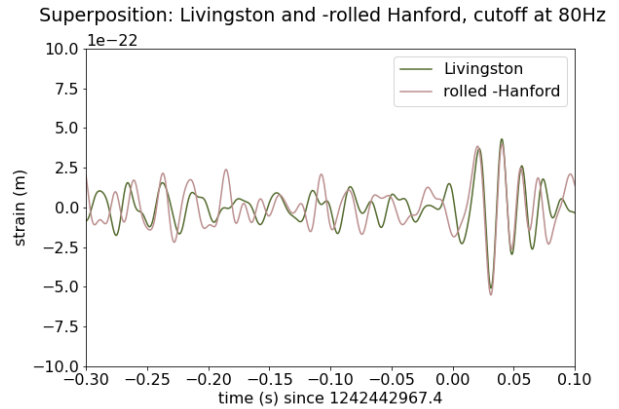
Figura 3.11: Hanford y Livingston strain filtrados en el rango temporal $[-0,3;0,1]$ s con distintas frecuencias de corte para el filtro pasa-baja.

No se logra reconstruir una señal de Virgo comparable con las demás y es por eso que no se agrega en el análisis posterior.

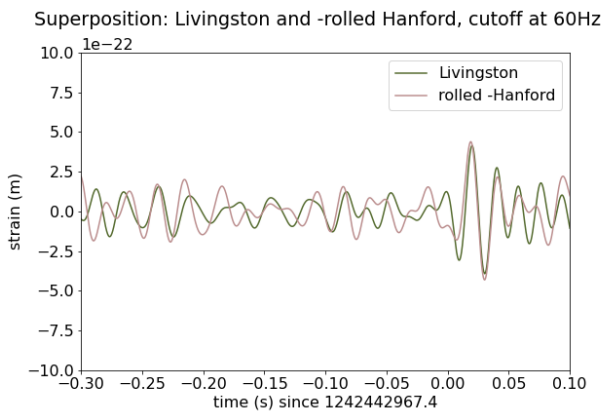
Para obtener mayor posibilidad de comprensión se ilustran las señales filtradas en diferentes rangos de frecuencias utilizando nuevamente distintos filtros pasa-baja. La frecuencia que determina el filtro, frecuencia de corte es de 995Hz, 700Hz, 400Hz, 200Hz, 100Hz, 80Hz, 60Hz



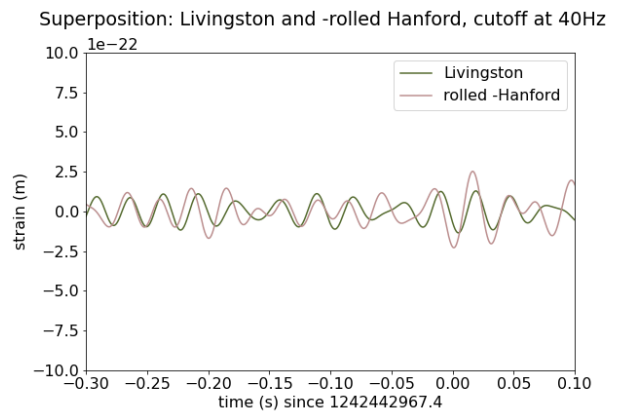
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.12: Hanford y Livingston strain filtrados en el rango temporal $[-0,3;0,1]$ s con distintas frecuencias de corte para el filtro pasa-baja.

y 40Hz, para las respectivas figuras 3.11a, 3.11b, 3.11c, 3.11d, 3.12a, 3.12b, 3.12c, 3.12d.

Para las figuras con alta frecuencia de corte, es decir mayores a 400Hz, la señal conserva bastante ruido y en ellas se ve una componente de frecuencia alta montada sobre una señal de frecuencia menor.

Comenzando entonces el análisis de las figuras, aproximadamente entre $t = 0$ y $t = 0,07$ se reconoce una clara señal de onda astrofísica, aunque de forma ligeramente diferente a lo esperable para una onda gravitacional proveniente de la coalescencia de dos objetos masivos.

Normalmente se esperaría una forma de “trompeta” que llega a una amplitud máxima de forma gradual durante el inspiral y que decae muy rápidamente luego del merger. En este caso, no se observa ese aumento paulatino típico del inspiral.

Cuando la frecuencia de corte se reduce a 200Hz, comienza a verse menos ruido. Sin embargo para frecuencias de corte menores a 80Hz la señal pierde demasiada información y el evento astrofísico se vuelve comparable al ruido de los sensores.

Puede apreciarse también que al rededor de los tiempos $-0,10s$ y $-0,25s$ se encuentra una gran coincidencia entre las detecciones de los dos interferómetros. Esto es llamativo, dado que una compatibilidad en ambos detectores bien podría tener origen astrofísico.

Motivado por eso, se procede a analizar la frecuencia de la onda en los intervalos cercanos a $-0,1$ y $-0,25$. Sin embargo al no poder superponer ambas coincidencias con una función sinusoidal, se presume que probablemente tengan origen no relacionado a un evento astrofísico.

3.6.3. Desde -0,90s hasta -0,20s

Al encontrar tanta similitud en las señales preprocesadas de ambos detectores, es que se decide inspeccionar la serie temporal en un rango anterior al del tiempo del evento. En este apartado del trabajo dicho rango es de $[-0,90; -0,20]$ s y se ilustra la onda para las mismas frecuencias de corte que en la subsección anterior.

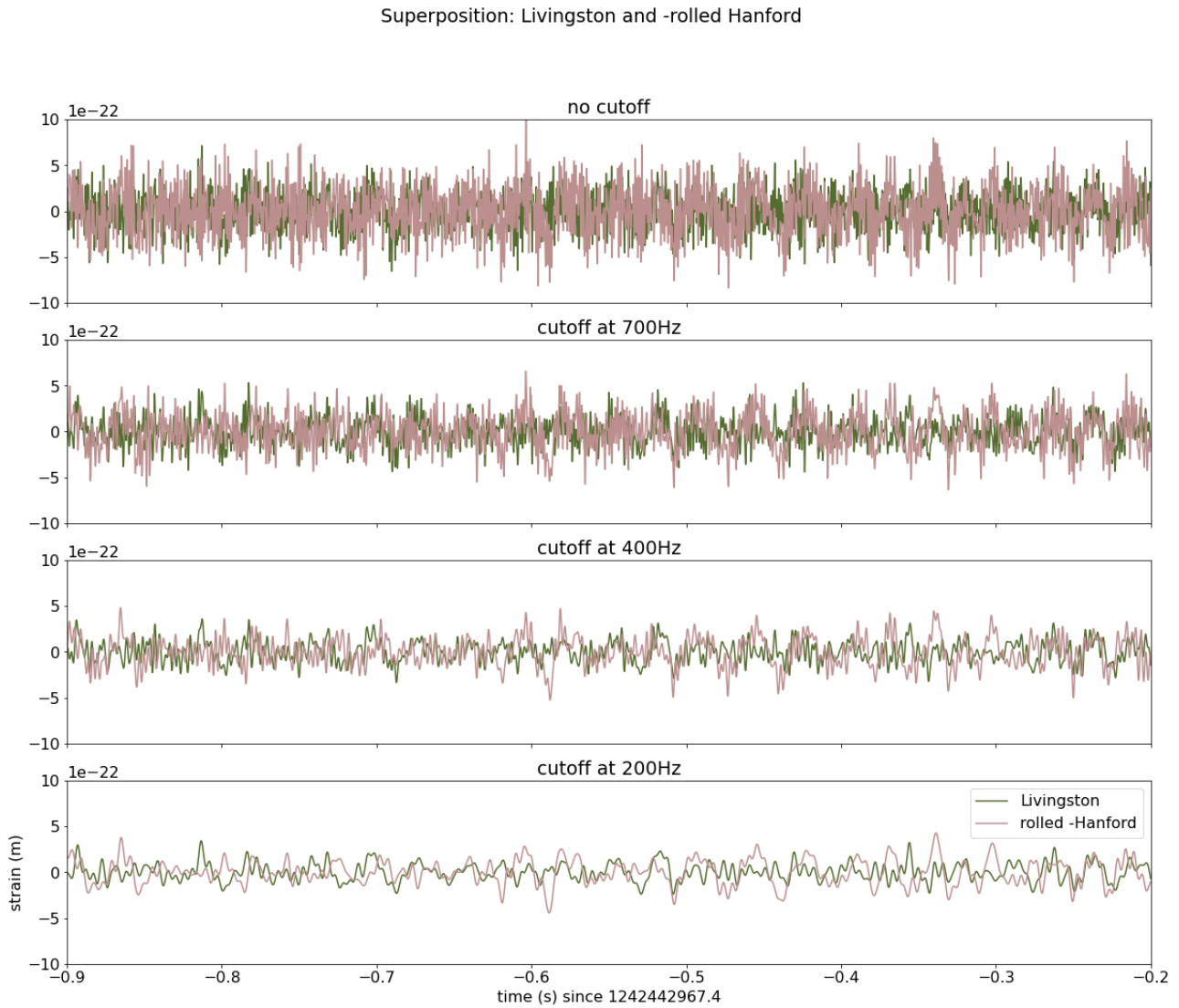


Figura 3.13: Hanford y Livingston strain filtrados en el rango temporal $[-0,9;-0,2]$ s con distintas frecuencias de corte para el filtro pasabaja.

En las figuras 3.13 y 3.14 con aporte en altas frecuencias, puede verse que entre $-0,50$ s y

Superposition: Livingston and -rolled Hanford

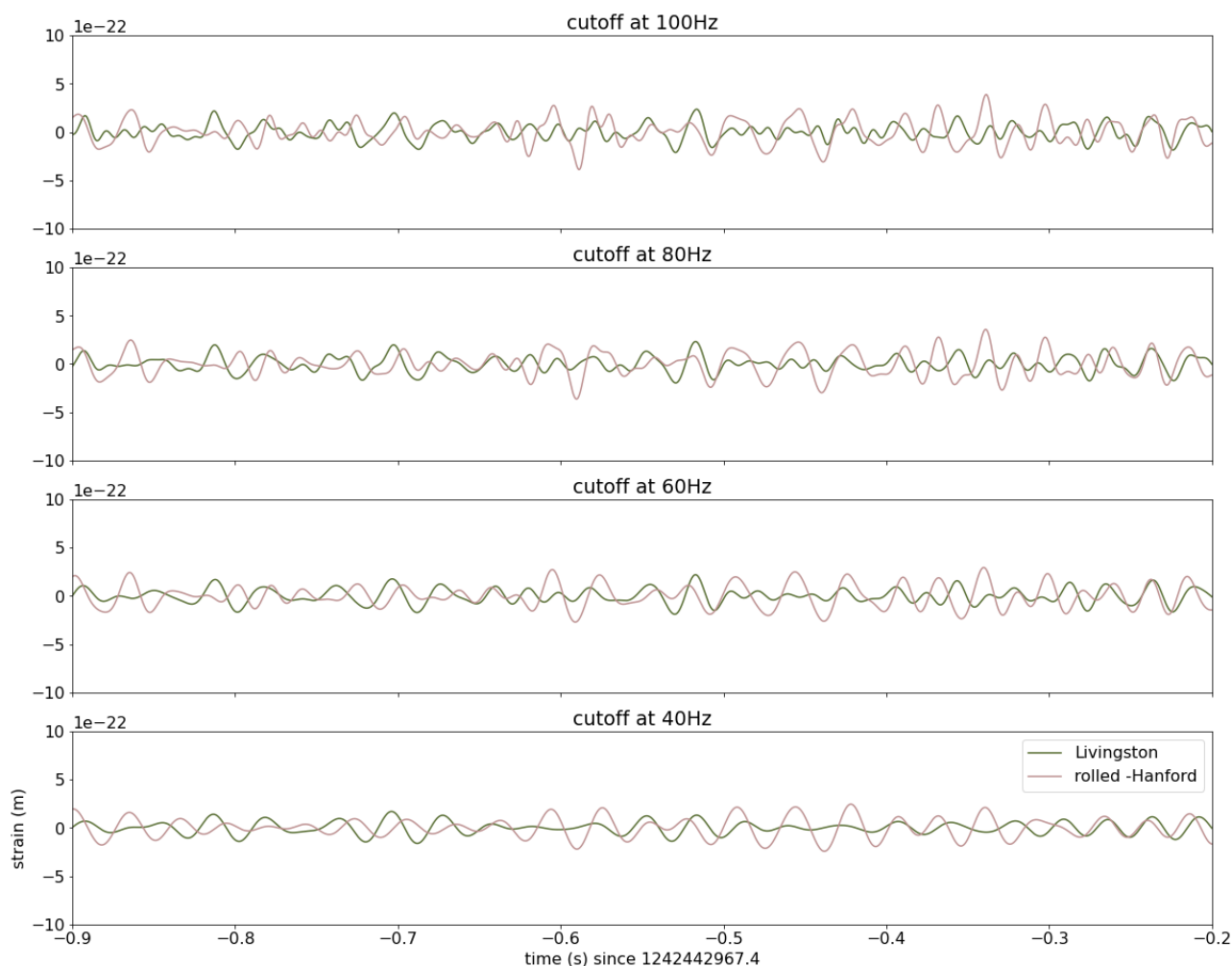


Figura 3.14: Hanford y Livingston strain filtrados en el rango temporal $[-0,9;-0,2]$ s con distintas frecuencias de corte para el filtro pasabaja.

$-0,55$ s hay cierta similitud entre las señales. Sin embargo al reducir la frecuencia de corte, por ejemplo a 400 Hz, queda claro que las frecuencias en cada señal son demasiado distintas como para tener origen astrofísico. Sin embargo se extiende un poco más la observación en instantes anteriores, y puede verse que también hay cierta superposición en las dos señales para tiempos cercanos a $-0,65$ s, aunque también de corta extensión.

Además de esa similitud, en este rango temporal no se encuentran grandes coincidencias

que indiquen una señal sino más bien ruido intrínseco de los sensores.

3.7. Discusión

Finalmente para completar el análisis del evento, se presenta en la figura 3.15 los espectrogramas de las señales *-rolled Hanford* (izquierda), *Livingston* (medio) y del promedio entre ambos (derecha).

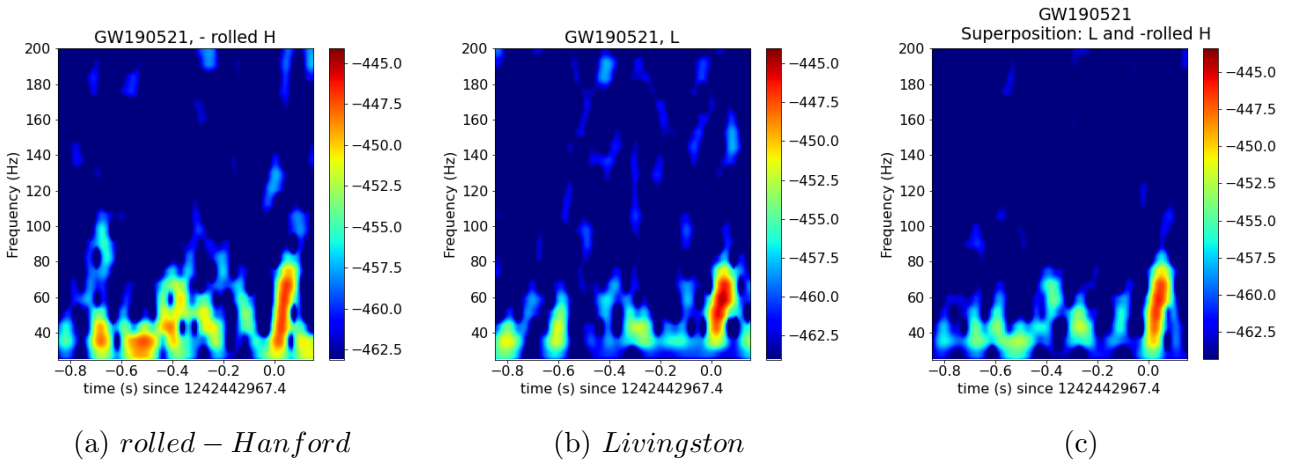


Figura 3.15: Espectrograma de señales filtradas para GW190521. Las señales corresponden a Livingston (a), rolled Hanford (b) y la media entre Livingston y rolled Hanford (c)

Estos espectrogramas, que comparten la escala en la barra de color, comprenden el intervalo temporal estudiado en las últimas subsecciones del capítulo. En el de Hanford puede apreciarse mayor presencia de ruido a pesar del filtrado en frecuencias bajas, comparado con el de Livingston. Mientras tanto, el espectrograma de la media muestra manchas en las zonas donde se encontraron las coincidencias entre las señales.

En la figura 3.16 se encuentran los resultados de LIGO [10] para el evento GW190521. Las técnicas que utilizan son el ya mencionado whitening, estimación CWB [6], inferencia Bayesiana [12] [17] y transformada Q. La transformada Q [13] (del inglés Q transform) es una modificación de la Transformada de Fourier de Tiempo Corto estándar (STFT), en la cual la duración de la ventana de análisis varía inversamente con la frecuencia.

Entonces el gráfico muestra el strain del evento GW190521 observado por Hanford (izquierda), Livingston (centro) y Virgo (derecha). El tiempo aquí es relativo al 21 de Mayo, 2019, a

las 03:02:29 UTC o 1242442967 GPS. Vale la pena remarcar que esto es 0,4s antes del t_{event} , por lo que los valores temporales no coincidirán con los del eje utilizado en los gráficos de este trabajo, sino que estarán desfasados 4 décimas de segundo.

La fila superior enseña el dato en el dominio temporal luego del whitening en color *celeste claro*; estimación CWB con una línea color *negro*; intervalos de confianza 90% obtenida mediante inferencia Bayesiana con una banda *naranja*. Para esta primera fila el eje de ordenadas está en unidades de desviación estándar del ruido. Si bien en la gráfica el strain comparte ejes con la estimación CWB e inferencia Bayesiana, hay una diferencia fundamental. El strain es una medición que fue tratada, mientras que las otras dos ondas superpuestas son plantillas u ondas reconstruidas teóricamente luego de estimar el valor de las masas del sistema y la distancia a la que este se encuentra.

La fila inferior muestra la representación de las frecuencias a lo largo del tiempo para la data post-whitening usando la Q-transform, muy similar al espectrograma utilizado en el trabajo.

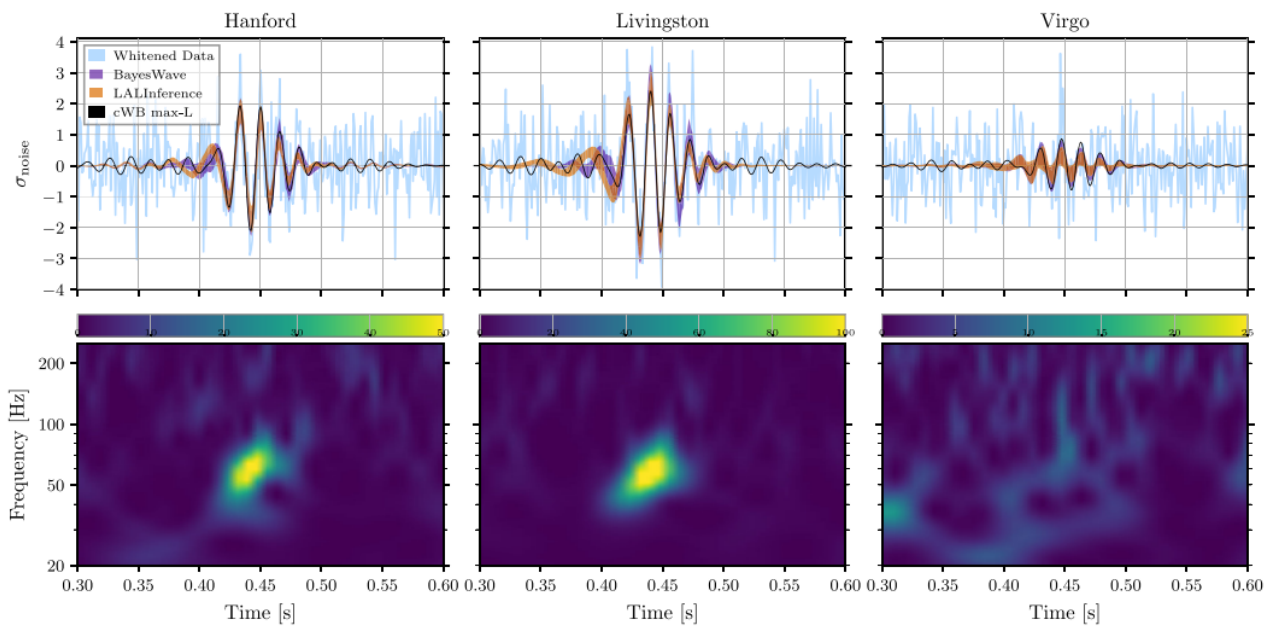


Figura 3.16: Evento GW190521: señales filtradas y plantillas teóricas (fila superior), transformada Q (fila inferior). Las columnas corresponden a los detectores de Hanford (izquierda), Livingston (centro) y Virgo (derecha). [Imagen: LIGO [10]].

La señal luego del whitening es similar al strain obtenido después de aplicar los filtros para las detecciones de Livingston y Hanford. Los espectrogramas también guardan cierta similitud,

sin embargo, se debe destacar el intervalo de tiempo graficado. En la figura 3.16 el intervalo es de $[0,30; 0,60]$ s con origen en 1242442967 GPS, como se mencionó anteriormente. Por otro lado, si se escribe en la escala usada en este trabajo, con origen temporal en $t_{event} = 1242442967,4$ GPS, este intervalo se corresponde con $[-0,10; 0,20]$ s. Mientras tanto, en el trabajo presente se puede visualizar el rango $[-0,90; 0,50]$ s en las gráficas 3.7 y 3.15. Entonces se cree que por los métodos de filtrado se agredió la señal, impidiendo obtener información fuera del corto intervalo de tiempo presentado.

Ahora en el caso de Virgo, con la técnica de LIGO tampoco se consigue un espectro que represente una onda gravitacional. Esto posiblemente sea debido a la baja precisión del interferómetro.

Para completar el análisis se muestra la figura 3 del material suplementario del trabajo [3] de Gamba et al., en la figura 3.17 que enseña algunos diferentes tipos de detecciones que se podrían obtener dependiendo de las características del sistema. En esa publicación analizan la señal del evento GW190521 bajo la hipótesis de que fue generada por la fusión de dos agujeros negros no rotantes y en órbitas hiperbólicas. Para ello utilizan el formalismo “Effective One-Body” (EOB) y algoritmos de Relatividad Numérica (NR). La aproximación EOB combina dos enfoques para describir la dinámica de los sistemas binarios: la teoría post-Newtoniana y la teoría de la perturbación de agujeros negros. Usando un código de NR realizan seis simulaciones de sistemas [4] de iguales masas, con agujeros negros no rotantes y gran excentricidad.

Para cada configuración de la figura 3.17 se comparan las ondas simuladas usando NR (negro) con las estimadas mediante EOB (rojo). Además debajo de cada onda se encuentra un gráfico que representa la diferencia de fases (azul) y amplitudes (anaranjado) entre ambas ondas.

En particular en este trabajo, con la aplicación de los filtros diseñados, se vio que además de la señal de gran amplitud encontrada cerca del t_{event} también se encontró una superposición décimas de segundos antes, lo que podría corresponderse con una onda como la de la figura de la esquina superior derecha en 3.17.

No es el objetivo de este trabajo explicar los métodos utilizados en las publicaciones mencionadas. Sin embargo es sorprendente la similitud de la onda filtrada con las de la última figura y creemos que es importante tener esto en cuenta para futuras investigaciones.

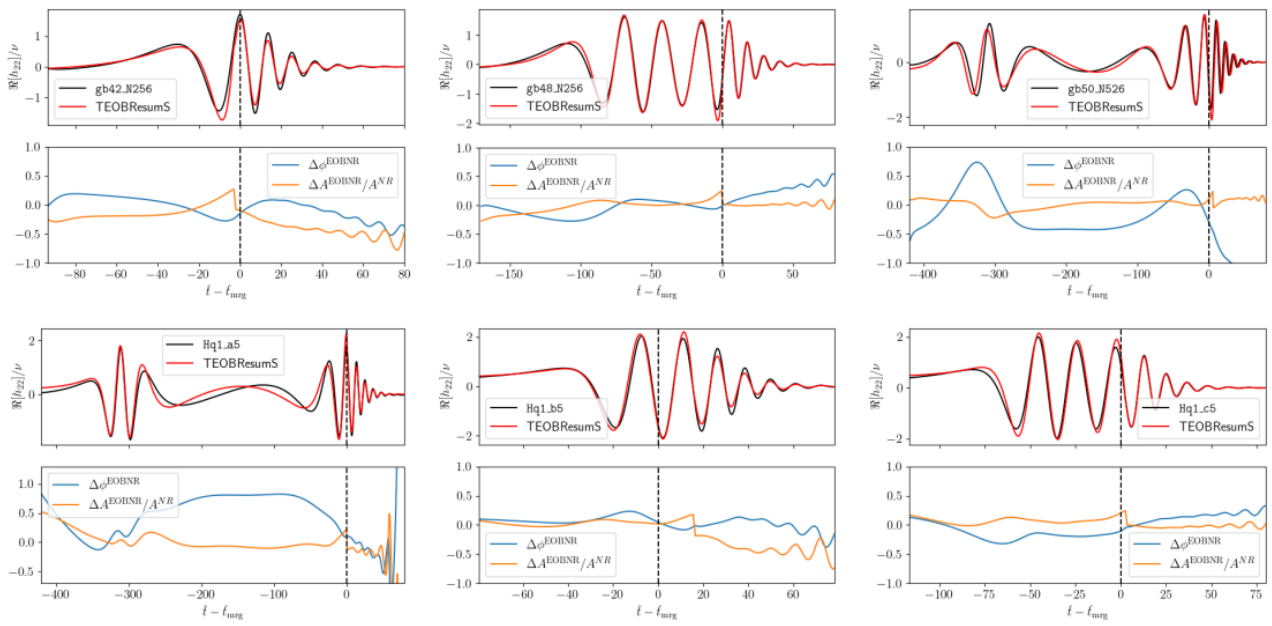


Figura 3.17: Ondas computadas utilizando NR (negro), estimación EOB (rojo), sus diferencias de fase (azul) y amplitud (anaranjado). Imagen: figura suplementaria 3 en la publicación [3] de Gamba et al.

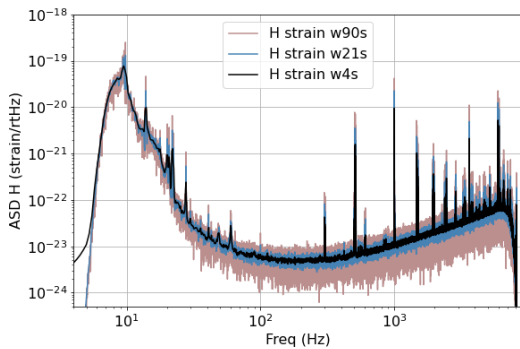
Capítulo 4

Estudio del evento GW190521_074359

4.1. Estudio preliminar

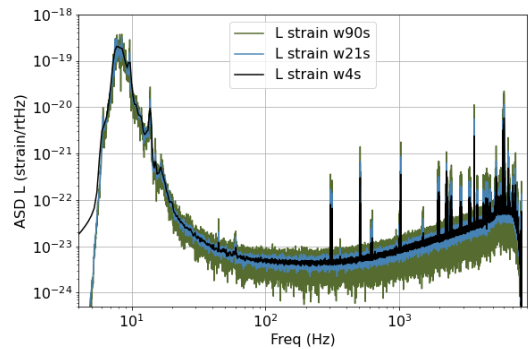
Para el evento GW190521_074359 pueden encontrarse, hasta el momento del trabajo, dos versiones en el catálogo del GWOSC. Además puede ser encontrado en publicaciones como S190521r. Con el fin de entender las diferencias entre ellas se procedió al igual que en el evento anterior, comparando los espectros de las versiones de cada detector. En este evento se cuenta con data registrada por los interferómetros de Livingston y Hanford, no así por Virgo.

H strain data near GW190521_074359, v1, l=288s, W=90, 21, 4s



(a) *Hanford*

L strain data near GW190521_074359, v1, l=288s, W=90, 21, 4s



(b) *Livingston*

Figura 4.1: ASD de detecciones en crudo para evento GW190521_074359

Se halló que la segunda versión tiene atenuados los picos de 60Hz y 120Hz, pero no se detectó otra discrepancia. Al igual que en el evento GW190521, en el catálogo puede observarse una modificación de los valores estimados para los parámetros de masas, distancia luminosa,

etc, dados por nuevos métodos de análisis. Se decide utilizar la versión 1, que es la menos intervenida, o más cruda.

Para este evento el t_{event} indicado en el catálogo es 1242459857,4GPS que se corresponde a las 07 : 43 del día 21 de Mayo de 2019 en tiempo UTC. Poco menos de 5 horas separan la detección de los dos eventos estudiados en el presente trabajo y este hecho es una de las razones que motivan el estudio de ambas señales, dado que podrían tener el mismo origen astrofísico o bien caracterizarse los ruidos intrínsecos de cada uno de los detectores.

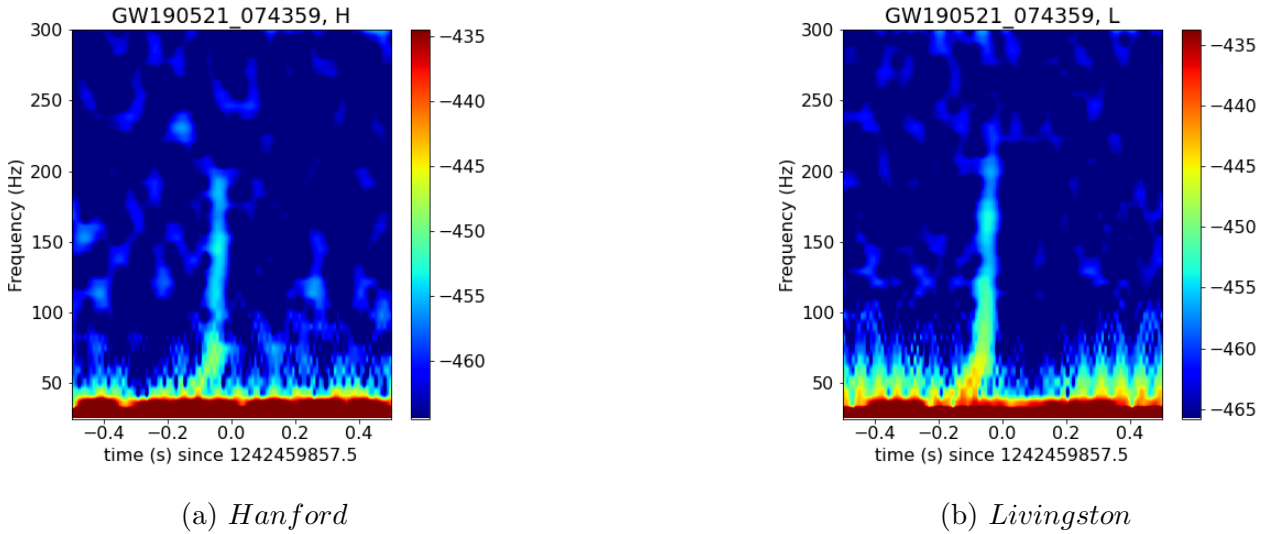


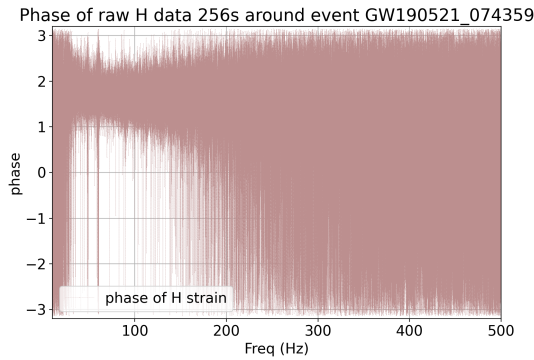
Figura 4.2: Espectrograma de señales crudas para GW190521_074359

En la figura 4.1 se observan los espectros de amplitud para Hanford (izquierda) y Livingston (derecha). Cualitativamente presentan una estructura muy similar a los ASD del evento anterior, con un gran aporte de ruido de color que se ve reflejado en las frecuencias más bajas y muchos picos de ruido en frecuencias mayores a 1000Hz.

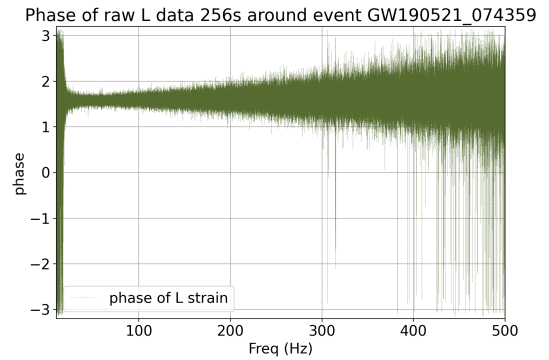
Para analizar las distribuciones e intensidades de frecuencias a lo largo del tiempo se recurre nuevamente a los espectrogramas, que para la serie temporal de 288s en crudo se encuentran en la figura 4.2. En contraste con el evento anterior, estos espectrogramas presentan menos ruido en comparación con la clara estructura en forma de J . Incluso se puede ver que se detectó intensamente un rango de frecuencias mucho más amplio que en el evento GW190521, llegando a superar los 200Hz.

También es importante graficar los diagramas de fase para frecuencias en el intervalo

[25, 500]Hz, presentados en la figura 4.3. Al igual que los espectros, estos son cualitativamente similares a los diagramas de la señal cruda para el evento GW190521. Asimismo, indican fuerte correlación y distribución no gaussiana del ruido.



(a) *Hanford*

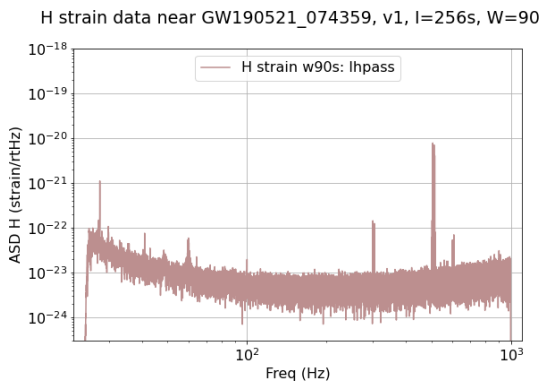


(b) *Livingston*

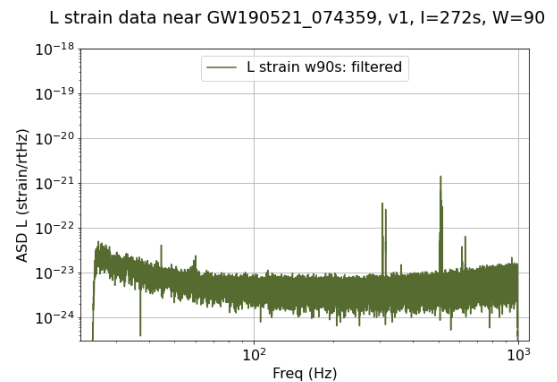
Figura 4.3: Diagrama de fases de señales crudas para GW190521_074359

4.2. ASD luego del primer filtro: pasabanda

En primer lugar, mediante un filtro pasa-banda, se eliminan las frecuencias menores a 25Hz provenientes del ruido de color y mayores a 995Hz. Luego se recortan los extremos de la serie temporal para grabar un vector de 272s cuya ASD se ve en la figura 4.4.



(a) *Hanford*



(b) *Livingston*

Figura 4.4: ASD de detecciones con filtro pasa banda para evento GW190521_074359

Al llevar este vector al dominio temporal, se obtienen las imágenes 4.5a y 4.5b. En ellas se compara la señal antes (arriba) y después (abajo) de la aplicación del filtro pasa-banda. Puede observarse que para ambos detectores la serie temporal reduce su amplitud dos órdenes de magnitud. Sin embargo, nuevamente, para Livingston en 4.5b ya es posible detectar la onda gravitacional justo antes del 0, mientras que en Hanford es indistinguible. Además vuelve a verse que sin aplicar ningún filtro es imposible determinar si hay o no señal astrofísica dado el orden de magnitud del ruido.

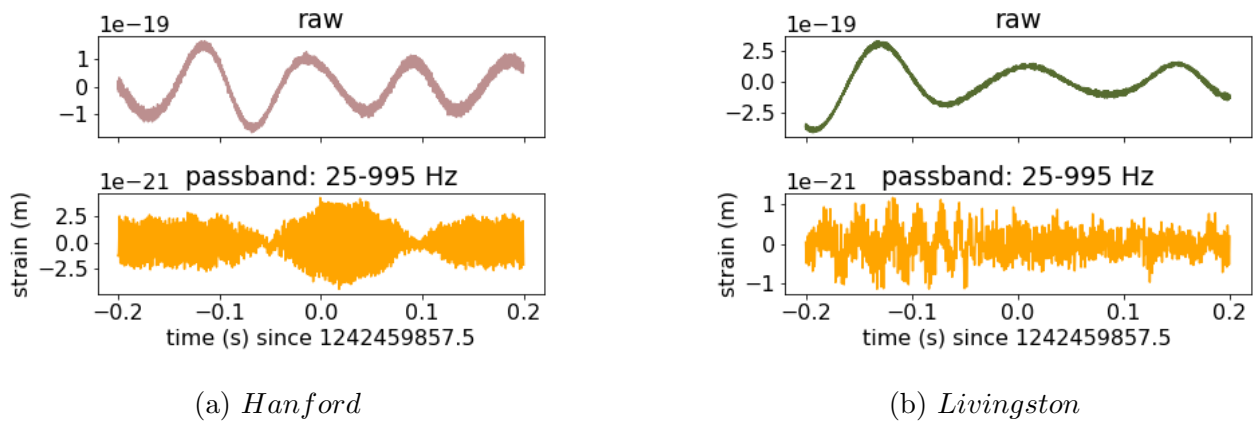
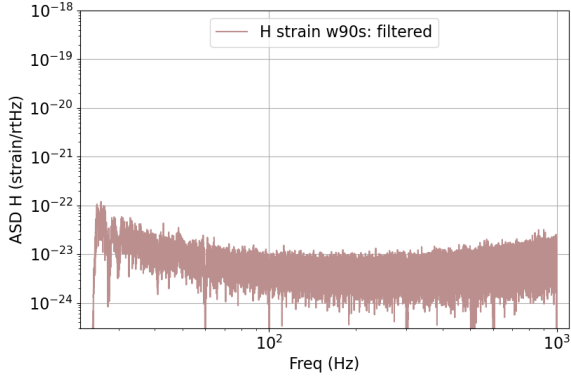


Figura 4.5: Detecciones con filtro pasa banda para evento GW190521_074359

4.3. ASD luego del filtrado

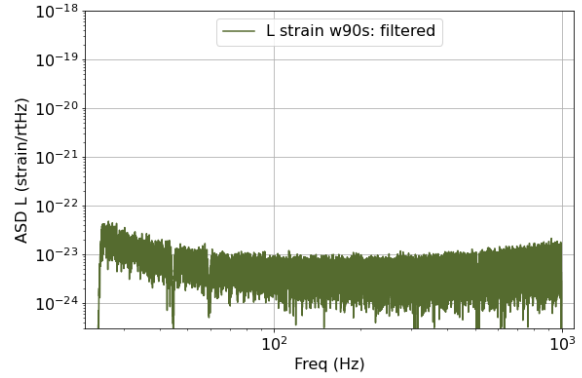
Al comenzar a filtrar los picos ruidosos particulares de cada detector, se diseñan 16 filtros notch para Livingston y 17 para la señal de Hanford. Luego de la aplicación de esos filtros rechaza-banda, se recortan los extremos del strain para tener una serie temporal de 256s la cual es grabada. Los espectros de las señales filtradas son los de la figura 4.6a y 4.6b correspondientes a Hanford y Livingston respectivamente. En estos gráficos de densidad espectral de amplitud es claro el efecto de los filtros aplicados habiendo atenuado todos los picos y dejando casi plano el espectro. Como era de esperar, la magnitud de las amplitudes en la “meseta” de estos ASD es de orden 10^{-23} .

H filtered strain data near GW190521_074359, l=256s, W=90



(a) *Hanford*

L filtered strain data near GW190521_074359, l=256s, W=90

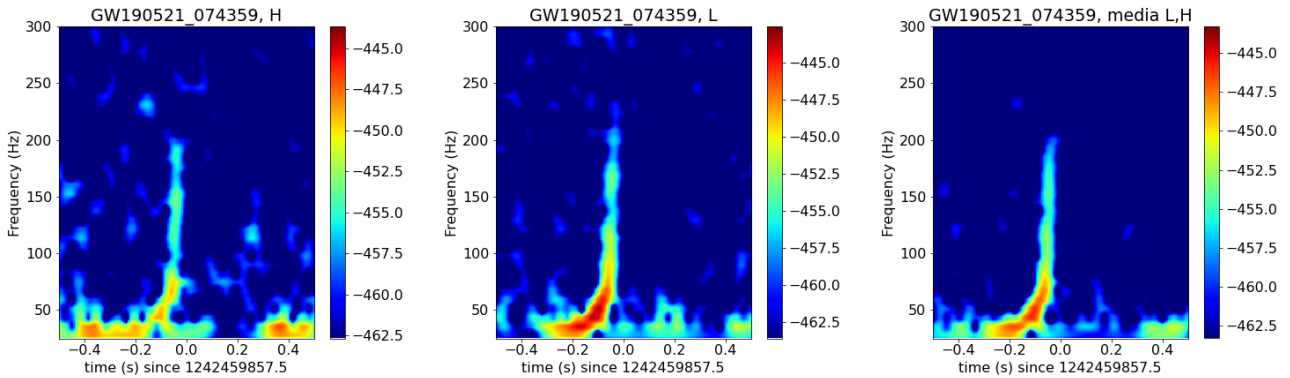


(b) *Livingston*

Figura 4.6: ASD de detecciones filtradas para evento GW190521_074359

4.4. Espectrogramas luego del filtrado

Cuando se realiza el espectrograma de la señal filtrada, se consiguen las figuras 4.7a, 4.7b y 4.7c para Hanford, Livingston y su promedio, respectivamente. En este caso, el espectrograma de Livingston destaca un aumento en las frecuencias entre 200Hz y 250Hz, por lo que se muestra un rango más amplio en el eje de las ordenadas respecto a los espectrogramas del evento GW190521. En el gráfico 4.7c es notable la ausencia de ruido en comparación con los otros dos.



(a) *Hanford*

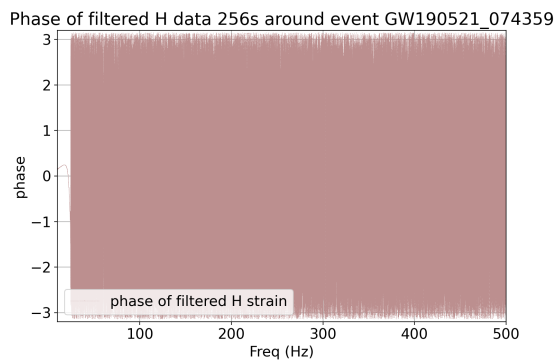
(b) *Livingston*

(c) *Media*

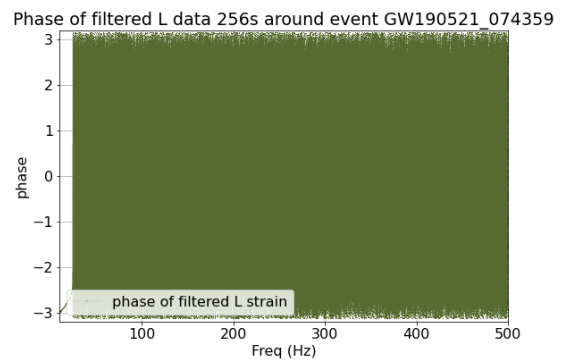
Figura 4.7: Espectrograma de señales filtradas para GW190521_074359.

4.5. Diagramas de fase luego del filtrado

A continuación, en la figura 4.8 se presentan los diagramas de fase de la señal de 256s, mostrando una distribución uniforme entre 25 y 500 Hertz. En la izquierda el correspondiente a Hanford y en la derecha el de Livingston. Los diagramas del strain filtrado no indican correlación en el ruido, ni tienen bandas blancas, lo que indica que en ese importante rango de frecuencias el filtrado fue lo suficientemente minucioso para disminuir el ruido sin afectar en gran medida la señal.



(a) *Hanford*



(b) *Livingston*

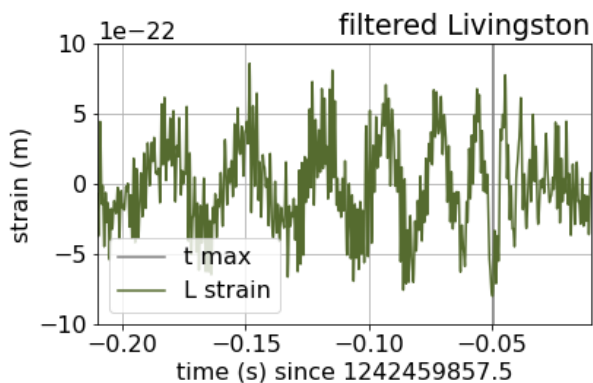
Figura 4.8: Diagrama de fases de señales filtradas para GW190521_074359.

4.6. Gráficos en el dominio temporal

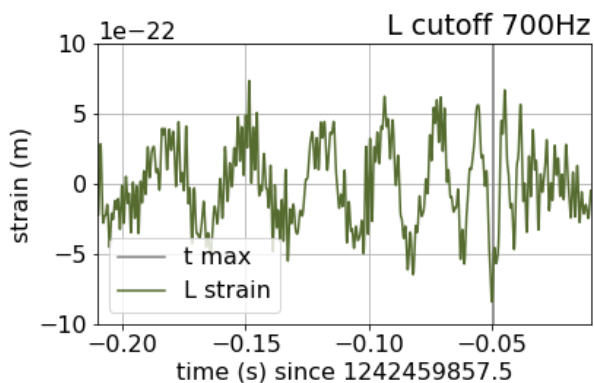
4.6.1. Estudio del desplazamiento temporal

Nuevamente por las razones señaladas en el capítulo anterior, para comparar mejor las detecciones de ambos interferómetros se busca estimar el t_{max} en la señal filtrada de Livingston utilizando el tiempo en que se alcanza la mayor amplitud. En la figura 4.9 se grafica en el intervalo temporal $[-0,21, -0,01]$ s la serie filtrada con distintas frecuencias de corte o cutoff: 995Hz, 700Hz, 400Hz, 200Hz y 150Hz en el filtro pasa-baja.

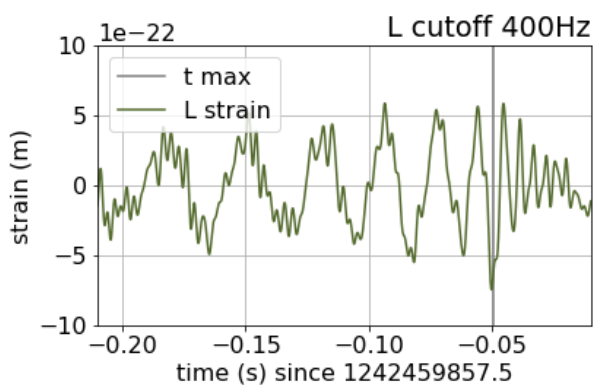
Se determina un $t_{max} = t_{event} - 0,0493s$ y a partir de esa referencia se decide desplazar al vector de $-1 * \text{Hanford}$ hacia la izquierda 5,8ms. De esta manera esa serie temporal también alcanza en t_{max} su máxima amplitud. En la figura 4.10 se ilustra la superposición de las dos señales ya completamente filtradas, pero además con frecuencia cutoff de 200Hz.



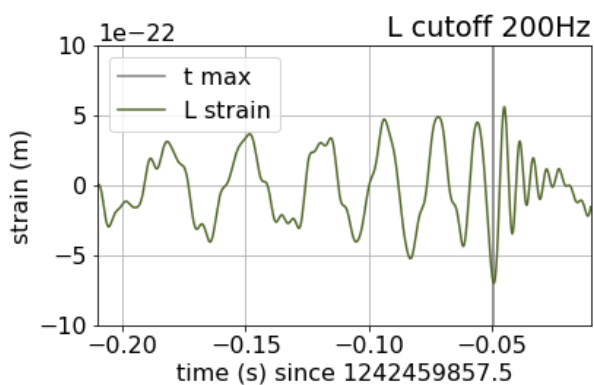
(a)



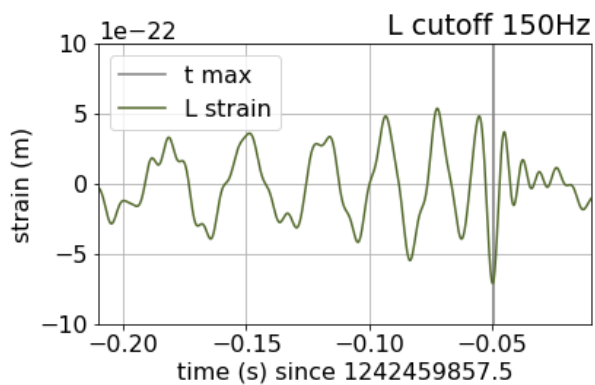
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.9: Señal de Livingston utilizada para determinar t_{max}

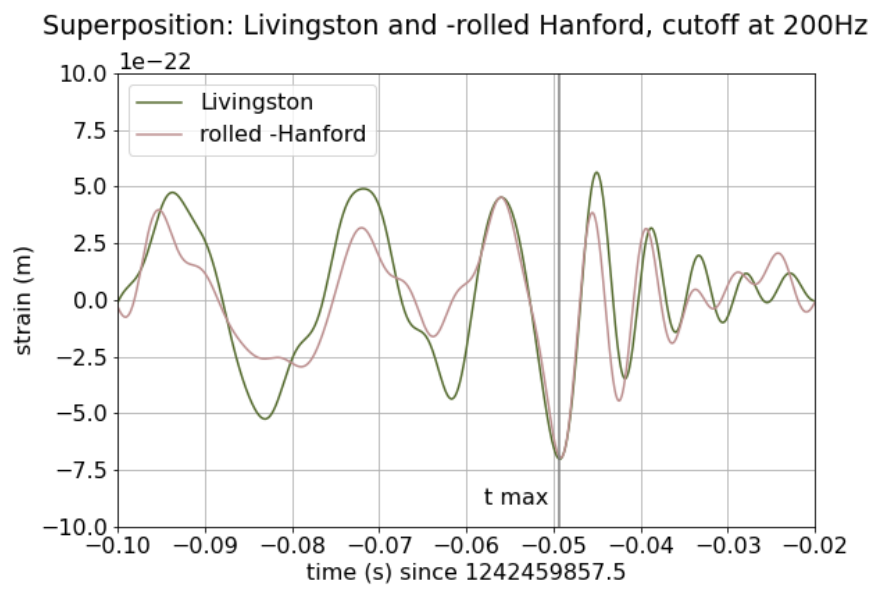


Figura 4.10: Shift de -5.8ms para la señal de Hanford, con frecuencias menores a 200Hz

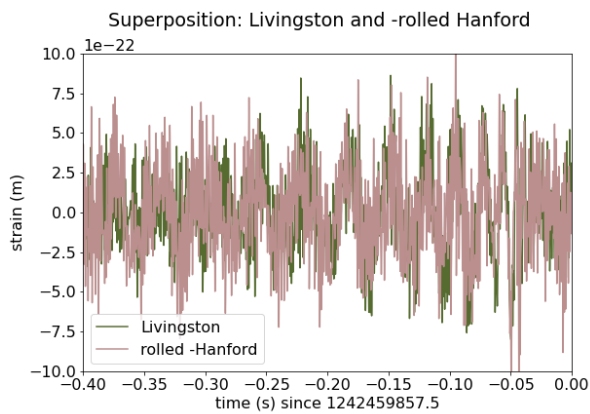
4.6.2. Desde -0.40s hasta 0.00s

Aquí se representa el vector de 256 segundos en el dominio temporal, para el intervalo $[-0,40; 0,00]$ s con distintas frecuencia de corte. En las gráficas 4.11 el cutoff es de 995Hz, 700Hz, 400Hz y 200Hz para 4.11a, 4.11b, 4.11c y 4.11d respectivamente. Mientras que en la figura 4.12 se visualiza la señal con frecuencia de corte de 100Hz, 80Hz, 60Hz y 40Hz, en 4.12a, 4.12b, 4.12c y 4.12d.

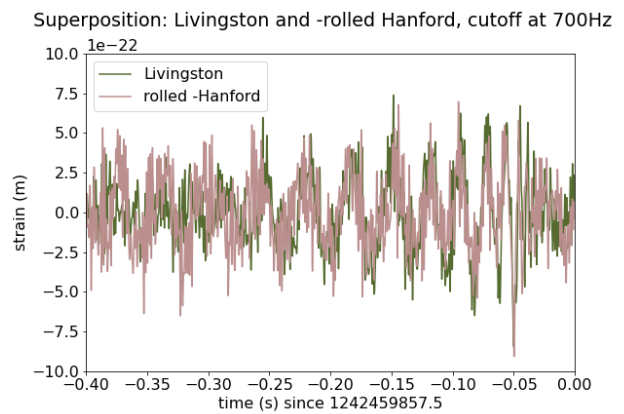
La señal de este evento muestra una muy clara onda gravitacional. Se ve por ejemplo en la figura 4.11d la forma de “trompeta” tan esperada. Desde casi $-0,3$ s se comienza a ver que las señales de Livingston y -rolled Hanford están en fase; y se entiende que se evidencia hasta cerca del $-0,05$ s la etapa del inspiral. En $t_{max} = -0,0493$ s, donde se alcanza la máxima amplitud, es que se determina el merger. Finalmente se aprecia el ringdown, con una duración de pocas centésimas de segundo después del t_{max} .

Además el inspiral es la porción de onda con menores frecuencias y el ringdown tiene las mayores, entonces a medida que se reduce la frecuencia de corte se pierde la información de esta última etapa. Por ejemplo en los gráficos de cutoff de 100Hz o menores ya no se puede distinguir correctamente el ringdown.

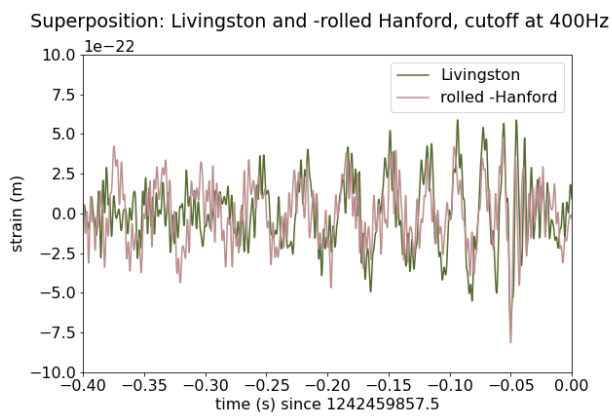
Se enfatiza entonces la importancia de mirar la señal en distintos rangos de frecuencia dado que si hay componentes de alta frecuencia, posiblemente se grafique mucho ruido, pero si se reduce demasiado la frecuencia de corte se pierde información valiosa e importante sobre la fuente.



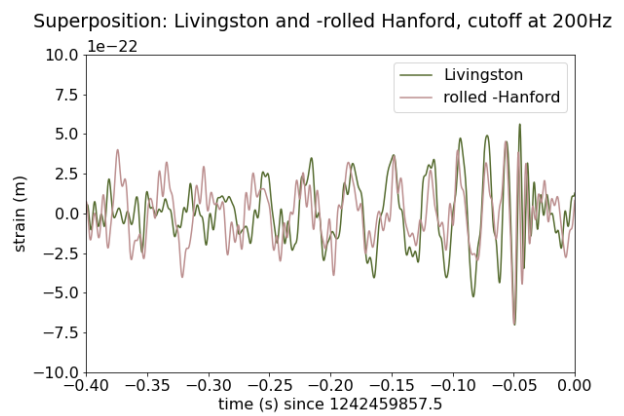
(a)



(b)

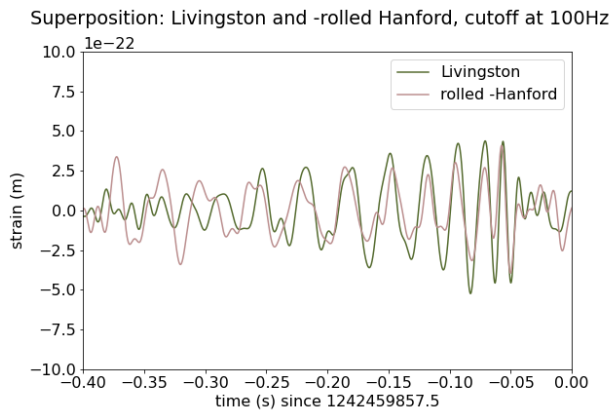


(c)

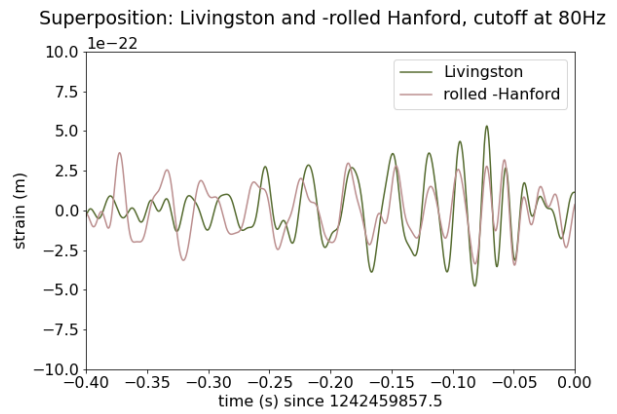


(d)

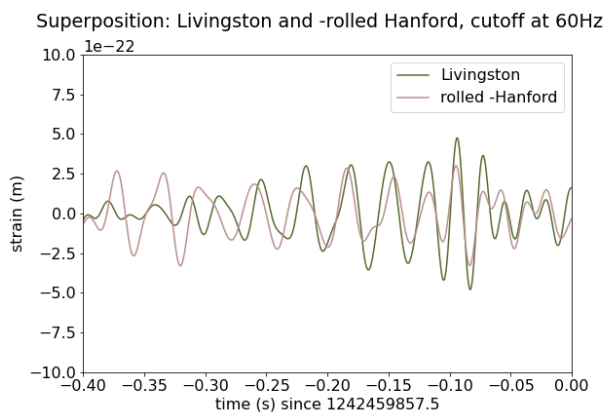
Figura 4.11: Hanford y Livingston strain filtrados en el rango temporal $[-0.40s, 0.10s]$ con distintas frecuencias de corte para el filtro pasabaja.



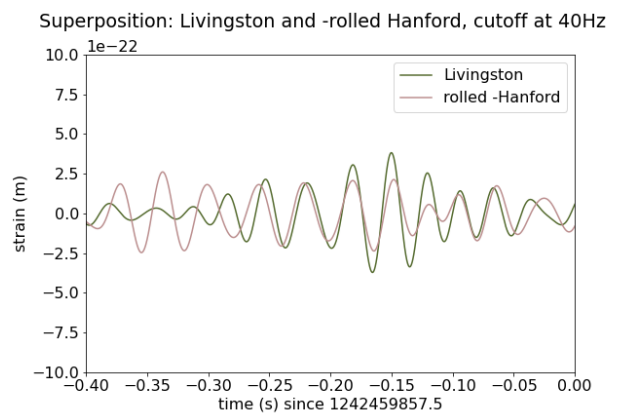
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.12: Hanford y Livingston strain filtrados en el rango temporal $[-0.40s, 0.10s]$ con distintas frecuencias de corte para el filtro pasabaja.

4.6.3. Desde -1.30s hasta -0.30s

En esta subsección se representan en el dominio temporal las señales filtradas de Livingston y -rolled Hanford para el intervalo $[-1,30; -0,30]$ s. Este segmento temporal de un segundo se encuentra en las figuras 4.13 y 4.14, por ejemplo en la que se presenta con frecuencia de corte de 200Hz, se ve entre $-0,45$ s y $-0,40$ s un ciclo en que ambos vectores de strain se superponen pero dado que más allá de eso no hay coincidencia se entiende que no tienen la misma frecuencia.

También puede verse que para tiempos mayores a $-0,75$ s no hay una superposición de las señales que valga la pena destacar. Sin embargo en las figuras con cutoff menor a 700Hz es fácil observar en los tiempos entre $-1,20$ s y $-0,75$ s una fuerte coincidencia durante varios periodos.

En estos ciclos la superposición presenta un pequeño desfasaje, por lo que vale la pena recordar que el desplazamiento horizontal de la señal de -Hanford fue de $-5,8$ ms. Pero esto motiva o anima a querer comparar con cuidado las frecuencias en ese intervalo y por eso se procede en la siguiente sección a cambiar el desplazamiento de Hanford levemente de forma que se pueda visualizar o no una frecuencia común a las dos señales.

Superposition: Livingston and -rolled Hanford

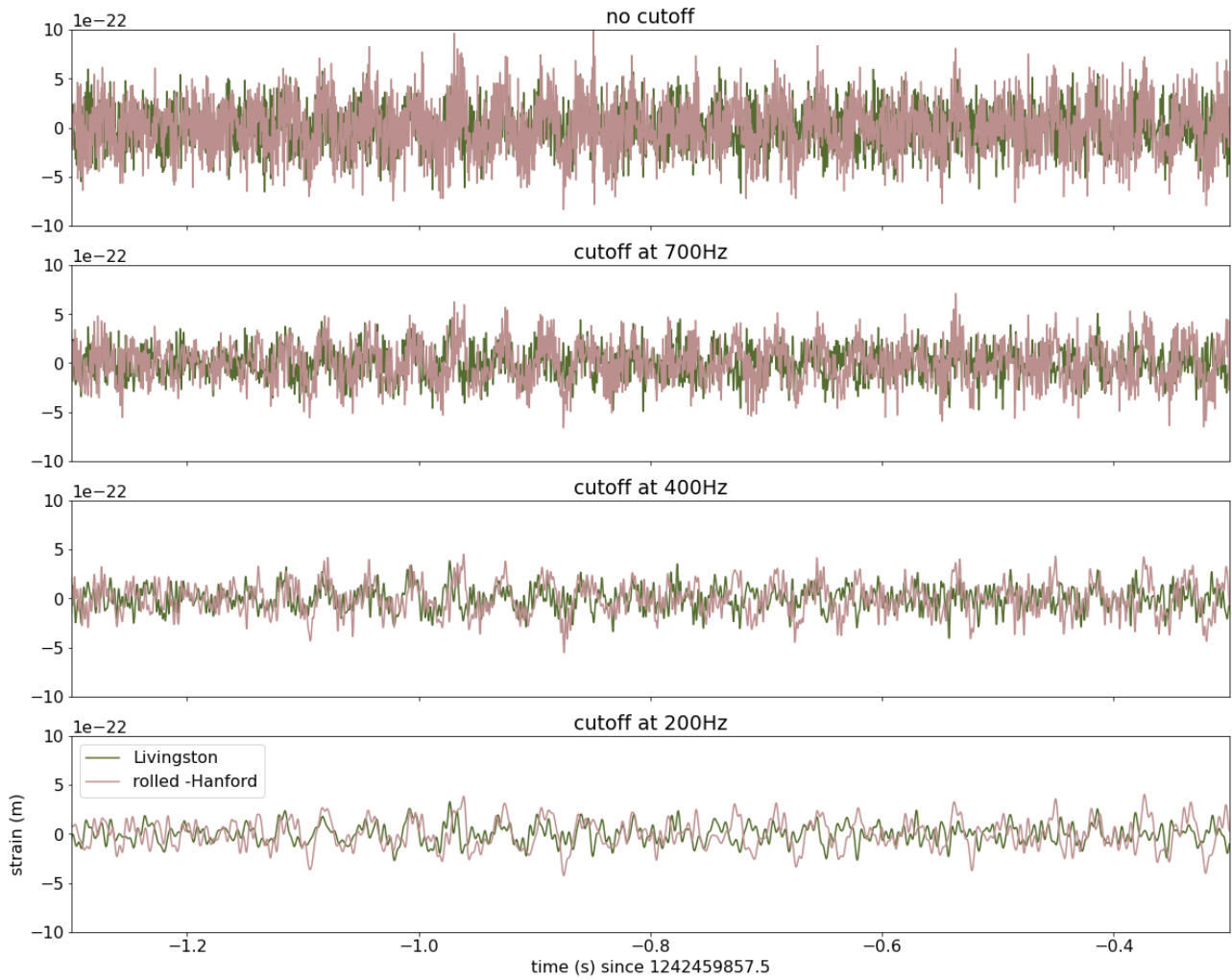


Figura 4.13: Hanford y Livingston strain filtrados en el rango temporal [-1,3s;-0,3s] con distintas frecuencias de corte para el filtro pasabaja.

Superposition: Livingston and -rolled Hanford

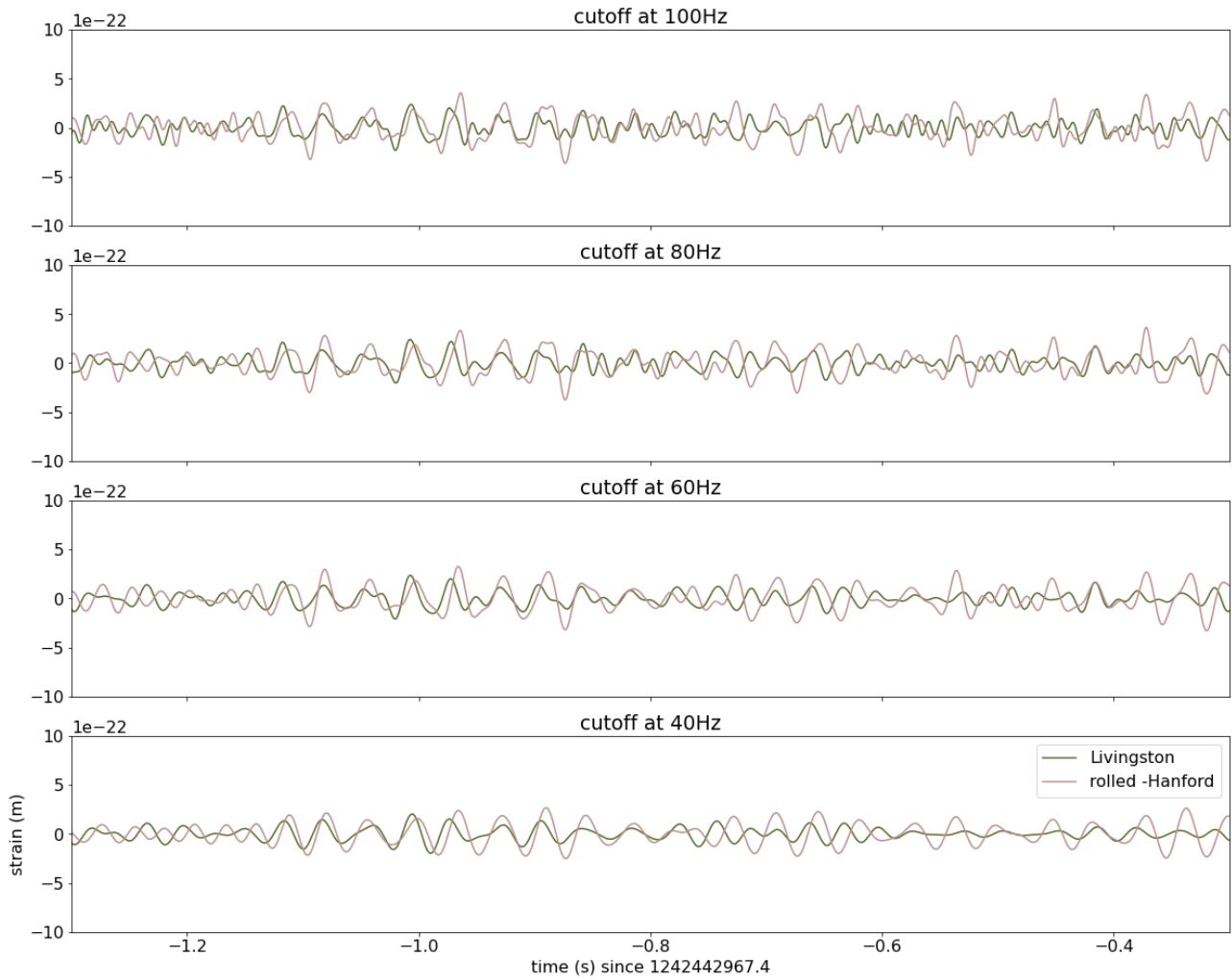


Figura 4.14: Hanford y Livingston strain filtrados en el rango temporal [-1,3s;-0,3s] con distintas frecuencias de corte para el filtro pasabaja.

4.7. Discusión

A continuación en la figura 4.15 se grafica la señal de Livingston (verde) y la de -rolled Hanford (rosado) en el intervalo temporal $[-1,20; -0,80]$ s. En este caso el desplazamiento de Hanford es de 10ms hacia la izquierda, con el objetivo de observar si coinciden los ciclos. La frecuencia de corte utilizada para el filtro pasa-baja es aquí de 40Hz, lo que evidencia que la señal presenta un rango bastante acotado de bajas frecuencias. Además es (o debiera ser al menos un poco) sorprendente que la superposición se mantenga durante cerca de 8 ciclos. Tal coincidencia en la frecuencia de la señal motiva a buscar su causa, que podría en principio ser astrofísica, dada la separación entre los interferómetros y sus respectivas características.

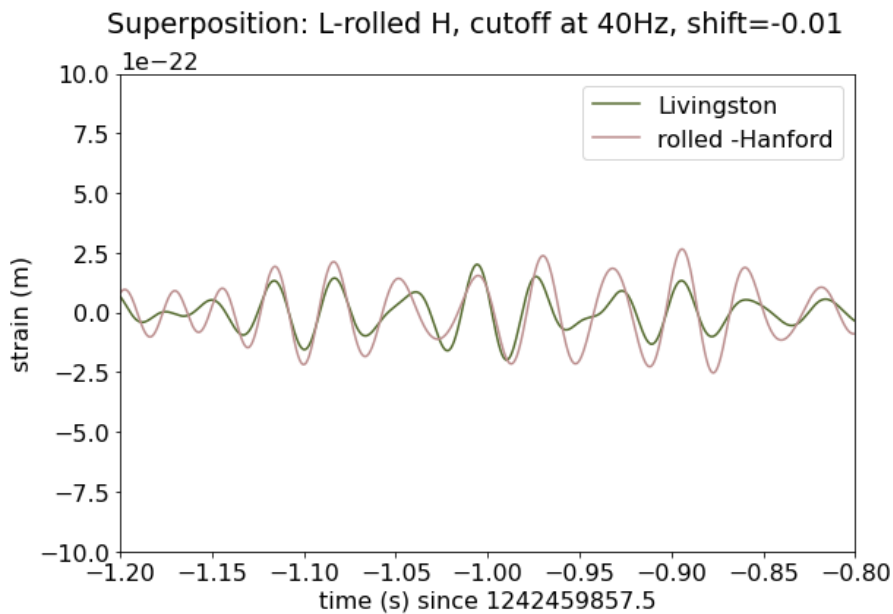


Figura 4.15: Superposición de señales filtradas: Livingston y -rolled Hanford con desplazamiento de -10 ms

Luego en la figura 4.16 se encuentran los espectrogramas para Hanford (izquierda), Livingston (centro) y su promedio (derecha). El rango de tiempo utilizado es $[-1,30; -0,30]$ s.

Se observa que la señal de Hanford conserva luego del filtrado intensas componentes de baja frecuencia en el intervalo graficado. Y si bien el espectrograma de Livingston es un poco más limpio, se ve que entre $-1,2$ s y $-0,8$ s tiene componentes de baja frecuencia también. Por eso resulta natural o esperable que también se vea este comportamiento en el espectrograma del promedio, coincidiendo con lo que se ve en la figura 4.15. Por otro lado, para frecuencias

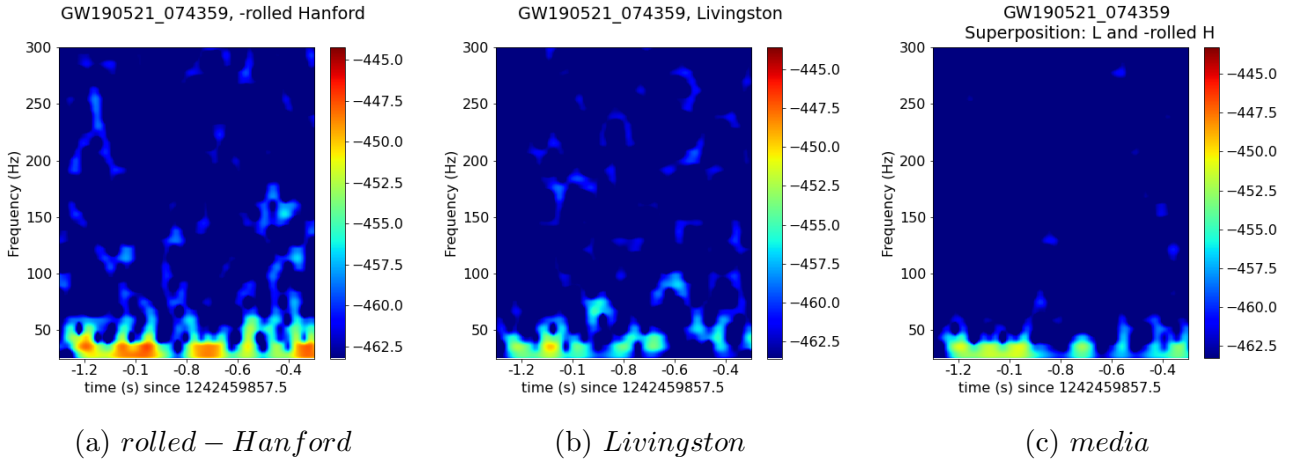


Figura 4.16: Espectrograma de señales filtradas para GW190521_074359 en el intervalo $[-1,30; -0,30]$ s . Las señales corresponden a Livingston (a), rolled Hanford (b) y la media (c)

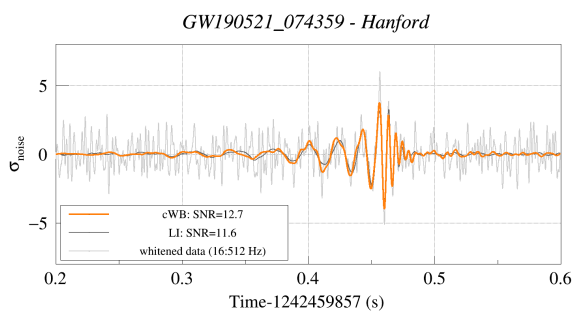
mayores a 40Hz, el ruido es prácticamente nulo.

Al momento de comparar con los resultados del análisis llevado a cabo por LIGO, no se lograron encontrar publicaciones por parte de la Colaboración. Sin embargo en el catálogo del GWOSC hay información y en particular se pueden hallar para el evento GW190521_074359 las figuras de 4.17.

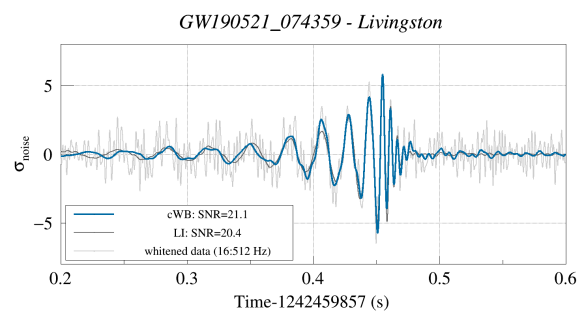
Las señales tratadas con whitening se muestran en color gris claro en 4.17a y 4.17b para Hanford y Livingston respectivamente. Superpuestas se encuentran las estimaciones teóricas realizadas con el método CWB, en naranja para Hanford y azul para Livingston. Estas series temporales tienen estructura similar a la encontrada en este trabajo y tienen la típica forma de onda gravitacional producto de la coalescencia de dos objetos compactos. Nótese que la escala temporal en los gráficos de LIGO tiene origen en 1242459857,0 GPS, equivalente al instante 07:43 del día 21 de Mayo de 2019 UTC. Mientras tanto en las gráficas producidas para este trabajo el origen temporal es $t_{event} = 1242459857,5$ GPS, por lo que al comparar las imágenes debe tenerse la adecuada precaución.

LIGO también ofrece en el portal de eventos las figuras 4.17c y 4.17d donde se aprecia la transformada Q de la señal post-whitening y filtrado. Además el eje de las ordenadas está en escala logarítmica.

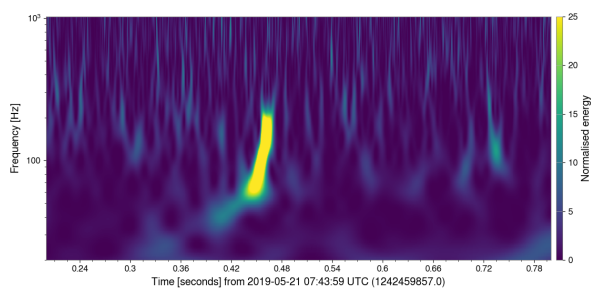
Más allá de esas diferencias, las transformadas Q de LIGO guardan similitudes cualitativas con los espectrogramas 4.7a y 4.7b. En ambos casos los espectros de Livingston son más



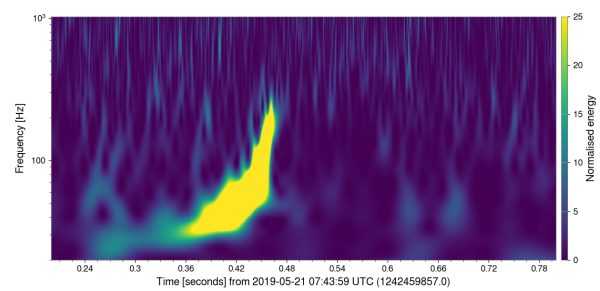
(a) *Hanford*



(b) *Livingston*



(c) *Hanford*



(d) *Livingston*

Figura 4.17: Señales filtradas de Hanford (izquierda) y Livingston (derecha). En la fila superior la serie temporal en función del tiempo y sus respectivas estimaciones teóricas; en la fila inferior las transformadas Q. [Imagen: LIGO]

voluminosos que los de Hanford. También comparten el hecho de que el rango de frecuencias alcanzado es bastante más amplio, superando los 200Hz

Capítulo 5

Comentarios finales

Finalizando el trabajo, se presenta una breve recapitulación.

Hemos estudiado dos eventos, GW190521 y GW190521_074359, registrados por el sistema de observatorios interferométricos de ondas gravitacionales LIGO-Virgo. Estos eventos han ocurrido en el mismo día, separados por apenas pocas horas.

Tanto en el evento GW190521 como en GW190521_074359 se trabajó con la primera versión publicada de los datos debido a que se observó que eran las que fueron menos intervenidas.

Las señales muestran, antes de nuestro tratamiento, una distribución de las fases con fuerte correlación. Esa correlación se asocia a ruidos intrínsecos de los aparatos de medición, que se remueven luego del filtrado indicando que la distribución final del ruido es gaussiana. Esto ayuda a entender la naturaleza del problema y el fruto de los esfuerzos de aplicar los filtros.

Las amplitudes de densidad espectral antes del filtrado tienen gran aporte de ruido, mientras que luego del pre-procesado el espectro es prácticamente plano.

Para el evento GW190521 se distinguen los espectrogramas de la figura 3.2 de los de 3.7, ya que después del filtrado las señales aparecen bien marcadas y con menor presencia de ruido ubicado en las bajas frecuencias. Por otro lado los espectrogramas del evento GW190521_074359 muestran, además de una señal notablemente más limpia en 4.7 que en 4.2, un rango de frecuencias bastante más extendido que el del evento que lo antecede.

Luego con los datos obtenidos se hizo un estudio para determinar el shift característico relacionado a la diferencia de tiempo en que la señal de cada detector alcanza la amplitud más grande. Así se desplaza horizontalmente una de las series temporales (en este caso la de Hanford) y se comparan mejor las frecuencias.

Por otro lado si se comparan los gráficos extraídos de las publicaciones de la colaboración LIGO-Virgo con los de este trabajo queda claro que los primeros sólo se concentran en la porción de mayor amplitud de la señal con un rango temporal bastante acotado. Mientras tanto en este estudio, luego del filtrado, hemos encontrado coincidencias entre las señales para cada uno de los eventos varias décimas de segundo antes de la zona central de la señal.

Al filtrar las series temporales de GW190521 se logra detectar una señal principal de aproximadamente 0,1 segundos de extensión alrededor del t_{event} . Además, se encontraron coincidencias entre las señales de los distintos detectores en las componentes de frecuencias bajas al rededor de $-0,10s$, $-0,25s$, $-0,55s$ y $-0,65s$.

La similitud en $-0,10s$ se da a lo largo de 3 ciclos mientras que la de $-0,25s$ tiene cerca de 4 periodos de superposición, por lo que se cree que puede ser de origen astrofísico. En cambio las coincidencias en $-0,55s$ y $-0,65s$ brindan pocos indicios de ser de origen astrofísico y aparentan ser ruido estocástico.

Vale la pena destacar que para avanzar en esta dirección se requiere un procesado de la señal filtrada para descartar, o no, esas porciones de señal identificando su procedencia.

Reforzando la idea de la importancia que tiene analizar rangos temporales más amplios se presentaron trabajos que explican que la causa de la forma de la señal obtenida puede ser el tipo de órbita que realizó el sistema sea del tipo hiperbólico. Resulta sumamente curioso que sean cualitativamente tan similares los gráficos 3.12 con los 3.17. Esto sugiere que para este tipo de sistema debe considerarse seriamente los posibles movimientos hiperbólicos.

Al estudiar el evento GW190521_074359 se encuentra una señal con un estadio inspiral bastante marcado, seguido del merge y ringdown. En total esto se registra durante cerca de 0,2 segundos. Luego, al analizar en tiempos anteriores se encontró que desde $-1,15s$ hasta $-0,80s$ hay una coincidencia de entre 6 y 7 ciclos entre las señales durante un tiempo bastante prolongado, y que nos sugiere que esta es una coincidencia de origen astrofísico. Cabe mencionar además que no se ha encontrado literatura estudiando este hecho y esperamos que este análisis motive en el futuro estudios más profundos.

A pesar de que los interferómetros tienen largos periodos de continua observación es un hecho poco usual encontrar señales cercanas en el tiempo. Entonces dado que los dos eventos están separados nada más que por 5 horas surge la pregunta natural acerca de si estos eventos están o no correlacionados.

LIGO presenta en el catálogo del GWOSC, además de los datos, estimaciones de una serie de parámetros, entre los que se encuentra la distancia de la fuente y masa de los objetos

involucrados para entender el origen de los sistemas binarios.

También cuenta con la Base de Datos de Eventos de Onda Gravitacional (GraceDB) de donde se extrae la figura 5.1. En ella se observa la ubicación en la esfera celeste que la colaboración LIGO-Virgo estima para cada evento.

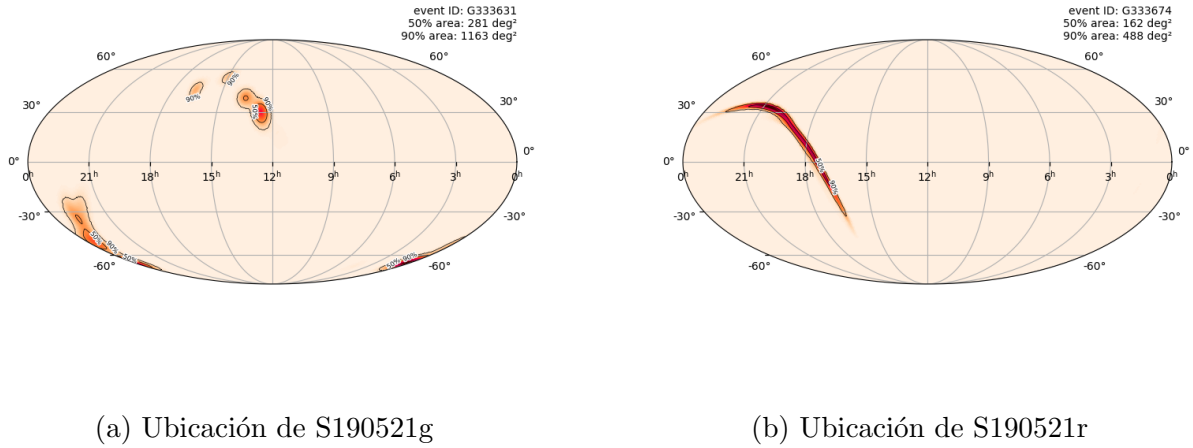


Figura 5.1: Ubicación en la esfera celeste para la fuente de la señal detectada en los eventos GW190521 (izquierda) y GW190521.074359 (derecha). [Imagen:GraceDB]

Para obtener las figuras se utiliza la función `ligo.skymap.bayestar.localize` que brinda un mapa 3D del cielo. Esta función escrita en python se basa en el método de localización rápida en el cielo mediante BAYESTAR [14].

De esta manera la figura 5.1 indica que las señales de ambos eventos no comparten el mismo origen astrofísico, sino que provienen de sistemas distintos.

En conclusión, luego de aplicar los filtros destinados a preservar la señal astrofísica en ambos eventos, se ha presentado información y discusión que sugiere que cada evento tiene otros rangos temporales de interés. En esos rangos la serie temporal filtrada merece un estudio detallado para su ulterior interpretación astrofísica. El estudio basado en modelos no forma parte del plan de este trabajo, pero esperamos que los resultados presentados aquí sean de mucha utilidad para estos estudios.

Bibliografía

- [1] A. Einstein. On the electrodynamics of moving bodies. *Annalen der Physik*, 17:891–921, 1905.
- [2] A. Einstein. The field equations of gravitation. *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*:844–847, 1915.
- [3] R. Gamba, M. Breschi, G. Carullo, P. Rettegno, S. Albanesi, S. Bernuzzi, and A. Nagar. GW190521 as a dynamical capture of two nonspinning black holes, 2022.
- [4] Roman Gold and Bernd Brügmann. Eccentric black hole mergers and zoom-whirl behavior from elliptic inspirals to hyperbolic encounters. *Physical Review D*, 88:064051, 2013.
- [5] R. A. Hulse. The discovery of the binary pulsar. *Reviews of Modern Physics*, 66(3):699–710, 1994.
- [6] S. Klimenko, G. Vedovato, M. Drago, F. Salemi, V. Tiwari, G. A. Prodi, C. Lazzaro, K. Ackley, S. Tiwari, C. F. Da Silva, and G. Mitselmakher. Method for detection and reconstruction of gravitational wave transients with networks of advanced detectors. *Phys. Rev. Lett.*, 93:042004, 2016.
- [7] B. P. Abbott et al. LIGO/Virgo Collaboration. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.*, 116:061102, 2016.
- [8] B. P. Abbott et al. LIGO/Virgo Collaboration. GW170104: Observation of a 50-solar-mass binary black hole coalescence at redshift 0.2. *Phys. Rev. Lett.*, 118:221101, 2017.
- [9] B. P. Abbott et al. LIGO/Virgo Collaboration. Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys. Rev. Lett.*, 119:161101, 2017.

- [10] B. P. Abbott et al LIGO/Virgo Collaboration. GW190521: A binary black hole merger with a total mass of $150 m_{\odot}$. *Phys. Rev. Lett.*, 116:061102, 2020.
- [11] O. M. Moreschi. Convenient filtering techniques for LIGO strain of the GW150914 event. *Journal of Cosmology and astroparticle physics*, pages 1–18, 2019.
- [12] T. B. Littenberg N. J. Cornish. Bayeswave: Bayesian inference for gravitational wave bursts and instrument glitches. *Class. Quantum Grav.*, 32:135012, 2015.
- [13] G. Martin S. Chatterji, L. Blackburn and E. Katsavounidis. Multiresolution techniques for the detection of gravitational-wave bursts. *Class. Quantum Grav.*, 21:S1809–S1818, 2004.
- [14] L. P. Singer and L. R. Price. Rapid bayesian position reconstruction for gravitational-wave transients. *Physical Review D* **93**, 024013, 2016.
- [15] Fred J. Taylor. *DIGITAL FILTERS: Principles and Applications with MATLAB*. IEEE Series on Digital and Mobile Communication. Wiley-IEEE Press, 2011.
- [16] Les Theede. *Practical Analog and Digital Filter Design*. Artech House, 2004.
- [17] V. Varma, S. E. Field, M. A. Scheel, J. Blackman, D. Gerosa, L. C. Stein, L. E. Kidder, and H. P. Pfeiffer. Surrogate models for precessing binary black hole simulations with unequal masses. *Phys. Rev. Research*, 1:033015, 2019.