



Experimento de propagación en banda Q con Alphasat: Técnicas para la compensación del desapuntamiento

Autor: Guzmán Jesús Portugal Mata

Fdo.:

Tutor: José Manuel Riera Salís

Fdo.:

Tribunal:

Presidente: Riera Salís, José Manuel

Fdo.:

Vocal: Sierra Castañer, Manuel

Fdo.:

Secretario: Mendo Tomás, Luis

Fdo.:

Fecha de lectura:

Calificación:

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE
MADRID**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE
TELECOMUNICACIÓN**



ETSIT
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN
UPM



TRABAJO FIN DE GRADO

**EXPERIMENTO DE PROPAGACIÓN EN BANDA
Q CON ALPHASAT: TÉCNICAS PARA LA
COMPENSACIÓN DEL DESAPUNTAMIENTO**

GUZMÁN JESÚS PORTUGAL MATA, 2015

RESUMEN

El grupo de investigación GTIC-Radiocomunicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) participa en uno de los experimentos de propagación de APEX (*Alphasat Propagation Experiment*), denominado *Alphasat propagation experiment by measuring the copolar level of the Q-Band beacon at 39.4 GHz*. El experimento comenzó en abril de 2014, midiendo la señal de 39,4 GHz.

Durante los primeros meses hasta septiembre de 2014, se hicieron medidas con apuntamiento fijo. El satélite no es geoestacionario sino que tiene una cierta inclinación, por lo que su posición aparente no es fija, describiendo una pequeña elipse en el cielo. Como consecuencia de esto se produce una variación sistemática en el nivel de la señal recibida que hay que eliminar.

El presente Trabajo fin de Grado recoge técnicas útiles para llevar a cabo la compensación del desapuntamiento producido por el apuntamiento fijo configurado en el receptor diseñado por el grupo de investigación GTIC-Radiocomunicaciones de la UPM.

El conjunto de datos utilizado, ha sido preprocesado con anterioridad llevándose a cabo un proceso de marcado y sincronización de los datos obtenidos a través de la baliza a 39,4 GHz enviada desde el Alphasat.

A lo largo del documento se interpretarán y compararán los resultados obtenidos mediante gráficas elaboradas tras la aplicación de las técnicas que se describen en el desarrollo del mismo.

PALABRAS CLAVE

Desapuntamiento, Banda Q, Alphasat, experimento de propagación, copolar, 39.4 GHz, APEX, FFT.

ABSTRACT

The research group GTIC-Radiocommunications of Universidad Politécnica de Madrid (UPM) is involved in one of the propagation experiments of APEX (Alphasat Propagation Experiment), called “Alphasat propagation copolar experiment by measuring the level of the Q-Band beacon at 39.4 GHz”. The experiment began in April 2014, measuring the signal of 39.4 GHz.

During the first months until September 2014, measures with fixed pointing were made. The satellite is not geostationary but it has a certain inclination, so its apparent position is not fixed, describing a small ellipse in the sky. As a result, a systematic variation appears in the level of the received signal; this variation must be eliminated.

This project makes use of several useful techniques to carry out the misspointing's compensation made by the fixed pointing configured on the receiver designed by the research group GTIC-Radiocommunications of UPM.

The data gathered in the experiment have been previously pre-processed. In this process, the measurements of the Alphasat 39.4-GHz beacon have been synchronized and flagged.

Throughout the document we will interpret and compare the obtained results through the graphics where we can see the obtained results after the techniques application discussed on this document.

KEY WORDS

Misspointing, propagation, Q-Band, Alphasat, propagation experiment, copolar, 39.4 GHz, APEX, FFT.

ÍNDICE

1. Introducción y Objetivos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	4
2. Principios Teóricos	5
2.1. Efectos atmosféricos sobre la propagación	5
2.1.1. Atenuación por lluvia	5
2.1.2. Centelleo Troposférico	6
2.1.3. Atenuación por nubes y niebla	6
2.1.4. Atenuación por gases	7
2.1.5. Despolarización por hidrometeoros	7
2.2. Media móvil	8
2.3. Transformada de Fourier	8
2.3.1. Cálculo eficiente de la DFT: algoritmos FFT	9
2.3.1.1. Diezmado en el tiempo	10
2.3.1.2. Diezmado en frecuencia	11
2.3.1.3. Algoritmos con $N \neq 2^v$	12
3. Procesado de Datos: Técnicas de corrección del desapuntamiento	13
3.1. Presentación de los eventos	13
3.2. Media Móvil	16
3.2.1. Día 29.08.2014. Evento sin desvanecimientos	16
3.2.2. Día 12.04.2014. Evento lluvioso	20
3.2.3. Día 19.06.2014. Evento lluvioso con variaciones de nivel en las horas previas, posiblemente causadas por nubes	22
3.2.4. Día 07.05.2014. Huecos en la medida de la señal	23
3.3. FFT	26
3.3.1. Día 29.08.2014. Evento sin desvanecimientos	27
3.3.2. Día 12.04.2014. Evento lluvioso	29
3.3.3. Día 19.06.2014. Evento lluvioso con variaciones de nivel en las horas previas, posiblemente causadas por nubes	32
3.3.4. Día 07.05.2014. Huecos en la medida de la señal	34
4. Conclusiones	37
5. Bibliografía	38

1. Introducción y Objetivos

1.1. Introducción

Durante estos últimos años, cientos de satélites han sido enviados al espacio para ampliar los conocimientos que tenemos sobre la Tierra y el espacio exterior. Todo comenzó con el lanzamiento del Sputnik I por parte de la URSS (Unión Soviética) el 3 de Octubre de 1957, este ayudó a obtener información sobre la densidad de la atmósfera superior y la propagación de las ondas de radio en la ionosfera. Este acontecimiento supuso el origen de la guerra espacial (1957-1975), en la que Rusia y EE.UU. (Estados Unidos) competirían por la supremacía espacial.

En ese mismo año, el 3 de Noviembre, fue enviado un segundo satélite, Sputnik II, por parte de la URSS. Un año más tarde, como contestación a estos dos lanzamientos por parte de la URSS, EE.UU. puso en órbita al Explorer I. Gracias a este lanzamiento se llevó a cabo el descubrimiento del cinturón de radiación de Van Allen.

Los satélites han ido evolucionando desde ese entonces, actualmente existen satélites utilizados para diferentes tipos de misiones: satélites astronómicos, de reconocimiento, de comunicaciones... proporcionando nueva información acerca de la Tierra y el espacio y posibilitando la aparición de nuevas aplicaciones: TV por satélite, comunicaciones móviles, análisis climatológicos...

Debido a la congestión del espectro radioeléctrico, es necesario estudiar las posibilidades de que otras frecuencias puedan ser usadas para propósitos de telecomunicaciones, que además de aportar un mayor ancho de banda harán posible la tarea de la realización de terminales de usuario más pequeños.

El 25 de julio de 2013, se lanza Alphasat [5] (Inmarsat 4A F4, el mayor satélite de telecomunicaciones de Europa) el primer satélite basado en Alphabus [8], la nueva plataforma Europea para satélites de telecomunicaciones de alta capacidad desarrollada por Astrium y Thales Alenia Space, junto con la Agencia Espacial Europea (ESA) y la francesa (CNES), diseñado y construido por *Airbus Defence and Space* para el operador europeo Inmarsat (*International MARitime SATellite organization*), proveedor líder en servicios de comunicaciones móviles globales vía satélite, y la ESA.

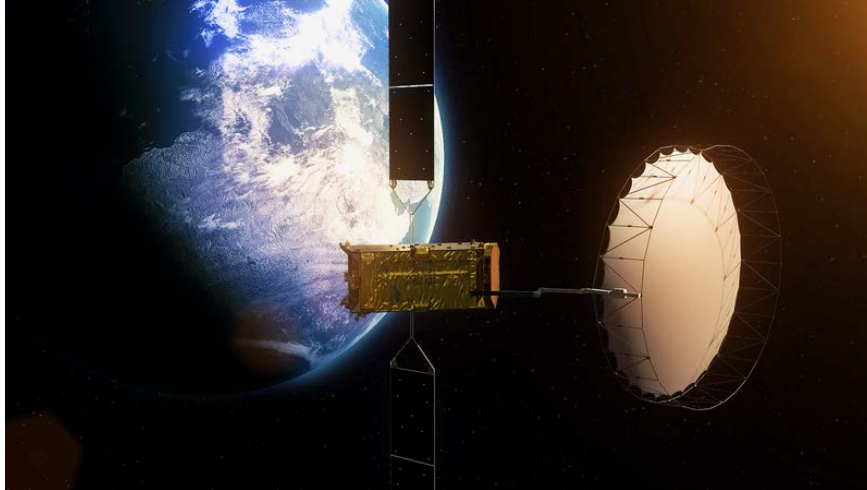


Figura 1.1 Alphasat [ESA]

Además de los servicios comerciales de Inmarsat en banda L, el satélite incorpora cuatro cargas útiles experimentales de la ESA denominadas TDP (*Technology Demonstration Payloads*). En el presente trabajo se utiliza la TDP-5, que es un prototipo de transmisor en banda Q/V, también conocida banda Q/V ‘Aldo Paraboni’. Tiene como objetivo evaluar la viabilidad de estas bandas para futuras aplicaciones de telecomunicaciones.



Figura 1.2 Q/V band TDP

Uno de los fines de este satélite es permitir la posibilidad de experimentar la propagación en las bandas Ka (30/20 GHz) y Q/V (50/40 GHz).

El grupo de investigación GTIC-Radiocomunicaciones lleva a cabo un experimento denominado *Alphasat propagation experiment by measuring the copolar level of the Q-Band beacon at 39.4 GHz* [2]. Se recibe en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), por medio de una antena parabólica y un receptor superheterodino de doble conversión, la señal baliza emitida por el satélite a 39,402 GHz para posteriormente procesarla y extraer las conclusiones pertinentes sobre el efecto de propagación en la banda Q.

La órbita descrita por Alphasat es una órbita geosíncrona (GSO) [9], lo que quiere decir que en un plazo de un día sideral, el satélite estará situado en la misma posición de la que partió al inicio de ese período. Durante el transcurso de un día, la posición del satélite en el cielo irá trazando una trayectoria, típicamente en forma de analema [11], cuyas características dependerán de la inclinación y excentricidad de la órbita.

Debido a que durante los primeros meses del experimento el receptor utilizó un apuntamiento fijo, la mayor parte del tiempo la antena no estaba apuntando exactamente a la posición del satélite, por lo que no tenía el máximo de radiación en dirección al satélite en todo instante de tiempo, traduciéndose en una pérdida del nivel de señal recibido.

Por lo tanto, este Trabajo Fin de Grado se ha centrado en la corrección del desapuntamiento producido durante los primeros meses del experimento, más concretamente desde el 1 de abril de 2014 hasta el 9 de septiembre de 2014. En los capítulos posteriores se describirán con detalle las técnicas utilizadas para llevar a cabo el proceso así como gráficas con los resultados obtenidos.

1.2. Objetivos

El objetivo del Trabajo fin de Grado es eliminar el desapuntamiento producido debido a un apuntamiento fijo por el receptor durante los primeros meses del experimento, que dio lugar a fluctuaciones del nivel de señal recibido que llegaron a ser de ± 3 dB pico a pico, producidos a lo largo del día. Para llevar a cabo la eliminación, llevaremos a cabo dos técnicas diferentes:

- Media móvil
- FFT

Estas técnicas se explicarán en detalle en los capítulos posteriores; para un correcto procesado de la información se tendrán en cuenta los efectos producidos por los desvanecimientos. Los resultados obtenidos ayudarán a desarrollar nuevos modelos en la banda Q, e incluso a validar y mejorar los ya existentes.

2. Principios Teóricos

En esta sección se llevará a cabo una explicación sobre los principales conocimientos teóricos que ayudarán al lector a entender el propósito del experimento. Este contenido será usado en los próximos capítulos como base del desarrollo del Trabajo fin de Grado.

2.1. Efectos atmosféricos sobre la propagación

A la hora de diseñar un sistema de comunicación por satélite, en los enlaces Tierra-Espacio, el efecto atmosférico sobre las ondas radioeléctricas es un factor muy importante. Los diversos efectos atmosféricos, tratados de forma aislada o en combinación, pueden producir alteraciones de formas variadas de la señal (amplitud, fase, ángulo de elevación, polarización) provocando un incremento de la tasa de error (transmisión digital) o decremento de la calidad (transmisión analógica). En general, estos efectos son más graves cuanto menor es el ángulo de elevación y mayor es la frecuencia. Todos estos efectos son especialmente relevantes a partir de los 10 GHz. A continuación se lleva a cabo una breve explicación de todos ellos.

2.1.1. Atenuación por lluvia

La existencia de lluvia durante el enlace da lugar a uno de los efectos atmosféricos de mayor relevancia en cuanto a las comunicaciones por satélite se refiere. La atenuación por lluvia produce un decremento del nivel de la señal transmitida, debido a la absorción y dispersión de la energía producido por las gotas de agua. Además la polarización puede verse afectada por la forma de los hidrometeoros.

La atenuación por lluvia depende de la frecuencia de la señal, que comienza a ser relevante a partir de los 8 GHz incrementándose hasta los 200 GHz. También depende de otros efectos tales como la forma de las gotas de agua (comentado anteriormente), la temperatura ambiente y la presión atmosférica.

2.1.2. Centelleo Troposférico

Las señales de radiocomunicación recibidas por medio de enlaces Tierra-Espacio por encima de unos 10 GHz y con ángulos de elevación pequeños se ven afectadas por el centelleo troposférico, sufriendo variaciones muy rápidas en su intensidad y fase, debido a pequeñas variaciones del índice de refracción en la atmósfera causadas por irregularidades en: la humedad, la temperatura ambiente y la presión atmosférica (turbulencias atmosféricas), ocasionando problemas referentes al correcto funcionamiento de los sistemas.

Las rápidas fluctuaciones de la intensidad de la señal recibida pueden dar lugar a contratiempos en los sistemas de seguimiento de antena, en el control de potencia ascendente y en la implementación de técnicas para mitigación de desvanecimientos (FMT).

Estos efectos están ligados al clima, debido a la correlación existente con la probabilidad de formación de fenómenos turbulentos en la atmósfera, dando a una elevada variabilidad diurna y estacional.

2.1.3. Atenuación por nubes y niebla

Las nubes y la niebla están constituidas por minúsculas gotas de agua en suspensión, con diámetros inferiores a 0,1 mm. La atenuación que se produce, en frecuencias milimétricas, depende fundamentalmente del contenido del agua líquida y de la temperatura de las gotas.

La atenuación debida a las nubes puede ser un factor relevante, en particular para sistemas de microondas con frecuencias superiores a los 10 GHz o para sistemas de baja disponibilidad. Las nubes situadas a gran altitud están compuestas por cristales de hielo, que no afectan de una manera significativa en cuanto a la atenuación se refiere, pero si pueden dar lugar a efectos de despolarización.

En lo referente a la atenuación por niebla, no es significativa para frecuencias inferiores a los 100 GHz debido a que el espesor de la capa de niebla suele ser muy reducido (del orden de 100 metros o menos).

2.1.4. Atenuación por gases

La atenuación por gases se debe principalmente a la absorción de las moléculas de oxígeno y vapor de agua. Para frecuencias menores a 10 GHz puede ser ignorada en la mayor parte de los casos. Al aumentar la frecuencia y disminuir el ángulo de elevación su importancia se ve incrementada.

Se produce principalmente en líneas espectrales específicas, de las cuales la de 60 GHz es la que produce una mayor atenuación total, correspondiente a la molécula de oxígeno, también existe una banda aislada en 118,74 GHz.

Por otro lado, el vapor de agua contribuye con una atenuación mayor para las bandas de 183,3 y 323,8 GHz, también está presente en menor medida en los 22 GHz. Por encima de los 300 GHz el vapor de agua provoca una atenuación muy elevada en las frecuencias de THZ.

Normalmente, la contribución del oxígeno a la absorción atmosférica es relativamente constante, sufriendo alguna pequeña variación causada por cambios en la temperatura, sin embargo la atenuación por vapor de agua es muy inestable, debido a las grandes variaciones del contenido de vapor de agua de la atmósfera.

2.1.5. Despolarización por hidrometeoros

La causa mayoritaria que da lugar a la despolarización son las tormentas y precipitaciones. La despolarización se produce cuando la señal se propaga por medios anisótropos, dando lugar a una polarización diferente a la incidente. Esta está presente tanto en la ionosfera y en la troposfera.

La despolarización originada por la precipitación viene causada por desplazamientos diferenciales de fase y atenuación inducidos entre las componentes ortogonales de la onda incidente. Las ondas de polarización ortogonal que atraviesan un medio que provoca fases diferenciales están despolarizadas, pero mantienen el carácter ortogonal. Sin embargo, si el medio provoca también la atenuación diferencial, la ortogonalidad queda destruida.

2.2. Media móvil

La media móvil (*moving average*), lleva a cabo un promediado de las muestras anteriores y posteriores, en igual proporción, dando lugar a un conjunto de nuevos valores correspondientes a series de promedios de un subconjunto de los datos originales. Este subconjunto se corresponde con la longitud de una ventana que se irá desplazando a lo largo de las muestras previas haciendo el correspondiente promediado y dando lugar a la serie de valores promedio.

Este proceso produce un suavizado de la señal original, lo que da lugar a la eliminación de las altas frecuencias y permanencia de las bajas, es decir, resaltarán las tendencias o ciclos de gran duración.

2.3. Transformada de Fourier

Para llevar a cabo el análisis en frecuencia de una señal discreta $\{x(n)\}$, se convierte la secuencia dada en el dominio del tiempo en una secuencia equivalente en el dominio de la frecuencia. La secuencia equivalente obtenida viene dada por la transformada de Fourier $X(\omega)$. Sin embargo, $X(\omega)$ es una función continua y por lo tanto no se puede manejar de forma discreta, por lo que sería de gran utilidad disponer de una representación frecuencial discreta que posibilitara el empleo de los datos en el dominio de la frecuencia de forma discreta por medio de un ordenador.

Esto nos lleva a hablar de la transformada discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Transform*), la cual es un instrumento eficaz de cálculo para llevar a cabo el estudio en frecuencia de señales discretas en el tiempo (espectro).

La DFT permite convertir una secuencia de valores en el dominio del tiempo, a una secuencia de valores equivalente en el dominio de la frecuencia. Ecuación de análisis:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot W_N^{nk}, \quad \forall k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.3.1)$$

Donde tenemos a su vez la Inversa de la Transformada Discreta de Fourier (IDFT) que realiza el proceso contrario. Ecuación de síntesis:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot W_N^{-nk}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.3.2)$$

Siendo W_N los factores de fase definidos de la siguiente manera:

$$W_N = e^{-j2\pi/N} \quad (2.3.3)$$

Podemos observar que el tiempo de procesamiento de cada punto de la DFT se puede llevar a cabo realizando N multiplicaciones complejas y $(N-1)$ sumas complejas. Por lo que el cálculo de los valores de una DFT de N puntos suponen un total de N^2 multiplicaciones complejas y $N(N-1)$ sumas complejas.

Se observa que el cálculo directo de la DFT es ineficaz, la principal razón de ello es la no utilización de las propiedades de simetría y periodicidad del factor de fase citadas a continuación.

$$\text{Propiedad de simetría:} \quad W_N^{k+N/2} = -W_N^k \quad (2.3.4)$$

$$\text{Propiedad de periodicidad:} \quad W_N^{k+N} = W_N^k \quad (2.3.5)$$

2.3.1. Cálculo eficiente de la DFT: algoritmos FFT

Los algoritmos de cálculo eficientes ((2.3.4) y (2.3.5)), conocidos como algoritmos de la transformada rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), obtienen los mismos resultados que la DFT pero de una manera mucho más rápida debido al decremento producido en el número de cálculos que tienen que realizar para llevar a cabo la DFT. (De aquí en adelante se supone que la FFT está realizada en base 2). El número de operaciones para la implementación de la FFT se verá reducido hasta $(N \log_2 N)$ multiplicaciones complejas.

La FFT se encarga de descomponer la DFT de N puntos en transformadas de menor tamaño, cada DFT va descomponiéndose en DFTs de tamaño mitad a la anterior, obteniéndose finalmente un número de $(N/2)$ DFTs de dos puntos cada una (la transformada menor viene prefijada por la base de la FFT).

Para llevar a cabo la implementación de la FFT existen dos procedimientos:

- Diezmado en frecuencia (DIF, *Decimation In Frequency*).
- Diezmado en el tiempo (DIT, *Decimation In Time*).

Estos algoritmos son más eficientes si la DFT a calcular es de N puntos, siendo N potencia de 2, por lo que trataremos ese caso en particular.

2.3.1.1. Diezmado en el tiempo

Estos algoritmos se basan en la descomposición en subsecuencias de $x(n)$ de forma recursiva, calcular la DFT de estas subsecuencias y posteriormente combinarlas para finalmente llegar a la a la secuencia $x(n)$ de N puntos.

Tomando como partida la ecuación (2.3.1), se separa el sumatorio en términos de n par e impar:

$$X(k) = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m) \cdot W_N^{2mk} + \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m+1) \cdot W_N^{(2m+1)k} \quad (2.3.6)$$

Teniendo en cuenta que:

$$W_N^2 = W_{\frac{N}{2}} \quad (2.3.7)$$

Tenemos la siguiente nueva ecuación:

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m) \cdot W_{\frac{N}{2}}^{2k} + \left[\sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m+1) \cdot W_{\frac{N}{2}}^{mk} \right] \cdot W_N^k \\ &= F1(k) + F2(k) \cdot W_N^k, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (2.3.8)$$

Podemos observar que el primer término, $F1(k)$, es la DFT correspondiente a los $N/2$ puntos de las muestras pares de $x(n)$, mientras que el segundo término, $F2(k)$, multiplicado por el factor de fase representa a los $N/2$ puntos de las impares.

Debido a que $F1(k)$ y $F2(k)$ son periódicas de período $N/2$, tenemos:

$$F1\left(k + \frac{N}{2}\right) = F1(k) \quad (2.3.9)$$

$$F2\left(k + \frac{N}{2}\right) = F2(k) \quad (2.3.10)$$

Y si además aplicamos la propiedad de simetría (2.3.4), podemos expresar (2.3.8) como:

$$X(k) = F1(k) + F2(k) \cdot W_N^k, \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2.3.11)$$

$$X\left(k + \frac{N}{2}\right) = F1(k) - F2(k) \cdot W_N^k, \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2.3.12)$$

El diezmado de la secuencia de datos se puede repetir hasta que las secuencias resultantes queden reducidas a secuencias de un punto. Para $N = 2^v$, este diezmado puede realizarse $v = \log_2 N$ veces. Quedando finalmente un número total de multiplicaciones complejas de $\frac{N}{2} \log_2 N$ y un número de sumas complejas de $N \log_2 N$.

2.3.1.2. Diezmado en frecuencia

En este caso en lugar de dividir la secuencia de entrada $x(n)$ en subsecuencias, tal y como se hace en el apartado anterior 2.3.1.1, lo hace $X(k)$.

Separando (2.3.1) en los $N/2$ primeros términos y en los $N/2$ últimos términos tenemos:

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(n) \cdot W_N^{nk} + \sum_{n=\frac{N}{2}}^{N-1} x(n) \cdot W_N^{nk} \\ &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(n) \cdot W_N^{nk} + W_N^{Nk/2} \cdot \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x\left(n + \frac{N}{2}\right) \cdot W_N^{nk} \end{aligned} \quad (2.3.13)$$

Sabiendo que $W_N^{Nk/2} = (-1)^k$, aplicando (2.3.7) y dividiendo $X(k)$ en muestras pares e impares tenemos:

$$X(2k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} \left[x(n) + x\left(n + \frac{N}{2}\right) \right] \cdot W_{\frac{N}{2}}^{nk}, \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2.3.14)$$

$$X(2k + 1) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} \left\{ \left[x(n) - x\left(n + \frac{N}{2}\right) \right] W_{\frac{N}{2}}^{nk} \right\} W_{\frac{N}{2}}^{nk}, \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2.3.15)$$

Definiendo las secuencias de $N/2$ puntos $f1(n)$ y $f2(n)$ como:

$$f1(n) = x(n) + x\left(n + \frac{N}{2}\right), \quad n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2.3.16)$$

$$f2(n) = \left[x(n) - x\left(n + \frac{N}{2}\right) \right] W_N^n, \quad n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2.3.17)$$

Por lo que las ecuaciones (2.3.14) y (2.3.15) quedarán de la siguiente manera:

$$X(2k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f1(n) \cdot W_{\frac{N}{2}}^{nk} \quad (2.3.18)$$

$$X(2k + 1) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f2(n) \cdot W_{\frac{N}{2}}^{nk} \quad (2.3.19)$$

El procedimiento puede repetirse diezmando las DFTs de $N/2$ puntos, $X(2k)$ y $X(2k+1)$. El cálculo de la DFT de N puntos a través del algoritmo FFT de diezmando en frecuencia requiere $(N/2)\log_2 N$ multiplicaciones complejas y $N\log_2 N$ sumas complejas, de igual forma que el diezmando temporal.

2.3.1.3. Algoritmos con $N \neq 2^v$

Estos algoritmos no son tan eficientes como los algoritmos para valores de $N = 2^v$. Cuando N es un número compuesto muy alto, es decir, N puede descomponerse en factores para definir un producto de números primos de la forma:

$$N = n_1 n_2 \dots n_v \quad (2.3.20)$$

La DFT de N puntos se divide en n_1 DFTs de N/n_1 puntos, éstas a su vez se dividen en n_2 DFTs de $N/(n_1 n_2)$ puntos. La descomposición anterior puede repetirse hasta tener que implementar DFTs de n_v puntos, las cuales habría que llevar a cabo mediante el método directo. Este procedimiento termina cuando N se descompone en sus factores primos, por lo que nos interesa que n_v sea el factor más pequeño.

El caso óptimo tendría lugar cuando todos los factores fueran iguales entre sí, y a su vez iguales al factor primo menor distinto de 1, este sería el caso de $N = 2^v$. El caso peor tiene lugar cuando N es un número primo mayor que 2, lo que implicaría la implementación de una DFT de N puntos por el método directo.

3. Procesado de Datos: Técnicas de corrección del desapuntamiento

En el presente capítulo se describe la parte práctica del proyecto, que consiste, tal y como se ha adelantado en capítulos anteriores, en la corrección del desapuntamiento surgido durante los primeros meses del experimento, para así llevar a cabo una correcta extracción de las medidas obtenidas durante ese período de tiempo. Esta corrección se ha realizado mediante las dos técnicas que han sido explicadas en capítulos anteriores:

- Media móvil
- FFT

Ambas técnicas han sido desarrolladas en MATLAB® R2015a. Para la realización del algoritmo de la media móvil no se ha llevado a cabo la utilización de ninguna herramienta específica del programa, ya que no era necesario para la implementación del mismo. Sin embargo a la hora de desarrollar el algoritmo que implementa la FFT se ha utilizado la herramienta *Signal Processing Tool* de MATLAB, que permite llevar a cabo un análisis tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia mediante la FFT.

Estas técnicas se han utilizado para aplicar un filtro paso bajo a la señal, identificando así los efectos producidos por desplazamientos relativos en azimut y elevación, para su posterior eliminación obteniendo así unos datos de salida válidos.

El uso de un filtro paso bajo para la eliminación de los efectos nocivos comentados anteriormente se fundamenta en el experimento *AlphaSat Ka-band and Q-band Receiving Station in Rome: development, status and measurements* realizado por la Universidad de Roma La Sapienza [13].

3.1. Presentación de los eventos

En el presente apartado del capítulo 3 se presentan los eventos de mayor importancia transcurridos durante el período de tiempo de este experimento. En los siguientes apartados se compararán los resultados obtenidos tras la aplicación de las técnicas enumeradas con los presentados en este apartado.

Los días estudiados en particular por el interés mostrado han sido los siguientes:

- El 12 de abril de 2014, en este día se produce una caída de aproximadamente 8dB debido a uno de los efectos atmosféricos explicados con anterioridad, la lluvia (Capítulo 2.1.1.).

- El 7 de mayo de 2014, día con huecos en la medida.
- El 19 de junio de 2014, día con lluvia y variaciones de nivel en las horas previas, posiblemente causadas por nubes.
- El 29 de agosto de 2014, día de cielo claro, sin desvanecimientos.

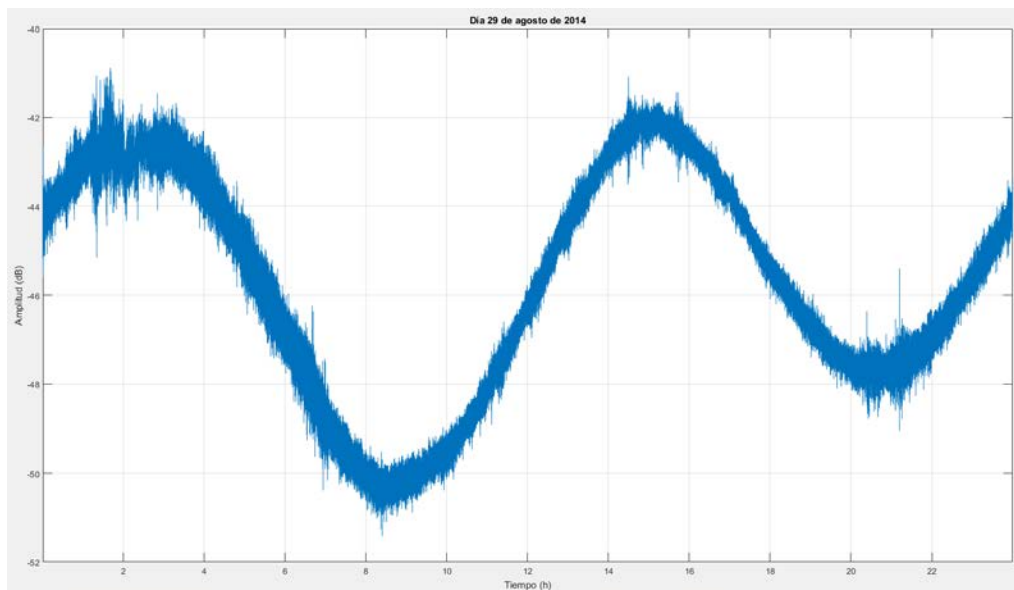


Figura 3.1.1 Día 29.08.2014. Evento sin desvanecimientos.

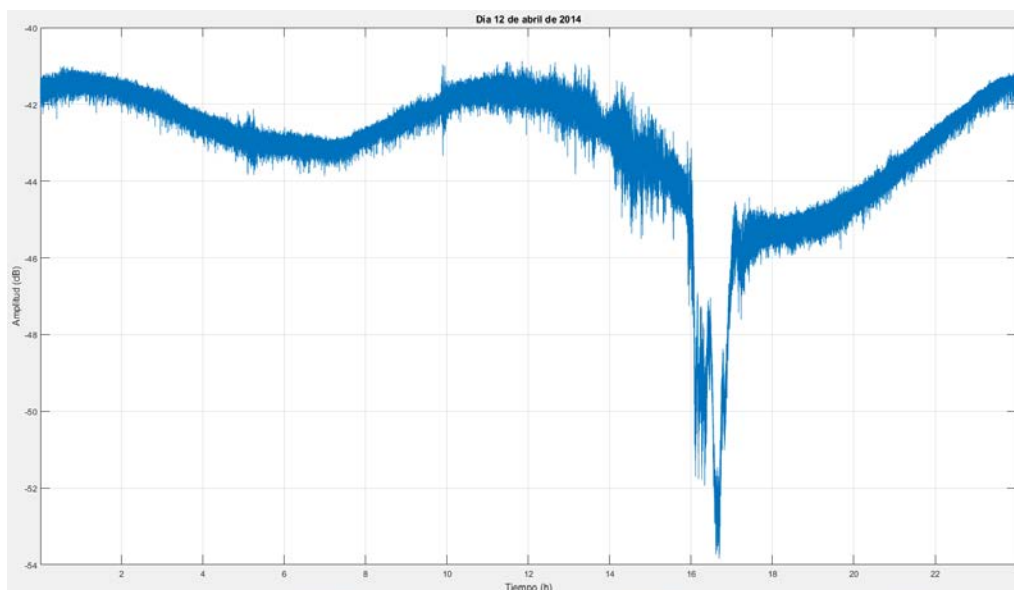


Figura 3.1.2 Día 12.04.2014. Evento lluvioso.

Experimento de propagación en banda Q con Alphasat: Técnicas para la compensación del desajuste

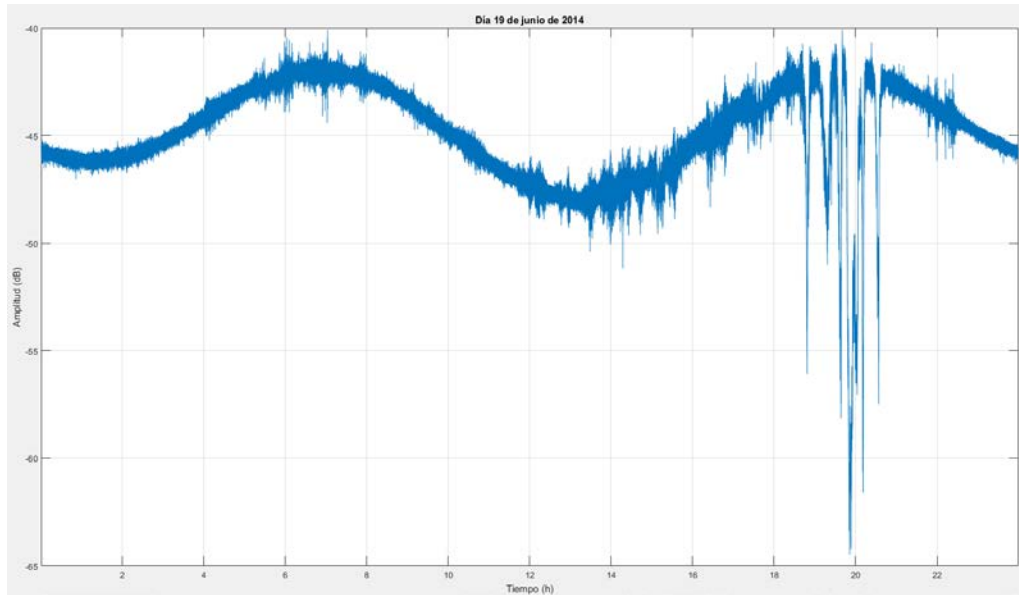


Figura 3.1.3 Día 19.06.2014. Evento lluvioso con variaciones de nivel en las horas previas, posiblemente causadas por nubes.

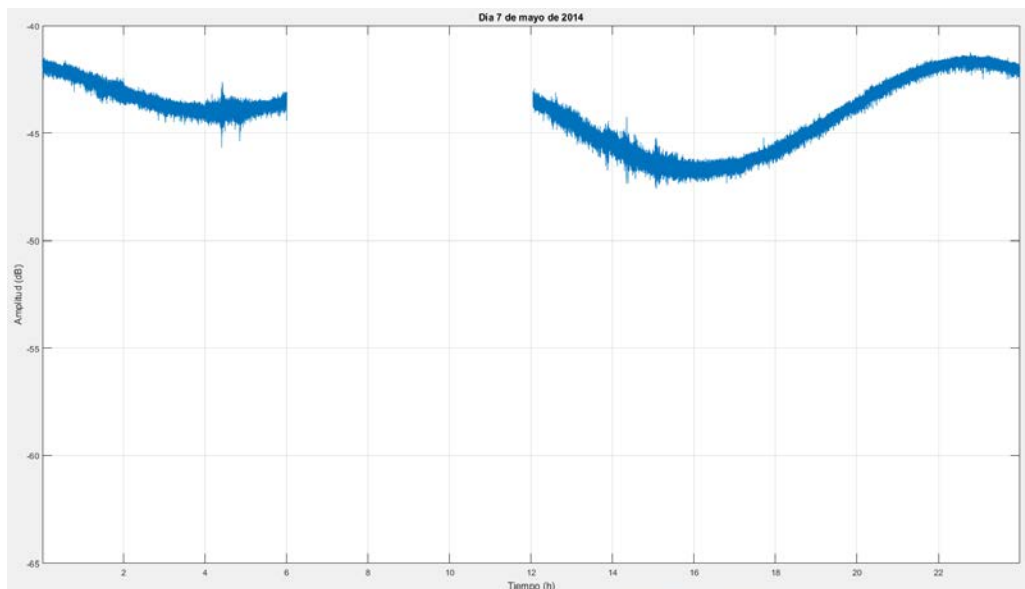


Figura 3.1.4 Día 07.05.2014. Huecos en la medida de la señal.

3.2. Media Móvil

La media móvil ha sido la primera técnica utilizada para compensar el desapuntamiento. Tal y como se ha explicado en el capítulo 2.2, se lleva a cabo el suavizado de la señal mediante el cálculo de un nuevo subconjunto de muestras. Estas serán obtenidas mediante el promediado de muestras anteriores y posteriores, que irán variando mediante el desplazamiento de la ventana de promediado, dando lugar a nuevas muestras que conformarán el subconjunto. Este proceso, como se podrá ver a lo largo de este capítulo, se ha llevado a cabo para ventanas de diversa duración siendo elegidas acorde a los efectos que buscamos preservar, efectos cuya constante de tiempo es del orden de minutos o menos. Por este motivo se han utilizado ventanas de duración muy superior para su preservación:

- 1 hora
- 1,5 horas
- 2 horas

El suavizado de la señal, corresponderá a un filtro paso bajo, que resaltará las tendencias o ciclos de gran duración causadas por el apuntamiento fijo al satélite durante los primeros meses del experimento.

A continuación se plantean los resultados de los días expuestos en el apartado anterior (3.1. Presentación de los eventos).

3.2.1. Día 29.08.2014. Evento sin desvanecimientos

Tras la aplicación de la media móvil a la señal correspondiente del día representado en la Figura 3.1.1, obtenemos el filtrado paso bajo para ventanas de diferente duración tal y como podemos apreciar en la Figura 3.2.1.

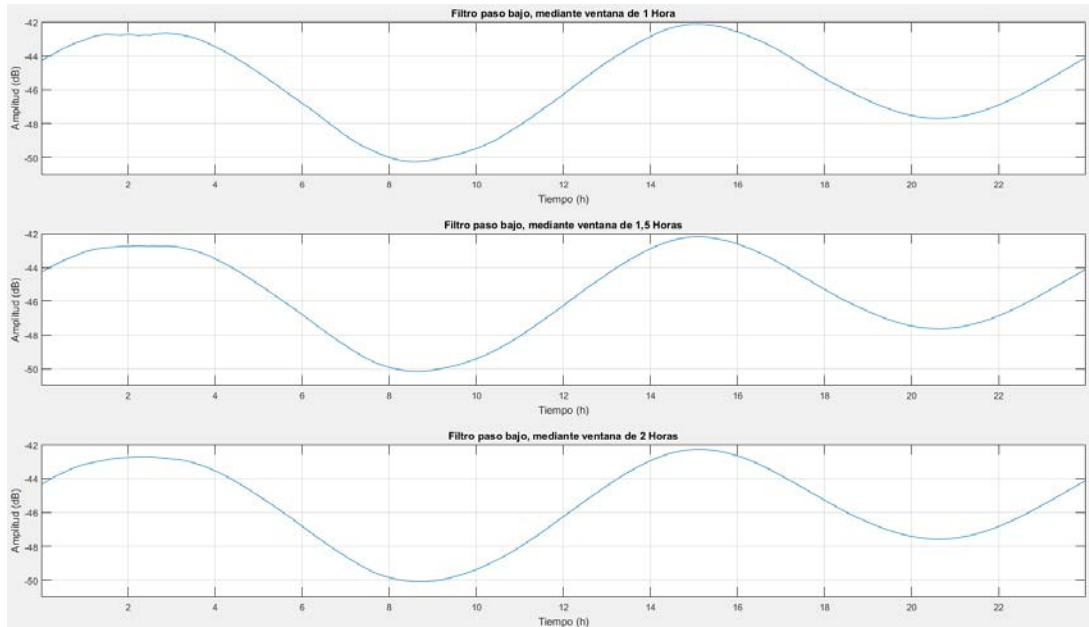


Figura 3.2.1 Filtro paso bajo del día 29.08.2014 llevado a cabo con ventanas de duración 1, 1,5 y 2 horas respectivamente.

Una vez obtenido el filtro paso bajo para cada una de las diferentes ventanas, se comparan entre sí para ver el funcionamiento de los mismos. Observamos en las figuras presentadas a continuación el comportamiento de unos frente a otros.

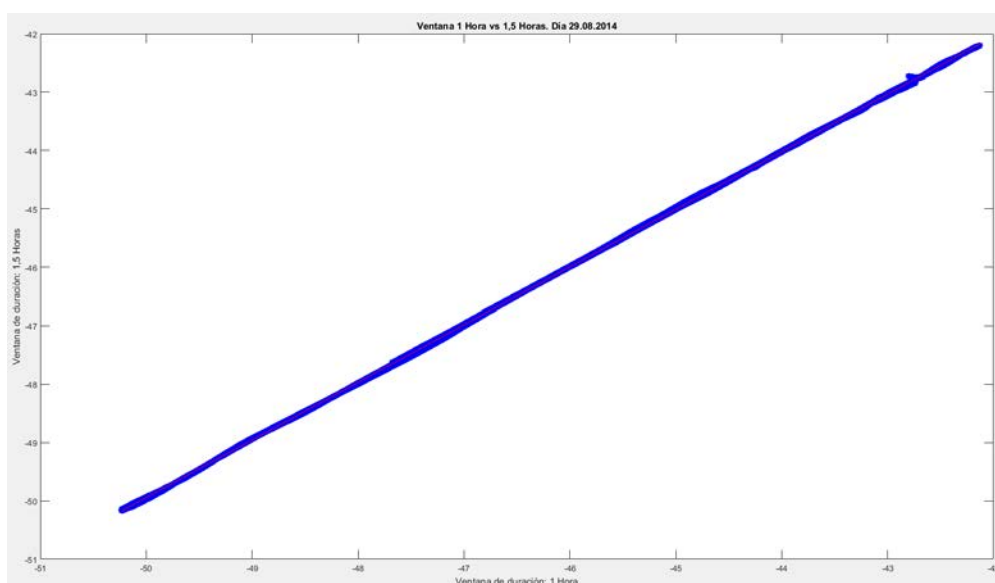


Figura 3.2.2 Día 29.08.2014. Ventana 1 hora Vs 1,5 horas.

Experimento de propagación en banda Q con Alphasat: Técnicas para la compensación del desajuste

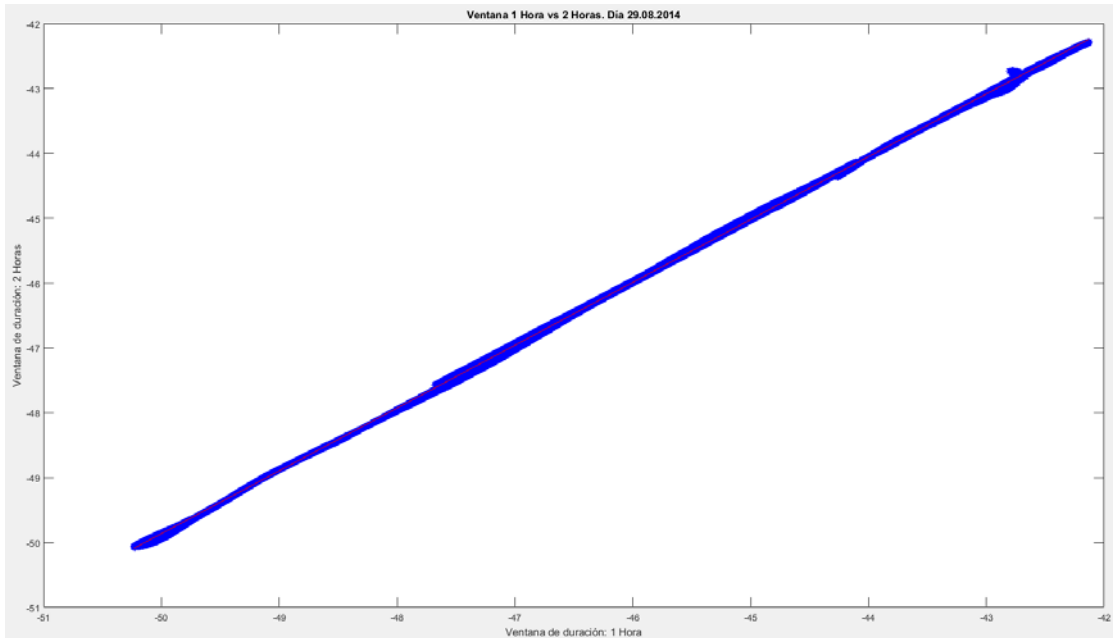


Figura 3.2.3 Día 29.08.2014. Ventana 1 hora Vs 2 horas.

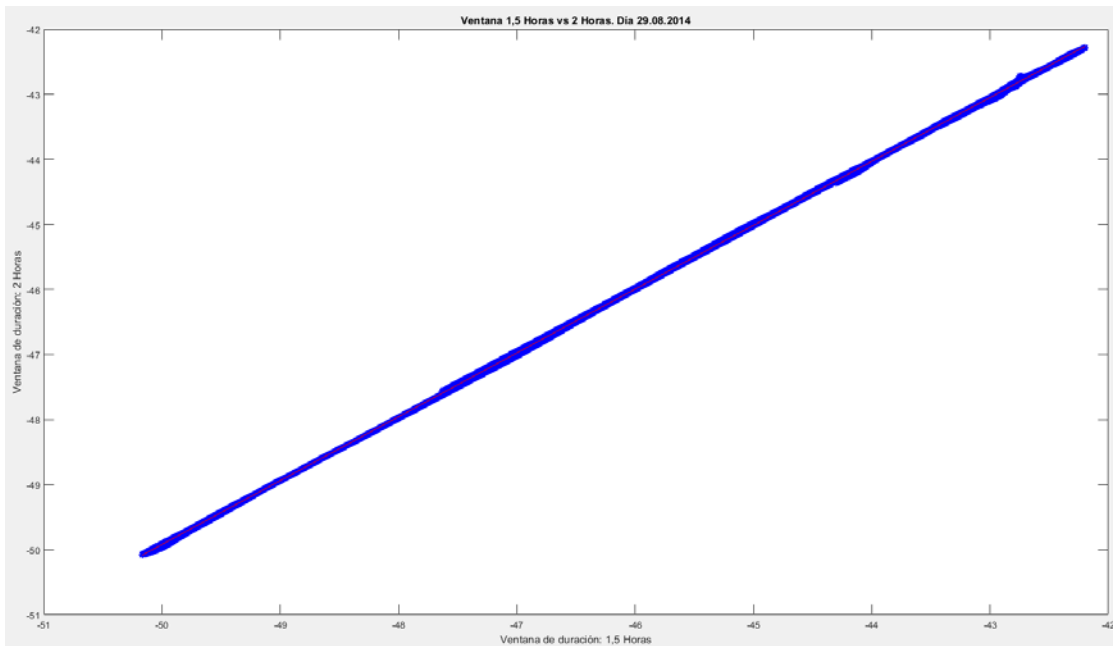


Figura 3.2.4 Día 29.08.2014. Ventana 1,5 horas Vs 2 horas.

Como podemos observar, para el día sin desvanecimientos, los tres casos funcionan de forma similar. Debido a que el tiempo de ejecución aumenta al aumentar el tiempo de duración de la ventana de promediado, la ventana óptima es la que tiene una duración de 1 hora, ya que aporta los mismos resultados que el resto, pero con un tiempo de procesado menor.

A continuación, en la Figura 3.2.5 podemos ver la señal que hemos obtenido una vez sustraídos los efectos debidos a los desplazamientos relativos en azimut y elevación debido al apuntamiento fijo. Hemos utilizado la ventana de 1 hora de duración, por las razones comentadas anteriormente.

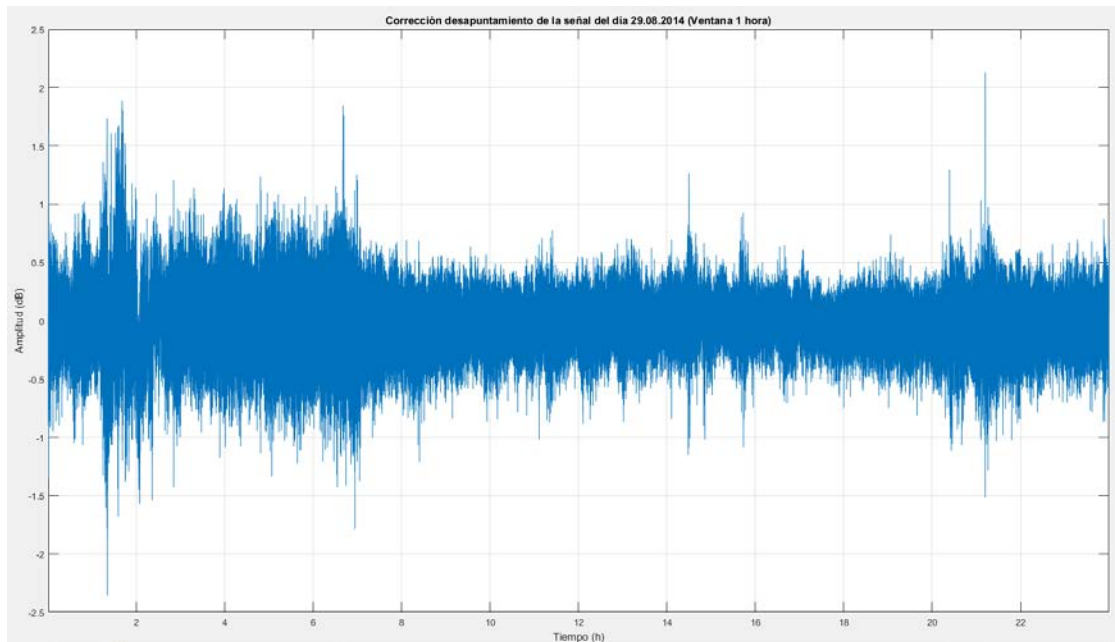


Figura 3.2.5 Corrección del desapuntamiento mediante la utilización de una ventana de 1 hora de duración para el día 29.08.2014.

3.2.2. Día 12.04.2014. Evento lluvioso

Respecto al día presentado en la Figura 3.1.2, está caracterizado por la aparición de un fenómeno lluvioso con una duración aproximada de 1,5 horas. Para la realización de la media móvil, en este caso procederemos de igual forma pero teniendo en cuenta una serie de detalles presentados a continuación:

1. Se detectan las zonas de lluvia de manera manual, en este caso únicamente hay un evento lluvioso.
2. Se elimina ese tramo y se sustituyen esas muestras mediante una interpolación.
3. Se lleva a cabo la media móvil.
4. Se sustraen las muestras lluviosas de la señal original utilizando la señal interpolada.
5. Se eliminan las muestras interpoladas de la media móvil y se suma el evento lluvioso (muestras lluviosas de la señal original que han sido extraídas en el paso 4).

Al igual que en el apartado anterior, se ha llevado a cabo una comparación del distinto funcionamiento del filtrado paso bajo con las diversas ventanas. Tal y como podemos observar en la Figura 3.2.6.

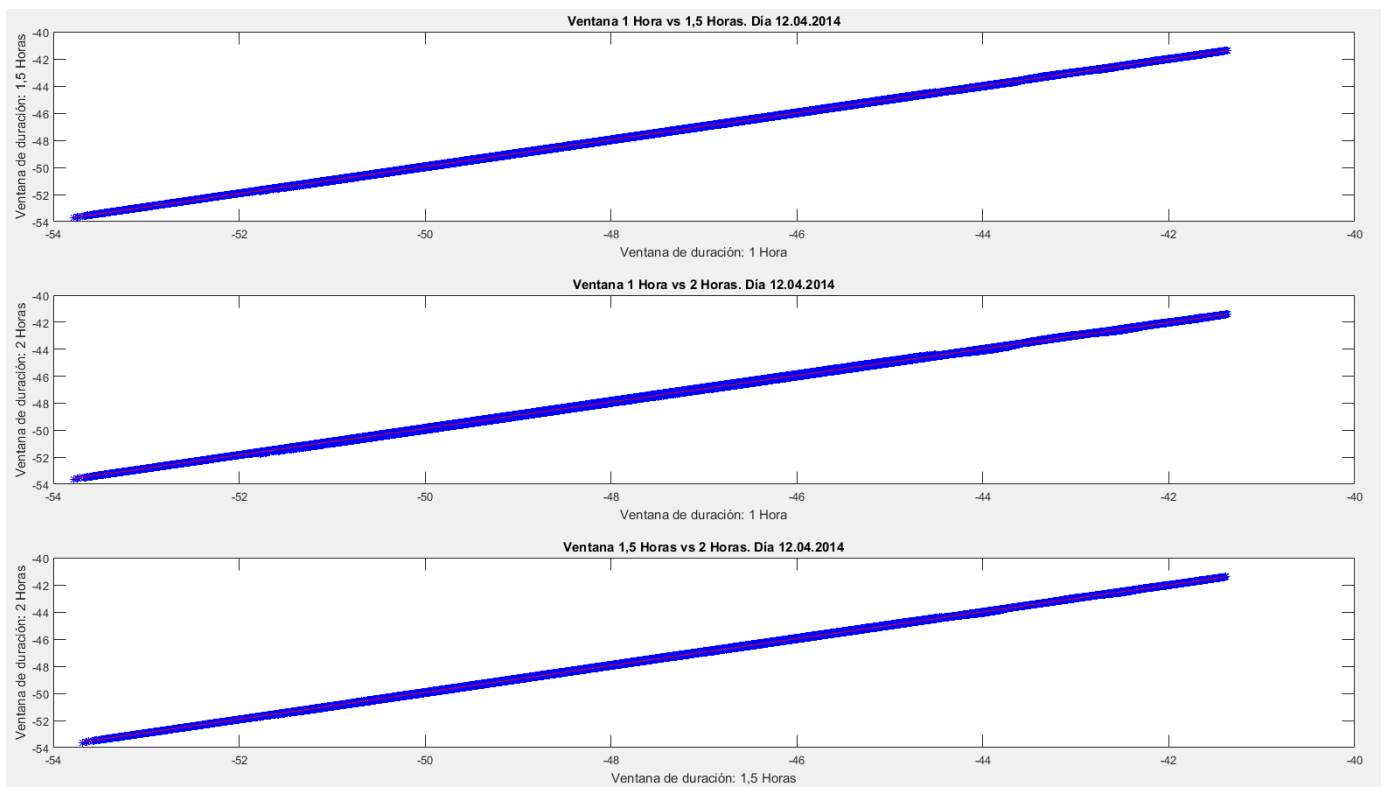


Figura 3.2.6 Día 12.04.2014. Comparación de funcionamiento entre ventanas de diferente duración.

Al igual que para el día 29.08.2014, el comportamiento de las ventanas ha sido muy similar, por lo que se elegirá la ventana de menor duración, ya que como hemos comentado en el apartado 3.2.1, implica un menor tiempo de procesado.

Finalmente, una vez llevado a cabo el proceso de corrección del desapuntamiento, tal y como se ha detallado al principio de este apartado, obtenemos la señal con el evento característico de este día, la lluvia.

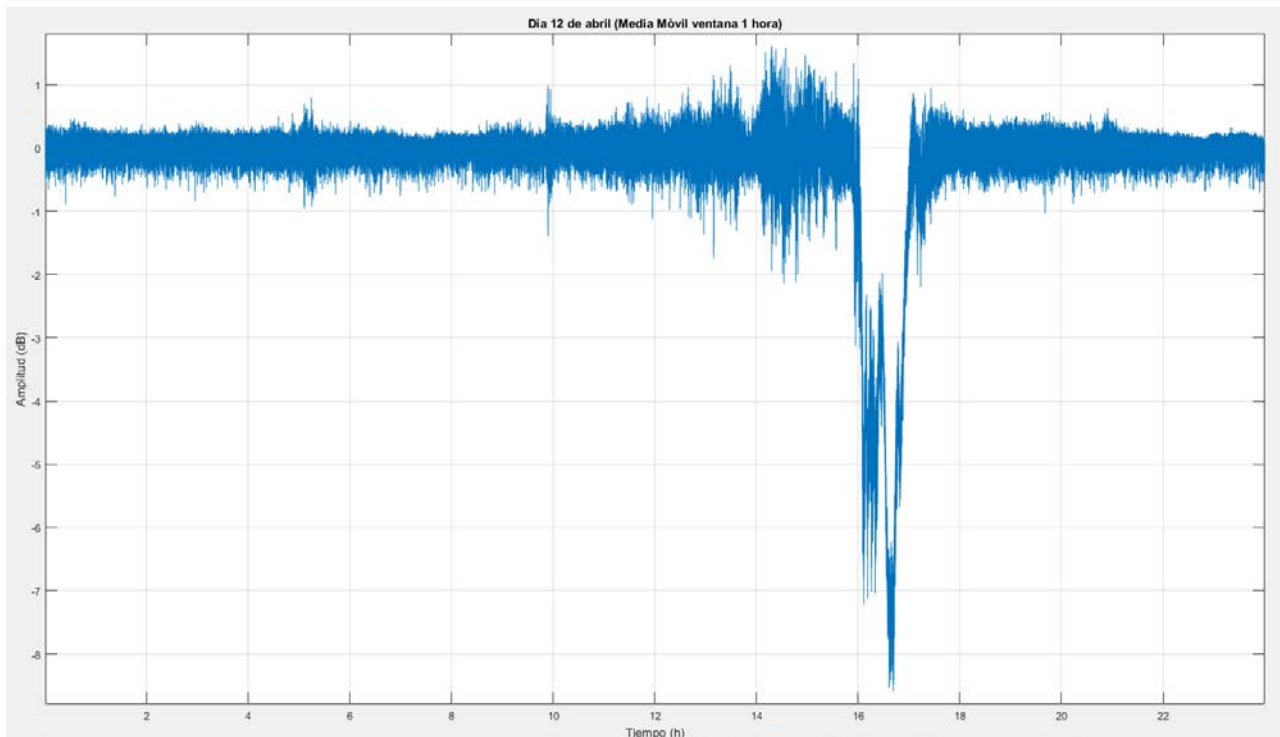


Figura 3.2.7 Corrección del desapuntamiento mediante la utilización de una ventana de 1 hora de duración para el día 12.04.2014.

3.2.3. Día 19.06.2014. Evento lluvioso con variaciones de nivel en las horas previas, posiblemente causadas por nubes

En el día representado en la Figura 3.1.3 además del evento de lluvia se pueden apreciar variaciones del nivel cuya posible causa sean las nubes. Llevaremos a cabo el proceso descrito en el apartado 3.2.2 para realizar el proceso de la media móvil, de igual forma para la lluvia y las nubes.

Tal y como se ha hecho en los apartados anteriores, compararemos el funcionamiento del filtro paso bajo calculado mediante las ventanas de diferente duración.

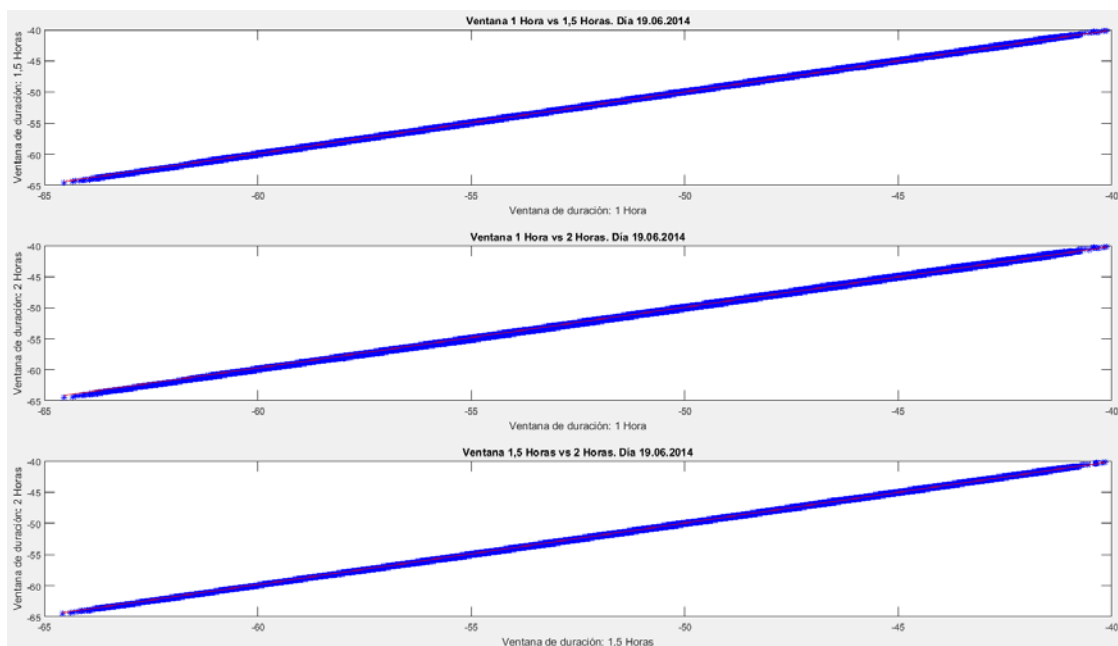


Figura 3.2.8 Día 19.06.2014. Comparación de funcionamiento entre ventanas de diferente duración.

El funcionamiento de las ventanas se comporta de forma muy similar, lo único que varía es el tiempo de duración de las mismas. Debido a que el resultado es el mismo presentaremos los datos de la corrección del desapuntamiento referentes a la ventana de duración 1 hora.

A continuación, en la Figura 3.2.9, podemos visualizar el resultado comentado en el párrafo anterior mediante la utilización de la media móvil con una ventana de duración 1 hora.

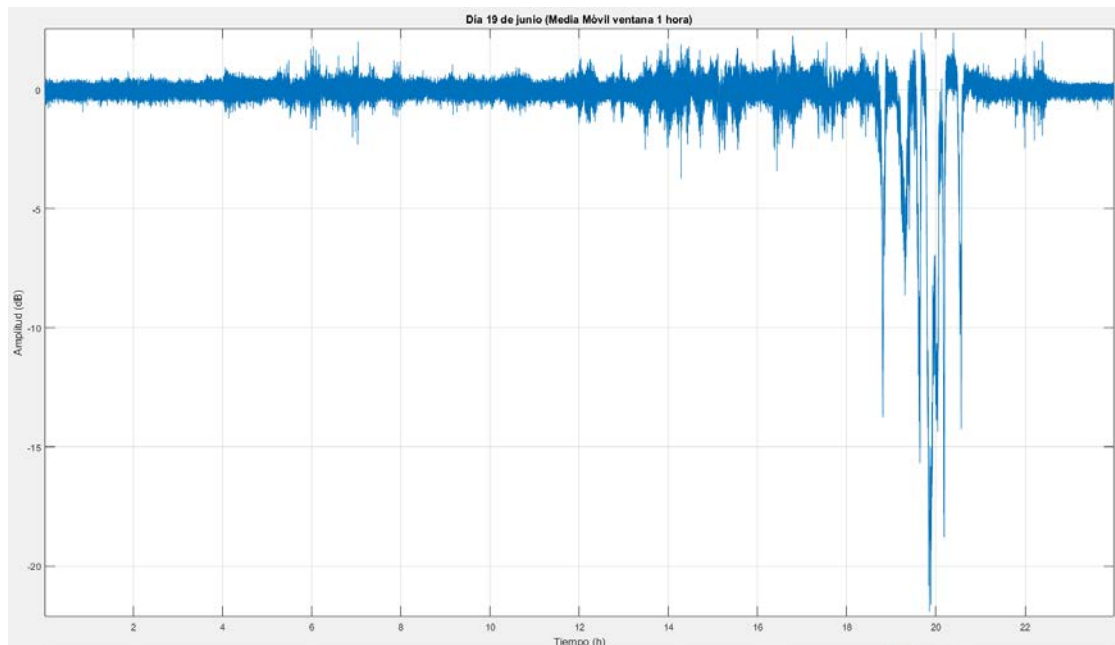


Figura 3.2.9 Corrección del desapuntamiento mediante la utilización de una ventana de 1 hora de duración para el día 19.06.2014

3.2.4. Día 07.05.2014. Huecos en la medida de la señal

En este día en particular, el evento que produce es un hueco en la medida de la señal, originado probablemente por la falta de suministro eléctrico en el receptor, tal y como podemos observar en la Figura 3.1.4.

En este caso, hemos realizado una interpolación de las muestras no existentes, y posteriormente, hemos llevado a cabo la media móvil a la que se le ha quitado las muestras interpoladas otorgándolas un valor de NaN, que era el que había en una primera instancia.

Comparamos el distinto funcionamiento del filtrado para las diversas ventanas, tal y como se ha llevado haciendo a lo largo del capítulo 3.2.

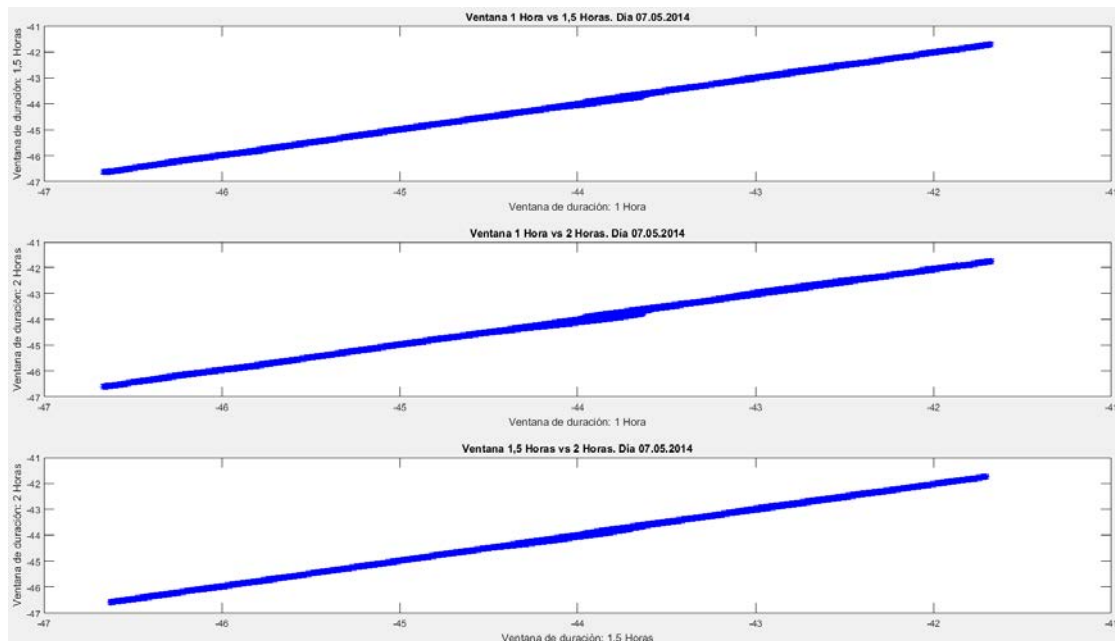


Figura 3.2.10 Día 07.05.2014. Comparación de funcionamiento entre ventanas de diferente duración.

Igual que se ha comentado para todos los días anteriores, el comportamiento de las ventanas es muy similar, por razones de eficiencia siempre se elegirá la ventana de menor duración y de igual prestaciones, es decir, la ventana de 1 hora.

Realizado el proceso de corrección del desapuntamiento, obtenemos la señal con el evento característico de este día.

Experimento de propagación en banda Q con Alphasat: Técnicas para la compensación del desapuntamiento

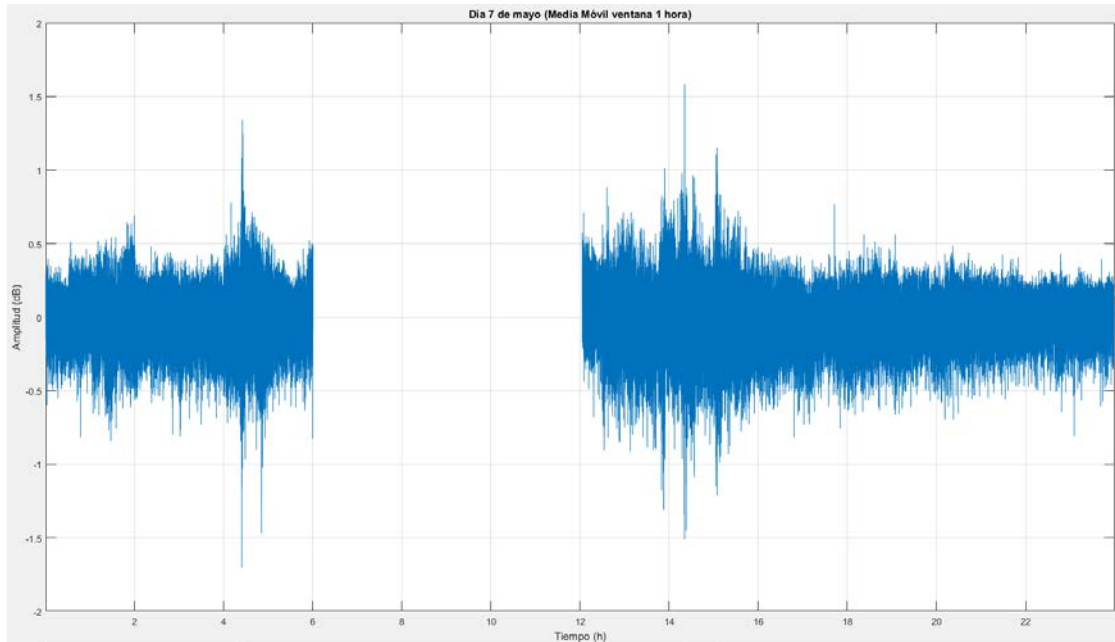


Figura 3.2.11 Corrección del desapuntamiento mediante la utilización de una ventana de 1 hora de duración para el día 07.05.2014

3.3. FFT

La DFT, explicada en el capítulo 2.3, se utiliza para representar las señales en el dominio frecuencial. En algunos casos, esta representación de los datos, permite extraer información relevante de periodicidades que no son posibles de ver en el dominio temporal. Al llevar a cabo la FFT y representarla en el dominio de la frecuencia, como era lógico de prever en nuestro caso, se han observado componentes en la frecuencia de 1/86400 Hz (1 día de periodo) y sus primeros armónicos, que se corresponden a las componentes periódicas del desapuntamiento.

Por ello la segunda técnica que hemos utilizado para llevar a cabo la corrección del desapuntamiento ha sido la FFT. Al igual que en la media móvil se llevará a cabo un filtrado paso bajo identificando así los efectos correspondientes al desapuntamiento, para posteriormente eliminarlos, obteniendo finalmente unos datos de salida válidos.

Este procedimiento se ha fundamentado en el modelo de extracción explicado en el Informe final de la Acción COST IC0802 [1], que se detallará a continuación y se explicará el fundamento del mismo. Utiliza la FFT de un conjunto de días impares, ventana de 3, 5 o 7 días, con la finalidad de extraer la señal, correspondiente al día intermedio de las ventanas enumeradas, con la corrección del desapuntamiento ya realizada.

El proceso que se ha llevado a cabo está formado por una serie de pasos a tener en cuenta:

1. Debido a que la FFT únicamente puede aplicarse a datos cuyo tiempo de resolución sea uniforme, es decir, sin saltos debido a la falta de datos o a la aparición de eventos de atenuación elevados, estos necesitan ser excluidos del modelo de extracción.
2. En primer lugar se realiza la interpolación lineal de las medidas excluidas y de las no existentes (espacio temporal sin medidas), necesitan ser corregidos o excluidos respectivamente, para llevar a cabo la FFT correspondiente a la ventana que se haya determinado en ese momento.
3. Posteriormente se realiza una corrección lineal para poner el nivel de la señal en el tiempo 0 al mismo nivel que el nivel de la señal en el último instante de temporal. Este paso incrementa la eficacia de la FFT, manteniéndose únicamente las componentes frecuenciales muy bajas.
4. Se calcula la FFT de la ventana determinada.

5. Se seleccionan únicamente las componentes de la FFT de baja frecuencia, es decir, las correspondientes con las componentes periódicas que dan lugar al desapuntamiento.

$$FFT = [a_0 \quad a_{f_1} \quad a_{f_1} \quad a_{f_1} \quad a_{f_1} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad a_{f_1} \quad a_{f_1} \quad a_{f_1} \quad a_{f_1}]$$

El resto de las componentes de la FFT son puestas a 0.

6. Se realiza la IFFT, y se obtiene su parte real. De esta forma nos quedamos con las componentes periódicas debidas al desapuntamiento.
7. Compensamos la corrección lineal llevada a cabo anteriormente.
8. Finalmente se sustrae la parte real de la IFFT (correspondiente a un filtrado paso bajo) de la señal objeto de estudio, día intermedio. Esta operación da lugar a la señal que recibido una vez eliminados los efectos debidos a los desplazamientos relativos en azimut y elevación debido a un apuntamiento fijo.

A continuación se plantean los resultados obtenidos tras la realización de la implementación de la FFT para corregir el desapuntamiento sufrido durante los primeros meses del experimento. Los resultados expuestos hacen referencia a los días enumerados en el apartado 3.1 de este capítulo.

3.3.1. Día 29.08.2014. Evento sin desvanecimientos

Debido a que ni el día representado en la Figura 3.1.1, ni los anteriores y posteriores a este presentan saltos debido a la falta de datos o la aparición de eventos de atenuación elevados, no es necesaria la realización de ningún tratamiento de los mismos por lo que para las ventanas de 3, 5 y 7 días procederíamos de la misma manera.

Se comienza realizando la corrección lineal y se finaliza con la sustracción de los efectos debido al desapuntamiento, siguiendo los pasos intermedios comentados en el apartado 3.3.

Tras llevar a cabo la eliminación de las componentes periódicas causadas por el desapuntamiento, se obtiene la señal de salida final (señal sin desapuntamiento).

En las figuras presentadas a continuación visualizamos la señal una vez aplicada la corrección del desapuntamiento para longitudes de ventana de duración 3, 5 y 7 días respectivamente.

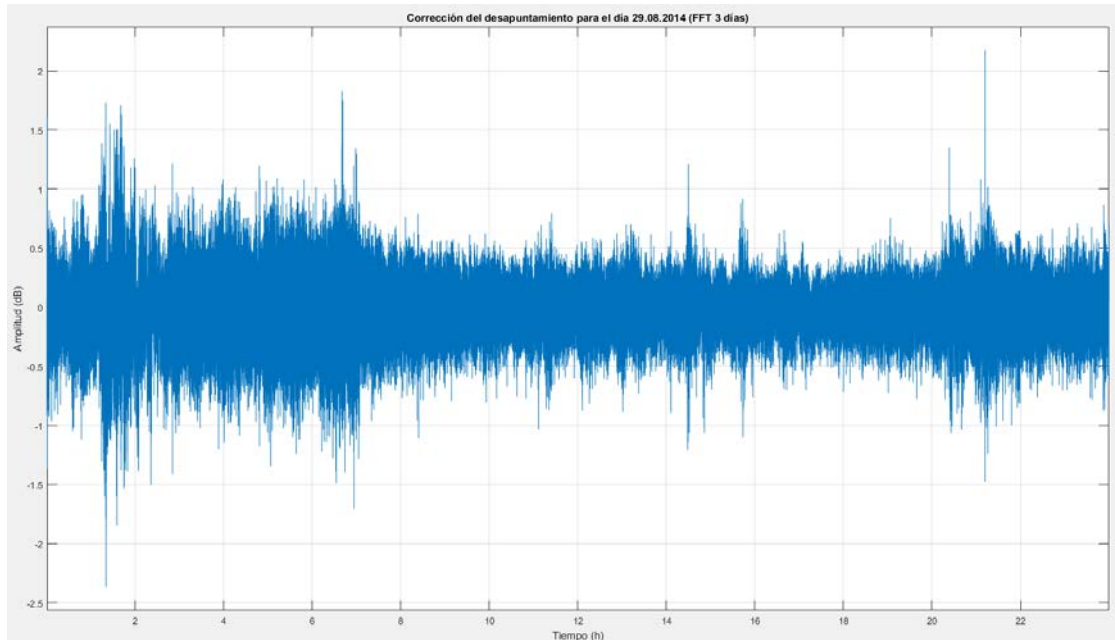


Figura 3.3.1 Corrección del desapuntamiento para el día 29.08.2014 mediante la utilización de una FFT para una ventana de 3 días.

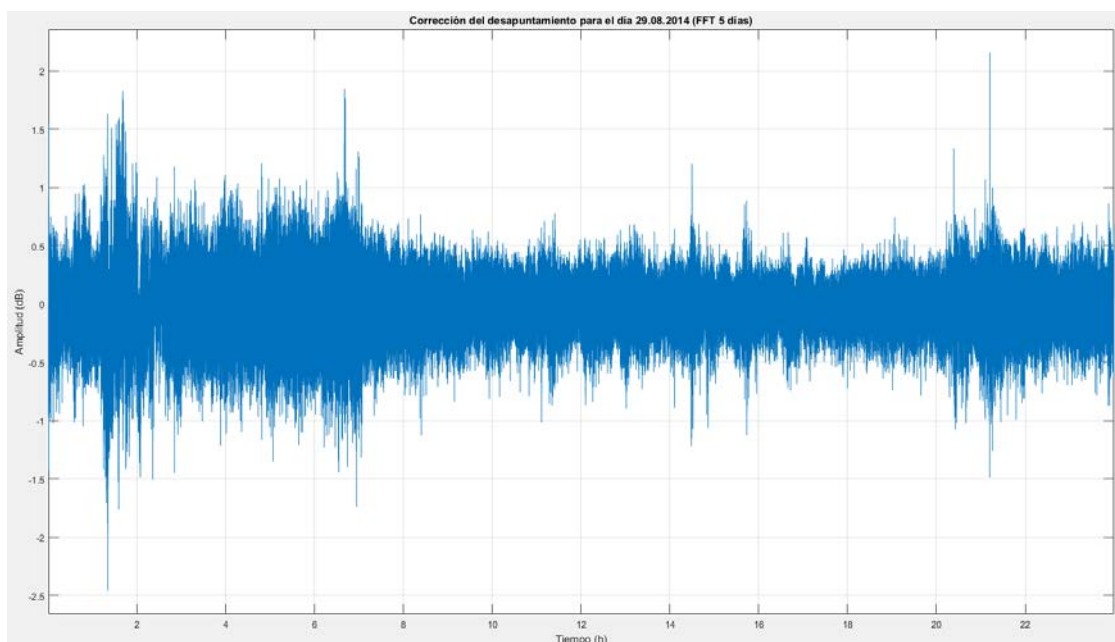


Figura 3.3.2 Corrección del desapuntamiento para el día 29.08.2014 mediante la utilización de una FFT para una ventana de 5 días.

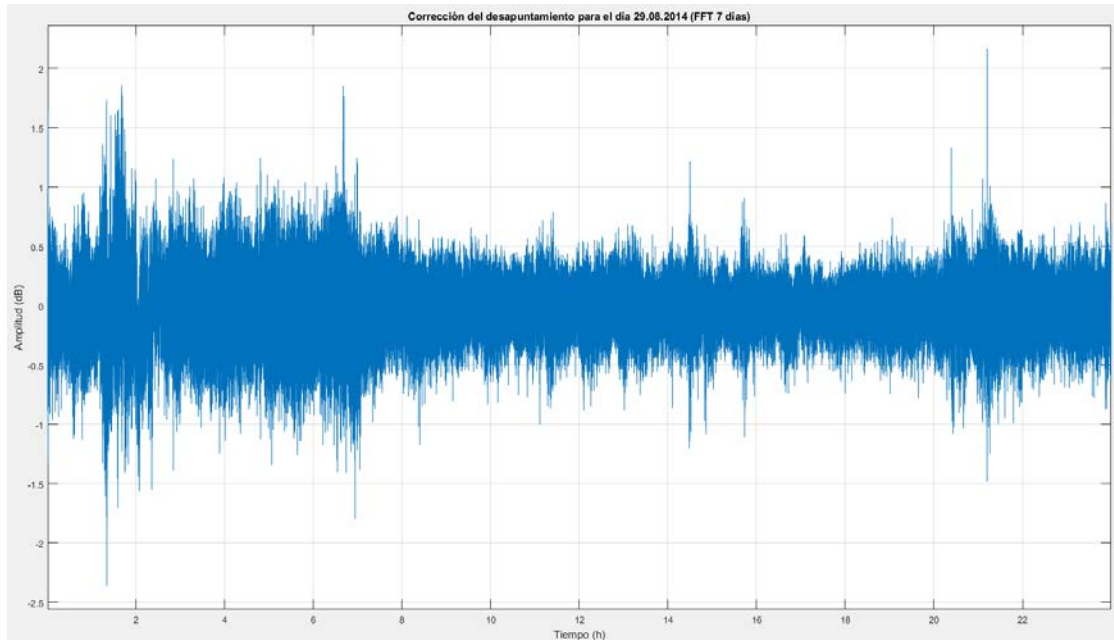


Figura 3.3.3 Corrección del desapuntamiento para el día 29.08.2014 mediante la utilización de una FFT para una ventana de 7 días.

Se observa que para el evento sin desvanecimientos, la utilización de ventanas de un tamaño mayor o menor presenta resultados muy similares, la única diferencia es el tiempo de ejecución llevado a cabo por la FFT que es mayor a mayor número de días a analizar.

3.3.2. Día 12.04.2014. Evento lluvioso

Al contrario que en el evento sin desvanecimientos, alguno de los días involucrados para llevar a cabo la discriminación de los efectos del desapuntamiento presentan falta de datos o eventos de atenuación elevados. A causa de que la FFT únicamente puede aplicarse a datos cuyo tiempo de resolución sea uniforme, estos eventos necesitan ser descartados. Los días que presentan eventos de este tipo son:

- Día 10.04.2014, presenta falta de datos.
- Día 12.04.2014, día para el que se pretende realizar la corrección del desapuntamiento, presenta un evento lluvioso.
- Día 15.04.2014, presenta un evento lluvioso.

Una vez llevado a cabo el proceso completo se incorpora el evento lluvioso que anteriormente había sido sustituido por una interpolación, para ello:

1. Se sustraen las muestras lluviosas de la señal original utilizando la señal interpolada.
2. Se eliminan las muestras interpoladas, correspondientes a las muestras del evento lluvioso del resultado obtenido tras eliminar los efectos de desapuntamiento, y se suma el evento lluvioso.

A continuación se pueden visualizar las señales obtenidas una vez realizada la corrección correspondiente al desapuntamiento. Las ventanas para las que se ha realizado dicho proceso tienen una duración de 3, 5 y 7 días.

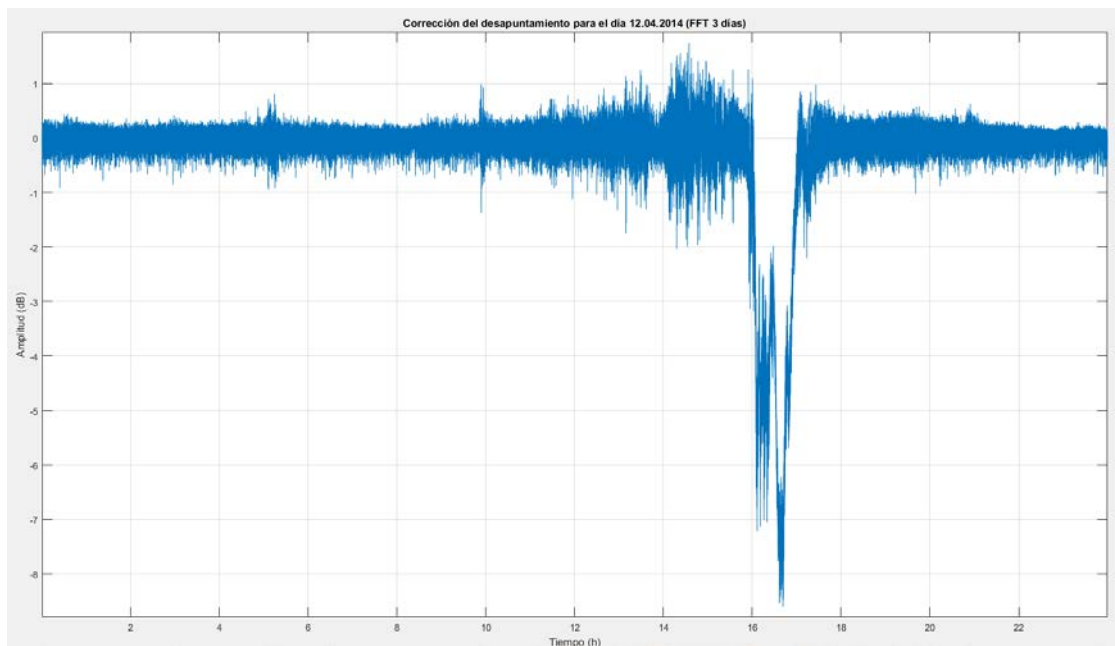


Figura 3.3.4 Corrección del desapuntamiento para el día 12.04.2014 mediante la utilización de una FFT para una ventana de 3 días.

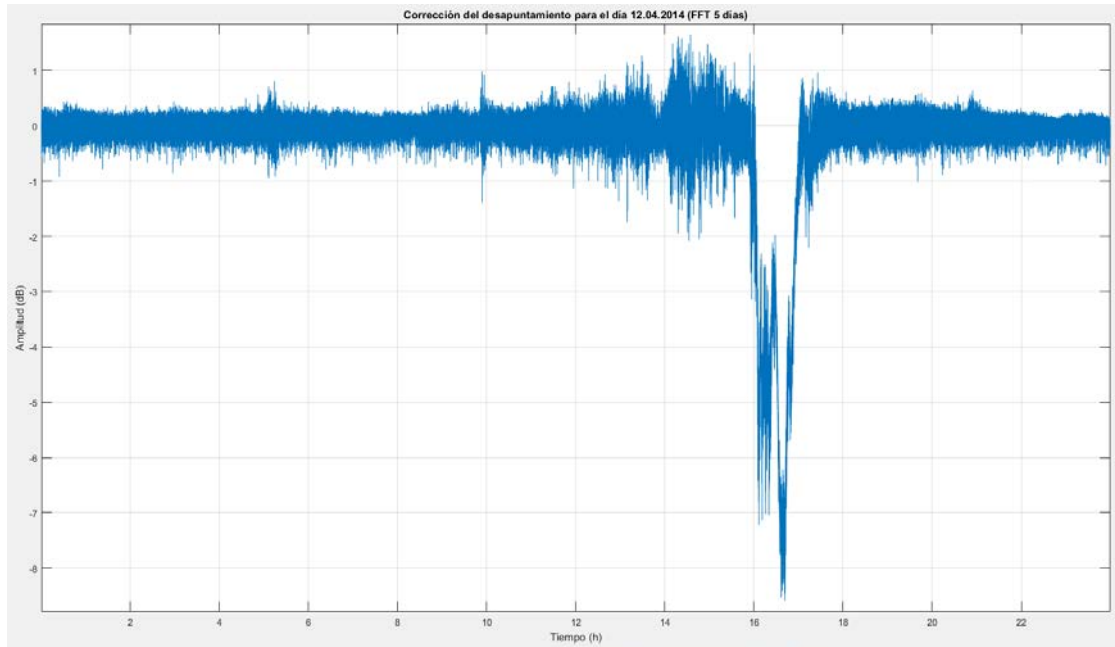


Figura 3.3.5 Corrección del desapuntamiento para el día 12.04.2014 mediante la utilización de una FFT para una ventana de 5 días.

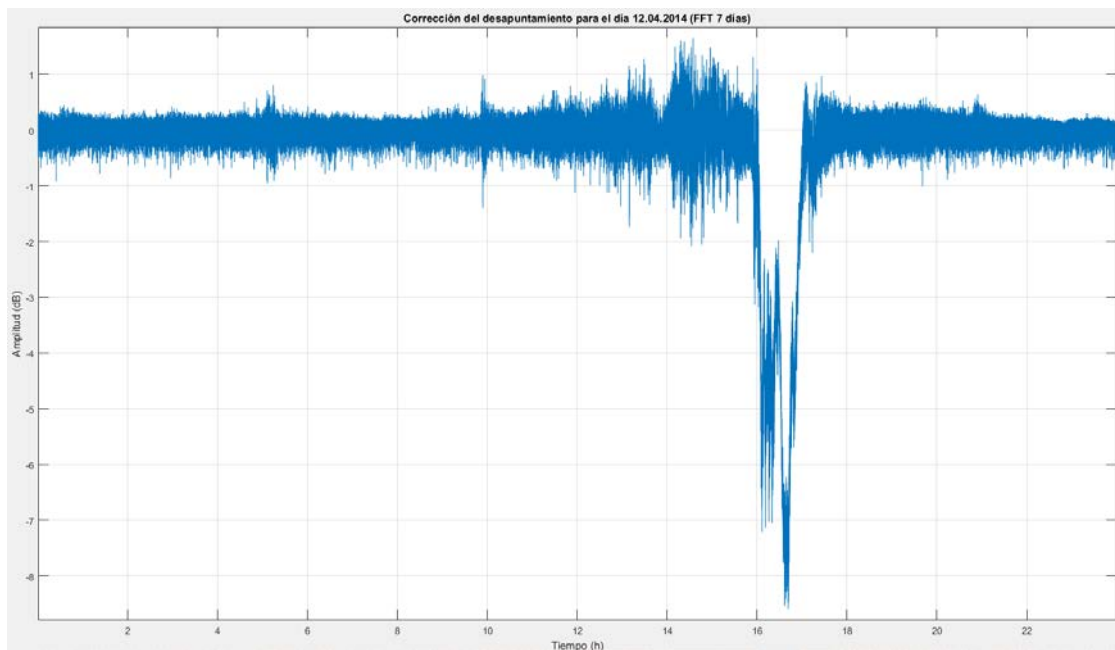


Figura 3.3.6 Corrección del desapuntamiento para el día 12.04.2014 mediante la utilización de una FFT para una ventana de 7 días.

Al igual que ocurría con el evento sin desvanecimientos presentado en el capítulo 3.3.1, los resultados para las diversas ventanas son muy similares, aunque los días que se han utilizado para cada una hayan tenido que ser tratados de forma individual por la falta de datos o la presencia de una atenuación elevada.

3.3.3. Día 19.06.2014. Evento lluvioso con variaciones de nivel en las horas previas, posiblemente causadas por nubes

El único día que presenta algún tipo de efecto es el que contiene el evento lluvioso con variaciones de nivel causadas por nubes. El resto de días involucrados no presentan ningún tipo de evento, se comportaría como días sin desvanecimientos lo cual facilita mucho la implementación de la FFT debido a que no hace necesario el tratamiento de los mismos.

Los eventos presentes en el día de la Figura 3.1.3 serán tratados al igual que el evento lluvioso llevando a cabo los pasos establecidos en el apartado 3.3.2.

Los resultados obtenidos, una vez que se ha corregido el desapuntamiento, para cada una de las ventanas de duración 3, 5 y 7 días respectivamente, se pueden visualizar a continuación.

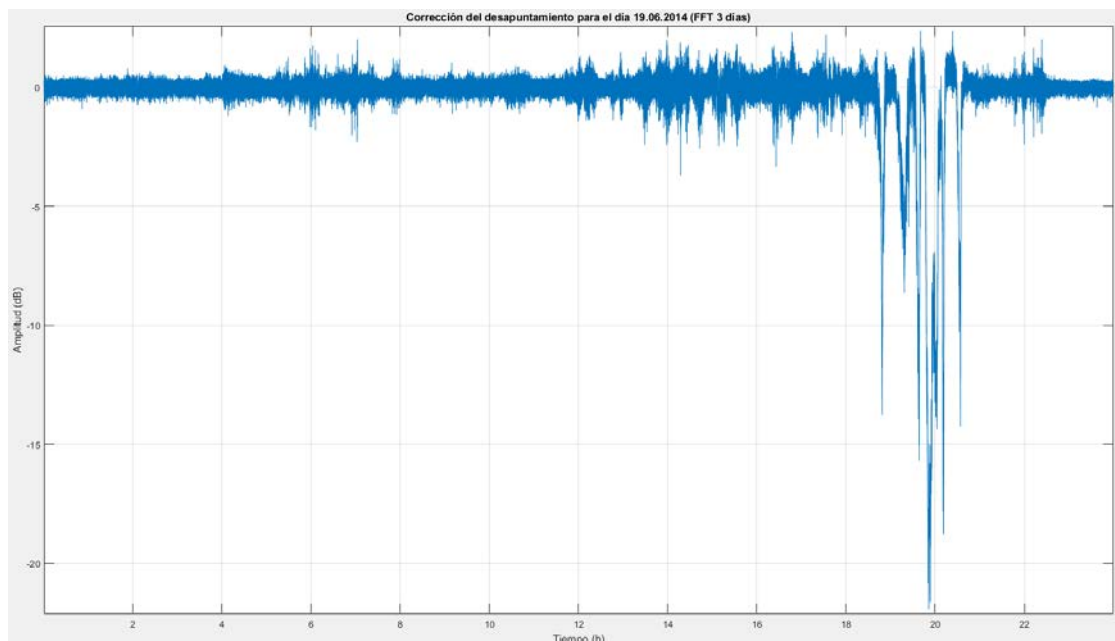


Figura 3.3.7 Corrección del desapuntamiento para el día 19.06.2014 mediante la utilización de una FFT para una ventana de 3 días.

Experimento de propagación en banda Q con Alphasat: Técnicas para la compensación del desapuntamiento

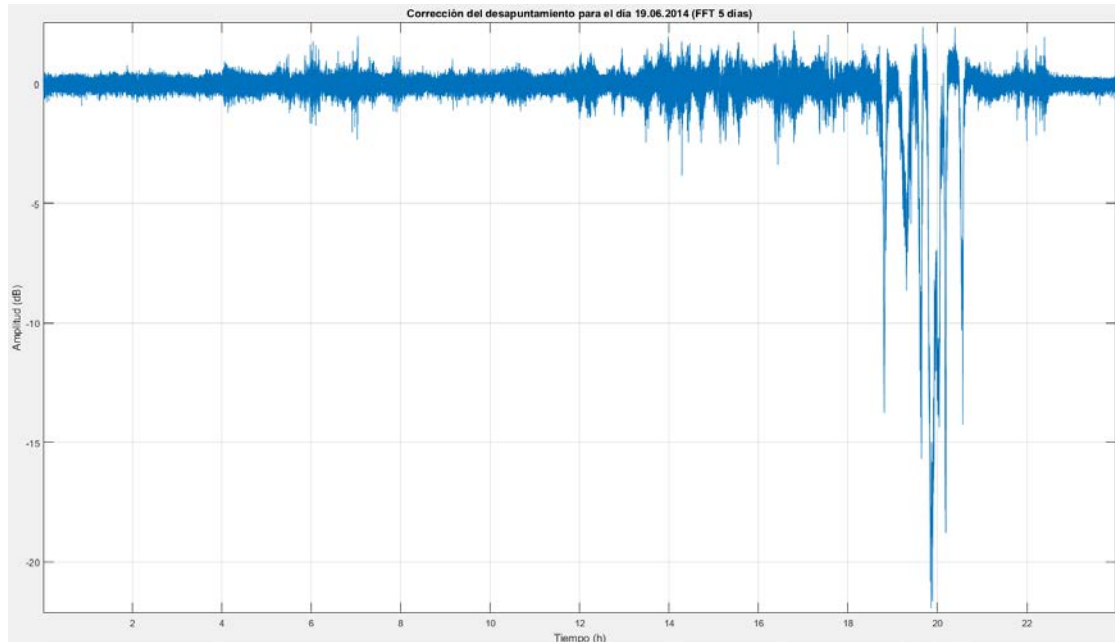


Figura 3.3.8 Corrección del desapuntamiento para el día 19.06.2014 mediante la utilización de una FFT para una ventana de 5 días.

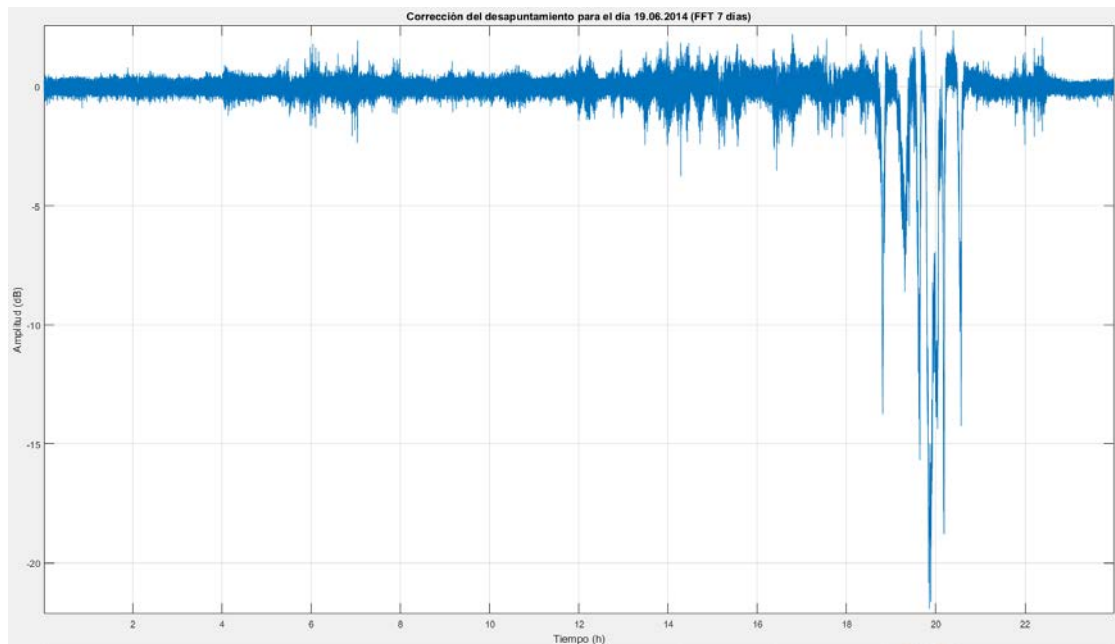


Figura 3.3.9 Corrección del desapuntamiento para el día 19.06.2014 mediante la utilización de una FFT para una ventana de 7 días.

Los datos obtenidos para las diversas ventanas de la FFT son análogos diferenciándose en el tiempo de ejecución, siendo menor el de menor tamaño de ventana.

3.3.4. Día 07.05.2014. Huecos en la medida de la señal

El evento característico de este día es la falta de medidas durante un periodo de tiempo de unas horas. Tal y como se ha ido comentando a lo largo de este capítulo, debido a que la FFT únicamente puede aplicarse a datos cuyo tiempo de resolución sea uniforme, para el día intermedio, que es el único que presenta una anomalía, habrá que tratarlo con anterioridad para poder llevar a cabo la implementación de la FFT. Para ello realizamos la interpolación de las muestras no existentes y corregimos el desapuntamiento. Posteriormente eliminamos las muestras interpoladas, ya que no disponíamos esos datos en un principio (valor de las muestras interpoladas a NaN).

Se puede visualizar en las siguientes figuras la señal, una vez aplicada la corrección del desapuntamiento, además de la eliminación de las muestras interpoladas, por lo que podremos observar el resultado final para longitudes de ventana de duración 3, 5 y 7 días respectivamente.

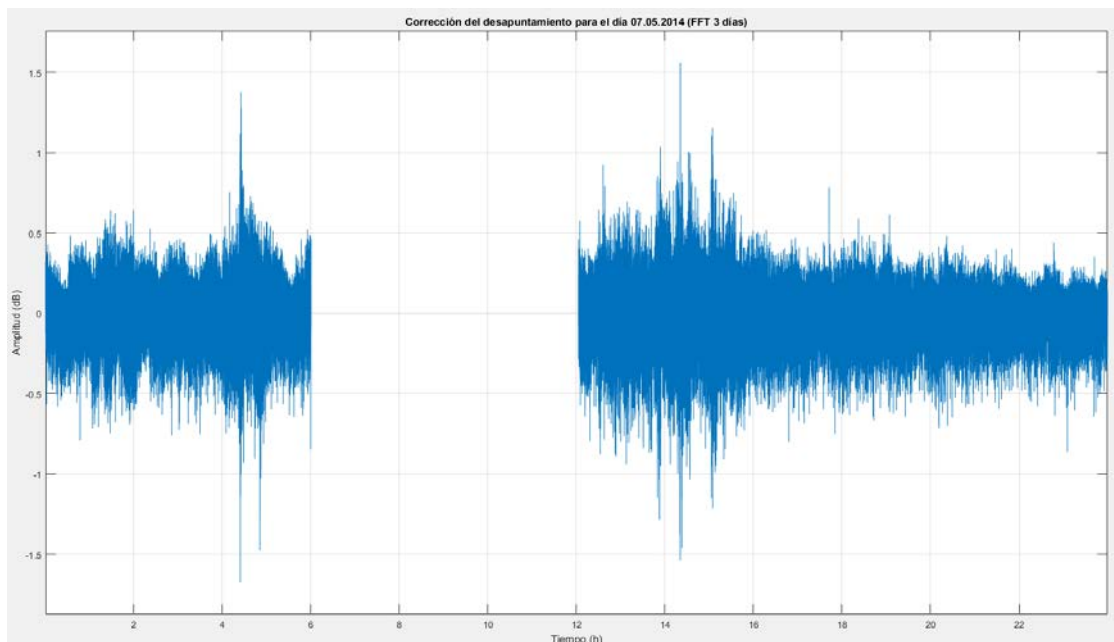


Figura 3.3.X Corrección del desapuntamiento para el día 07.05.2014 mediante la utilización de una FFT para una ventana de 3 días.

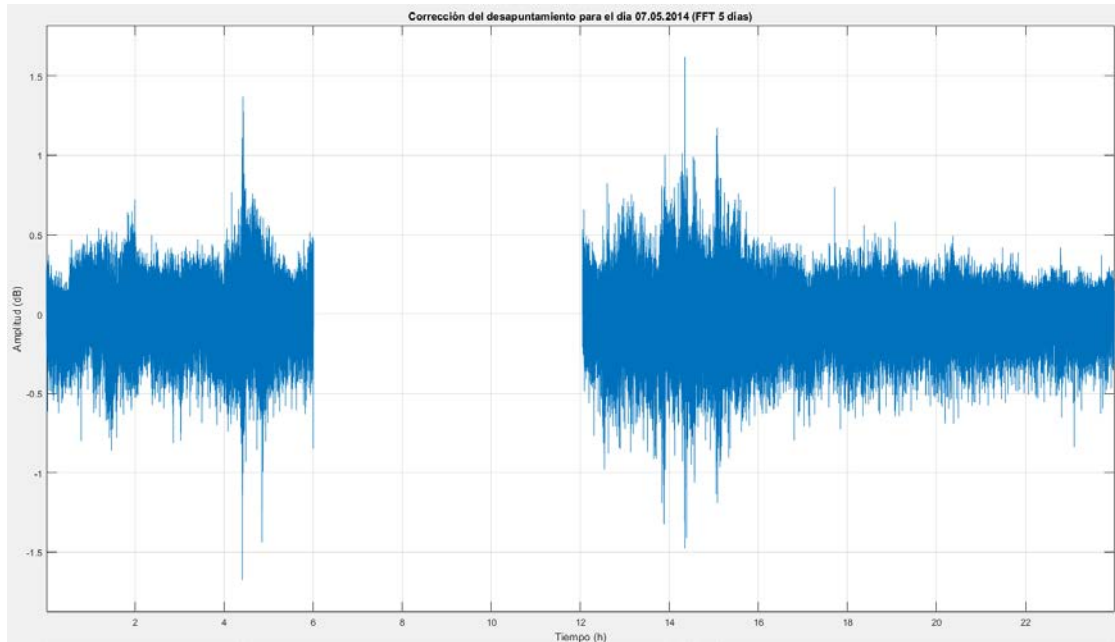


Figura 3.3.X Corrección del desapuntamiento para el día 07.05.2014 mediante la utilización de una FFT para una ventana de 5 días.

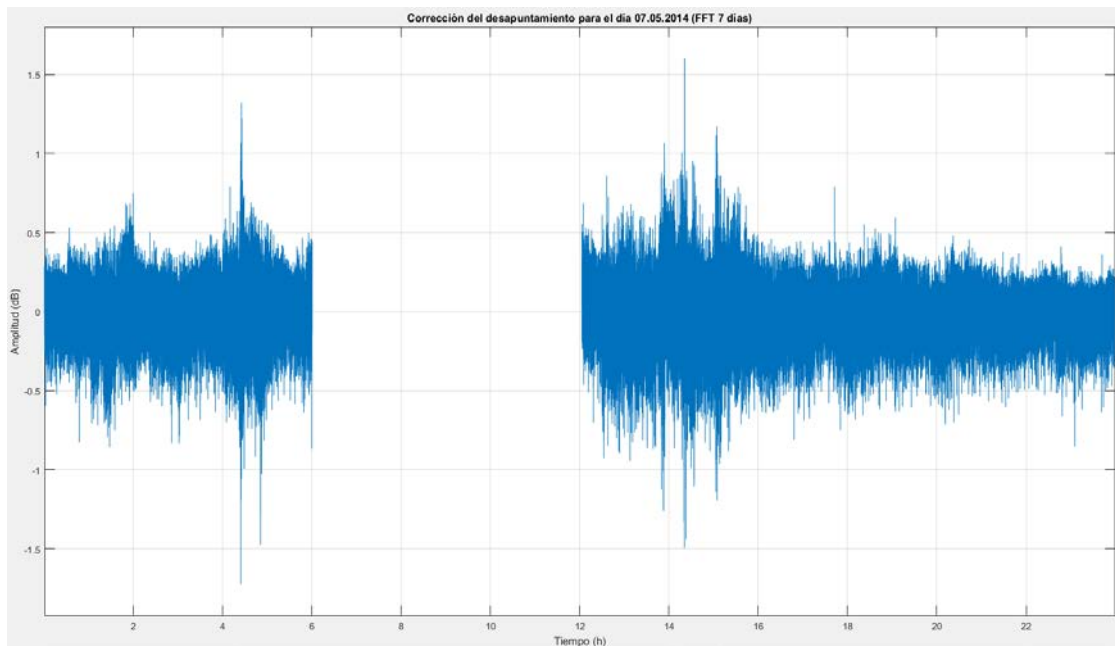


Figura 3.3.X Corrección del desapuntamiento para el día 07.05.2014 mediante la utilización de una FFT para una ventana de 7 días.

Todas las ventanas dan lugar a resultados similares como se venía observando a lo largo del desarrollo del capítulo, siendo la única diferencia el tiempo de ejecución llevado a cabo por la FFT.

4. Conclusiones

El objetivo del presente Trabajo fin de Grado era compensar el desapuntamiento surgido durante los primeros meses del desarrollo del experimento *Alphasat propagation experiment by measuring the copolar level of the Q-Band beacon at 39.4 GHz*, mediante la utilización de dos técnicas diferentes:

- Media móvil
- FFT

Ambas técnicas han sido aplicadas para el tratamiento digital de señales procedentes de las medidas que se han obtenido durante el período de tiempo correspondiente entre el 1 de abril de 2014 y el 9 de septiembre de ese mismo año.

Tras lo planteado en este escrito, y en concordancia con los resultados obtenidos, las conclusiones finales son:

Tal y como hemos podido ir viendo a lo largo del documento todos los casos que se han planteado han logrado realizarse con éxito, lo que implica que ambas técnicas son útiles para compensar el desapuntamiento producido por desplazamientos relativos en azimut y elevación debido a un apuntamiento fijo.

Al ir avanzando por los capítulos 3.2 y 3.3 se ha ido observando que a mayor duración de la ventana no se obtienen resultados mejores, aunque el número de muestras tenidas en cuenta para llevar a cabo la implementación de las mismas haya aumentado en tanto en cuanto aumenta la duración de las ventanas.

Si comparamos los resultados obtenidos tras llevar a cabo la corrección del desapuntamiento mediante la utilización de la media móvil y de la FFT observamos que estos son idénticos, lo que ratifica que los datos han sido obtenidos correctamente.

La gran diferencia radica en:

- La metodología utilizada para llevar a cabo cada técnica, aunque se basa en la misma idea se llevan a cabo de diferente manera.
- El tiempo de procesado de los datos para calcular la corrección del desapuntamiento es mucho mayor en la media móvil.

Ambos métodos son válidos, siendo el de la FFT el que presenta cierta ventaja en cuanto a tiempo de ejecución.

5. Bibliografía

- [1] COST Action IC0802, “Handbook of Microwave Propagation Measurements for Satellite and Terrestrial Links”, 2013.
- [2] José M. Riera, Gustavo A. Siles, Pedro García-del-Pino, Ana Benarroch, “Alphasat Propagation Experiment in Madrid: Quality Assessment of the Measurements”, EuCAP 2015.
- [3] “Mathworks, MATLAB Documentation Center”, 2015, Disponible online: <http://www.mathworks.com/help/matlab/>
- [4] John G. Proakis, Dimitris G. Manolakis, Tratamiento Digital de Señales, Ed.: Prentice Hall
- [5] “ESA, ALPHASAT Telecommunications & Integrated Applications”, Disponible online: <http://www.esa.int/alphasat>
- [6] “ALPHASAT Fact Sheet”, 2013, Disponible online: http://esamultimedia.esa.int/docs/technology/Alphasat_factsheet.pdf
- [7] ALPHASAT Información general, 2013, Disponible online: <http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/BR-311/offline/download.pdf>
- [8] ALPHABUS, Wikipedia, Disponible online: <https://en.wikipedia.org/wiki/Alphabus>
- [9] Órbita geosíncrona, Wikipedia, Disponible online: https://en.wikipedia.org/wiki/Geosynchronous_orbit
- [10] Día sideral, Wikipedia, Disponible online: https://en.wikipedia.org/wiki/Sidereal_time
- [11] Analema, Wikipedia, Disponible online: <https://es.wikipedia.org/wiki/Analema>

[12] UIT-R, Recomendación P.676-10, Atenuación debida a los gases atmosféricos, 2013

[13] Augusto Marziani, Fernando Consalvi, Simone Chicarella, Elio Restuccia, Luigi Amaduzzi, Frank S. Marzano “AlphaSat Ka-band and Q-band Receiving Station in Rome: development, status and measurements”, EuCAP 2015.

[14] UIT-R, Recomendación P.840-6, Atenuación debida a las nubes y a la niebla, 2013