



Caracterización de la dispersión temporal del canal radio en la banda de milimétricas en un escenario de laboratorio

Víctor Mira Juan

Tutor: Lorenzo Rubio Arjona

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2017-18

Valencia, 11 de septiembre de 2018



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TELECOM ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN



Agradecimientos

Este trabajo va dedicado a todas aquellas personas que han estado a mi lado a lo largo de todos estos años, sin ellos no habría sido posible todo esto. En especial agradecer a mi familia y a mi novia Celia, por todo el ánimo que me han dado y todos los momentos duros que me han ayudado a superar.

También me gustaría agradecer al director de este trabajo D. Lorenzo Rubio Arjona por la dedicación y paciencia invertidas en mí en este último año.

Gracias a todos de corazón.



Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se ha analizado el efecto dispersivo del canal radio en un entorno de laboratorio en la banda de 25 a 40 GHz. Los resultados se han particularizado para las bandas de 28 y 37 GHz, donde previsiblemente se desplegarán los futuros sistemas 5G de alta capacidad y velocidad de transmisión. Se ha escogido este entorno por su fácil accesibilidad para la adquisición de las medidas y por ser un escenario fuertemente dispersivo debido a la presencia de numerosos elementos reflectantes a esas frecuencias. Se ha analizado el efecto dispersivo en términos de delay spread y ancho de banda de coherencia.

Resum

En este Treball Fi de Grau s'ha analitzat l'efecte dispersiu del canal ràdio en un entorn de laboratori en la banda de 25 a 40 GHz. Els resultats s'han particularitzat per a les bandes de 28 i 37 GHz, on previsiblement es desplegaran els futurs sistemes 5G d'alta capacitat i velocitat de transmissió. S'ha triat este entorn per la seua fàcil accessibilitat per a l'adquisició de les mesures i per ser un escenari fortament dispersiu a causa de la presència de nombrosos elements reflectors a eixes freqüències. S'ha analitzat l'efecte dispersiu en termes de delay spread i amplada de banda de coherència.

Abstract

In this Final Degree Project, it has been analyzed the dispersive effect of the radio channel in a laboratory environment in the 25 to 40 GHz band. The results have been particularized for the 28 and 37 GHz bands where future systems will be expected to be deployed 5G high capacity and transmission speed. This environment has been chosen for its easy accessibility for the acquisition of measurements and for being a highly dispersive scenario due to the presence of large reflective elements at these frequencies. The dispersive effect has been analyzed in terms of delay spread and coherence bandwidth.



ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción y motivación	5
1.1 Introducción	5
1.2 Motivación y objetivos.....	6
1.3 Organización del trabajo.....	6
Capítulo 2. Metodología.....	7
2.1 Realización del trabajo	7
2.2 Organización de tareas	7
2.3 Diagrama temporal de tareas	8
Capítulo 3. Campaña de medidas	9
3.1 Introducción	9
3.2 Organización de la campaña de medidas	10
3.3 Materiales utilizados y conexión de equipos	13
Capítulo 4. Resultados	16
4.1 <i>Power Delay Profile</i>	16
4.2 <i>Delay Spread</i>	18
4.3 Ancho de banda de coherencia	32
Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras	43
5.1 Conclusiones	43
5.2 Líneas futuras	44
Bibliografía	45



Índice de Figuras

- 3.1 Efecto multicamino.
- 3.2 Distribución de las antenas transmisora y receptora en el laboratorio.
- 3.3 Posición 1.
- 3.4 Posición 2.
- 3.5 Posición 3.
- 3.6 Montaje equipo de medidas.
- 4.1 PDP normalizado para posición 1 LOS.
- 4.2 PDP normalizado para posición 2 NLOS.
- 4.3 Cálculo del Delay Spread a partir de una representación del Power Delay Profile.
- 4.4 Delay Spread para 28 GHz (LOS y NLOS).
- 4.5 Delay Spread para 37 GHz (LOS y NLOS).
- 4.6 Delay Spread en función de la distancia a 28 GHz (LOS y NLOS).
- 4.7 Delay Spread en función de la distancia a 37 GHz (LOS y NLOS).
- 4.8 Representación Delay Spread Forma 2 para NLOS.
- 4.9 Representación Delay Spread Forma 2 para LOS.
- 4.10 Comparativa Delay Spread y TH Posición 2 (NLOS).
- 4.11 Comparativa Delay Spread y TH Posición 4 (LOS).
- 4.12 Delay Spread con un SPAN de 1 GHz.
- 4.13 Delay Spread con un SPAN de 2 GHz.
- 4.14 Delay Spread con un SPAN de 3 GHz.
- 4.15 Delay Spread para posición 1 en distancia.
- 4.16 Delay Spread para posición 1 en frecuencia.
- 4.17 Delay Spread para posición 2 y diferentes SPAN.
- 4.18 Delay Spread para posición 5 y diferentes SPAN.
- 4.19 Cálculo de Ancho de banda de coherencia.
- 4.20 Ancho de Banda Coherencia forma 1 para 28 GHz en la posición 1.
- 4.21 Ancho de Banda Coherencia forma 1 para 25 GHz a 40 GHz en la posición 1.
- 4.22 Ancho de Banda Coherencia forma 1 para 28 GHz en la posición 2.
- 4.23 Ancho de Banda Coherencia forma 1 para 25 GHz a 40 GHz en la posición 2.
- 4.24 Ancho de Banda de Coherencia para posición 4 con coeficiente de correlación del 70%.
- 4.25 Ancho de Banda de coherencia para 25 GHz a 40 GHz con coeficiente de correlación del 70%.
- 4.26 Ancho de Banda de coherencia para 25 GHz a 40 GHz con coeficiente de correlación del 90%.
- 4.27 Ancho de Banda de coherencia para 28 GHz con coeficiente de correlación del 70%.



- 4.28 Ancho de Banda de coherencia para 28 GHz con coeficiente de correlación del 90%.
- 4.29 Ancho de Banda de coherencia para 37 GHz con coeficiente de correlación del 70%.
- 4.30 Ancho de Banda de coherencia para 37 GHz con coeficiente de correlación del 90%.



Índice de Tablas

2.1 Distribución temporal de las tareas.

3.1 Distancias de las posiciones medidas.

4.1 Valores de Delay Spread para 28 GHz.

4.2 Valores de Delay Spread para 37 GHz.

4.3 Valores de Delay Spread para NLOS.

4.4 Valores de Delay Spread para LOS.

4.5 Valores de Threshold en dB para LOS y NLOS, en 28 GHz y 37 GHz.

4.6 Ancho de Banda de Coherencia para posición 4 con correlación del 70% en 28 GHz.

4.7 Valores de Ancho de Banda de Coherencia para 25 GHz a 40 GHz.

4.8 Valores de Ancho de Banda de Coherencia para 28 GHz.

4.9 Valores de Ancho de Banda de Coherencia para 37 GHz.



Capítulo 1

Introducción y motivación

1.1 Introducción

La creciente demanda de velocidad y datos en la sociedad ha creado la necesidad de buscar redes que puedan absorber la gran cantidad de tráfico que generan. Hoy en día, se está disfrutando de redes 4G/LTE Advance, pero se llegará a un punto en el cual estas redes estén limitadas y por lo tanto queden obsoletas. Es por ello por lo que se buscan soluciones más a largo plazo y se empieza a pensar en redes 5G. [1] Estas redes pretenden mejorar la tasa de datos hasta los 10 Gbps en comparación a 1 Gbps que es lo que se dispone actualmente, además de disfrutar de otras ventajas como es el aumento de hasta 100 dispositivos que pueden estar conectados por unidad de área, latencias de 1 ms o la disminución del uso de energía de la red en un 90% para favorecer una eficiencia energética.

Dada la limitación del espectro radioeléctrico, es necesario explorar nuevas bandas de frecuencia que permitan desarrollar este tipo de redes 5G. Es por ello que surge la necesidad de alojar estas redes en bandas que no estén destinadas a otros usos. Es donde entra en juego las bandas de milimétricas (banda EHF, *Extremly High Frequency*). Estas bandas de frecuencia abarcan desde 30 GHz hasta 300 GHz, que a diferencia de las bandas que se están utilizando en la actualidad (bandas por debajo de 6 GHz), ofrecen mayores rangos de frecuencias, lo que permite la utilización de mayores anchos de banda. Este tipo de banda ofrece, además, una longitud de onda de 1 a 10 mm, lo que significa que el tamaño de las antenas será todavía más pequeño del que se utiliza a día de hoy y como consecuencia de esto, se pueden conseguir, de manera más sencilla, agrupaciones de antenas destinadas a la telefonía móvil. La adaptación a estas redes no es inmediata, ya que la tecnología 4G todavía se está amortizando por parte de los operadores, al tener poco tiempo de uso en el mercado. No obstante, la tecnología avanza a pasos agigantados y para cuando llegue la creciente demanda de anchos de banda se tiene que disponer de una solución eficaz y fiable para poder hacerle frente.



1.2 Motivación y objetivos

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado es el de estudiar el comportamiento que se produce en un escenario de operación altamente dispersivo, es decir, con multitud de reflexiones. Para redes 5G se contemplan otros escenarios de operación, tanto exterior como interior. Este trabajo analizará el escenario interior, sin tener en cuenta el efecto del movimiento de las antenas, tan solo el efecto multicamino de la señal. Para ello se realizará la caracterización de la dispersión temporal tanto en la parte de la banda de milimétricas, comentada con anterioridad, como en la banda de SHF (de 3 GHz a 30 GHz), puesto que se analizará el espectro en el rango de frecuencias de 25 GHz a 40 GHz. Principalmente se obtendrá la caracterización en la banda de 28 GHz y 37 GHz, [2] ya que en la Conferencia de Radiocomunicaciones se definieron las bandas de 24.25-27.5 GHz y 37-40.5 GHz, como las bandas donde se desarrollarán previsiblemente los sistemas 5G. Aunque será en 2019 cuando se decida que bandas se van a usar para estos sistemas.

La caracterización temporal se realizará con ayuda de diferentes medidas del Power Delay Profile (PDP) o Perfil de Retardo de Potencia dentro de un ambiente de laboratorio, mediante una antena en transmisión colocada en distintos puntos del laboratorio, y otra en recepción, la cual recoge las medidas, situada en una mesa de posiciones.

Por último, se procesarán las medidas realizadas en MATLAB y a partir de ahí se obtendrán una serie de conclusiones que ayudarán a comprender mejor el comportamiento que tendrán las futuras redes de 5G.

1.3 Organización del trabajo

La organización del trabajo está distribuida en diferentes capítulos y secciones, tal y como se muestra a continuación:

- Capítulo 2: en este capítulo se habla de la metodología empleada para la realización de este trabajo, así como de las diferentes tareas y estructuración temporal llevadas a cabo.
- Capítulo 3: se recoge la organización de las medidas realizadas, además de describir los diferentes materiales y equipos empleados para la realización de las medidas.
- Capítulo 4: en este capítulo se explican los parámetros necesarios para la caracterización de la señal y se muestran los resultados obtenidos, analizando el comportamiento de los mismos.
- Capítulo 5: se reúnen las conclusiones a las cuales se han llegado tras analizar las medidas. Además, se presentarán unas líneas futuras, como continuación de este trabajo.



Capítulo 2

Metodología

2.1 Realización del trabajo

Dicho trabajo se divide en tres partes. En primer lugar, se organizó de la campaña de medidas, realizando la conexión de equipos a utilizar, así como de las antenas de transmisión y recepción en las diferentes posiciones.

En segundo lugar, se analizaron los datos recogidos en las medidas mediante MATLAB, para calcular los parámetros que caracterizan la señal. En esta parte, se realizó una búsqueda de información sobre el cálculo del *Power Delay Profile*, *Delay Spread* y Ancho de Banda de Coherencia.

Por último, se modificaron los algoritmos implementados, que se usaron en el cálculo de los parámetros que caracterizan la señal, para obtener datos y figuras que se centrasen en las bandas de frecuencia que resultan de interés. Acto seguido, se procedió a analizar los diferentes comportamientos que se producían y se llegó a las conclusiones recogidas en este trabajo.

2.2 Organización de tareas

Dicho trabajo se estructura en:

1. Búsqueda de artículos correspondientes a 5G y parámetros que caracterizan la señal, como son: el *Power Delay Profile*, *Delay Spread* y Ancho de Banda de Coherencia.
2. Estudio del ámbito del canal radio, para ello se argumentará mediante una búsqueda bibliográfica, que ayude a comprender mejor cuales son los factores que degradan la señal.
3. Realización de campaña de medidas para así obtener los datos que luego serán procesados.



4. Implementación del algoritmo para procesar los datos obtenidos en la campaña de medidas y así extraer los parámetros de Delay Spread y Ancho de Banda de Coherencia a partir del PDP.
5. Análisis de resultados.
6. Redacción de la memoria.

2.3 Diagrama temporal de las tareas

Las tareas que se comentaron con anterioridad se distribuyen de la siguiente manera:

Tarea	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
1	X X X						
2	X			X X			
3		X X X					
4			X X	X X	X X		
5					XXX	XX	
6				X X	X X X	X X	X X X

Tabla 2.1: Distribución temporal de las tareas.

Capítulo 3

Campaña de medidas

3.1 Introducción.

El entorno por el cual se transmite toda la información radio que va desde una antena transmisora hasta una receptora, se ve afectado por la variabilidad del trayecto, lo que provoca la degradación de la señal original. Estos cambios en el entorno son provocados principalmente por dos motivos que se describen a continuación.

En primer lugar, el efecto multicamino o multitrayectoria, el cual se podría definir como la dispersión de la señal en numerosos ecos descoordinados que llegan a la antena receptora mediante señales retardadas. Este tipo de efecto provoca variaciones en los tiempos de llegada de la señal, lo que se traduce en tener la misma señal replicada un determinado número de veces. Por lo tanto, como consecuencia de esto se produce una dispersión temporal, lo que genera selectividad en frecuencia.

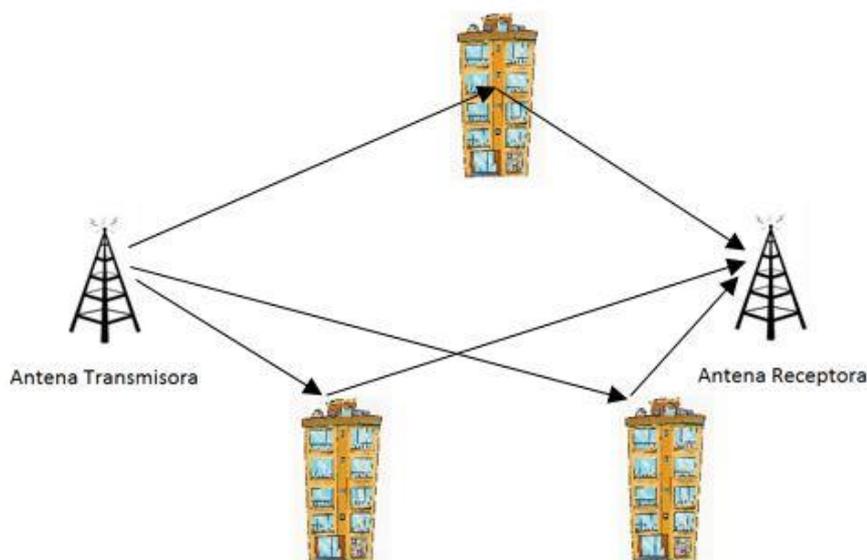


Figura. 3.1 Efecto multicamino.

En segundo lugar, se encuentra el *efecto Doppler* producido por la movilidad de la antena transmisora o receptora, lo que genera una separación en frecuencia de las diferentes señales recibidas o lo que es lo mismo, una dispersión en frecuencia. Dicha dispersión en frecuencia proporciona a su vez una selectividad temporal causada por los cambios de fase.

En este proyecto se hablará principalmente del efecto multicamino ya que a la hora de realizar las mediciones no ha habido ningún tipo de movimiento, pues las medidas se realizaron en el laboratorio del iTEAM a puerta cerrada.

3.2 Organización de la campaña de medidas.

En la campaña de medidas se realizaron un total de 6 mediciones en 6 puntos diferentes del laboratorio, con diferentes distancias además de tener visión directa y no visión directa, tal y como se puede apreciar en la Figura 3.2. En cada una de las posiciones se ha colocado la antena transmisora a determinadas distancias de la antena receptora.

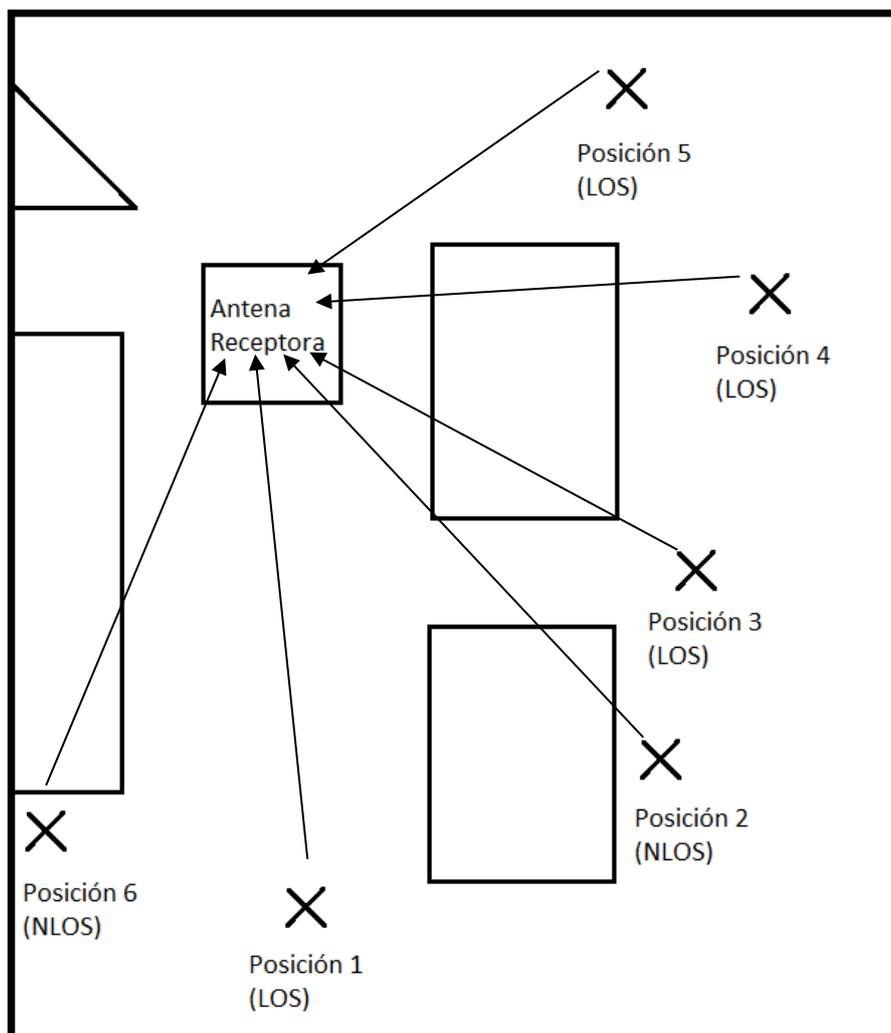


Figura. 3.2 Distribución de las antenas transmisora y receptora en el laboratorio



La antena receptora se ubica en una mesa de posiciones compuesta por dos motores que permiten el movimiento tanto en horizontal como en vertical de esta. Estos movimientos son de gran utilidad para poder posicionar la antena receptora en 49 posiciones distintas a lo largo de la mesa de posiciones, lo que se traduce en una distribución 7x7 en la cual, cada posición adoptada por la antena tiene una separación de 3.04 mm con respecto a la anterior posición.

La duración de cada medida fue de 1 hora y 15 minutos, con un margen de 5 minutos entre cada medida para colocar la antena transmisora en las posiciones descritas con anterioridad.

Las distancias fueron tomadas por un medidor láser desde la antena transmisora hasta la receptora y viceversa. Cada una de las posiciones descritas son recogidas en la Tabla 3.1:

Posición 1	7.73 m
Posición 2	7.78 m
Posición 3	5.61 m
Posición 4	4.36 m
Posición 5	4.91 m
Posición 6	4.75 m

Tabla 3.1. Distancias de las posiciones medidas.

Las posiciones 1, 3, 4 y 5 se corresponden con condiciones LOS (visión directa o Line of Sight). En donde existe un trayecto dominante sobre el resto de trayectorias, o lo que es lo mismo, la señal recibida en la antena Rx tendrá una contribución dominante sobre las demás contribuciones causadas por el efecto multicamino.

En cuanto a las posiciones 2 y 6, se corresponden con condiciones NLOS (sin visión directa o Non Line of Sight), en la cual no existe un trayecto libre entre antena Tx y Rx, es decir, hay obstáculos entre ambas antenas que impide la visión directa. Por lo que las contribuciones de todos los trayectos que llegan a la antena Rx tendrán la misma importancia, a diferencia de lo que ocurría con LOS.

A modo de ejemplo se adjuntan varios posicionamientos de la antena transmisora con y sin visión directa hacia la antena receptora:

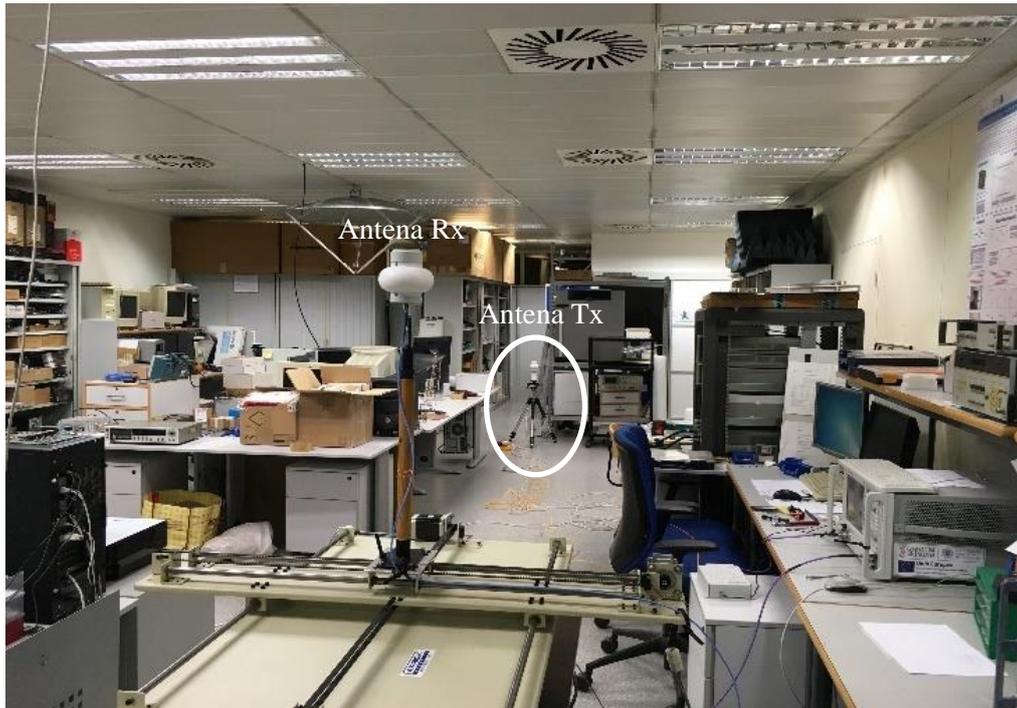


Figura. 3.3 Posición 1 LOS (7.73 m).



Figura. 3.4 Posición 2 NLOS (7.78 m).



Figura. 3.5 Posición 3 LOS (5.61 m).

3.3 Materiales utilizados y conexión de equipos.

El material utilizado en la realización de las medidas fue:

- Analizador de redes vectorial (AVR).
- 2 antenas omnidireccionales con polarización vertical, tanto en transmisión como en recepción.
- 3 cables coaxiales para: la conexión del analizador con la antena receptora, el convertidor electro-óptico que va dirigido a la antena transmisora y la conexión del ordenador hacia el AVR.
- Convertidor eléctrico/óptico, para convertir la señal eléctrica en óptica que se transferirá por la fibra óptica.
- Un rollo de cable de fibra óptica conectado desde el convertidor electro/óptico hasta el convertidor óptico/eléctrico, que se conectará a la antena transmisora.
- Convertidor óptico/eléctrico, para convertir la señal óptica en eléctrica, para que esta última se dirigirá hacia la antena Rx.
- Ordenador para control de medidas.
- Mesa de posicionamiento de la antena receptora, que permite la movilidad de ésta en el plano XY.

La manera de conectar los materiales anteriores se puede apreciar en la siguiente imagen:

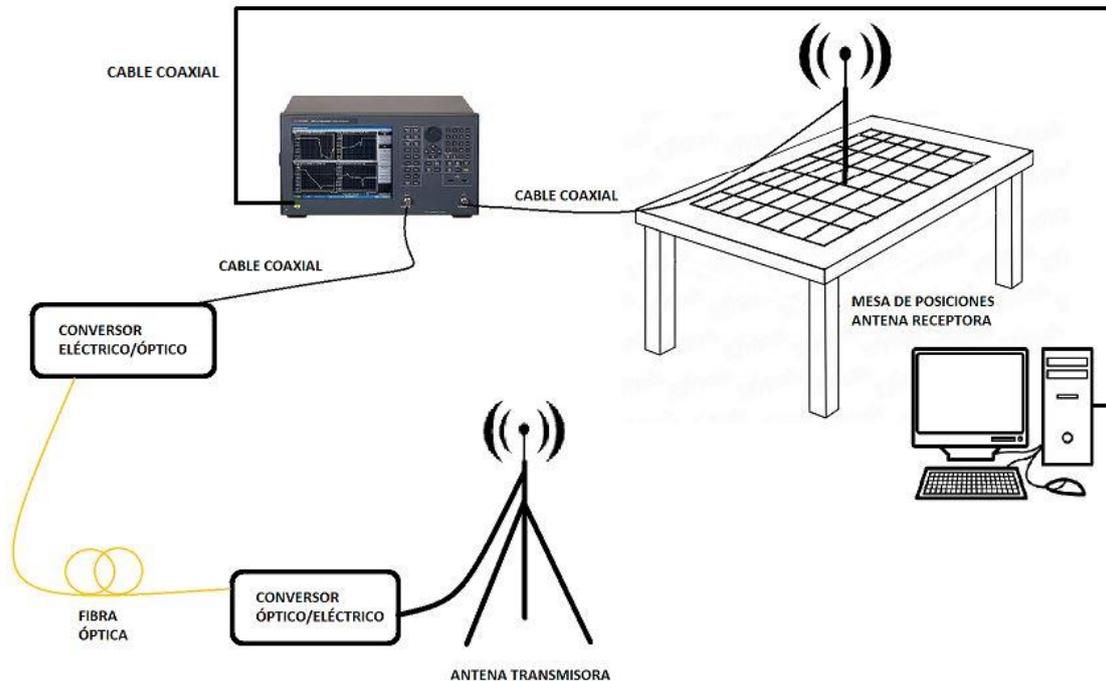


Figura. 3.6 Montaje equipo de medidas.

Como se puede apreciar la conexión se realizó de manera que al convertidor eléctrico/óptico le llega un cable coaxial del puerto 1 del AVR.

A la antena receptora se le conectó otro cable coaxial hasta el puerto 2 del AVR, además esta está situada en una mesa de posiciones contenida en el plano XY. De esta manera se puede conseguir una agrupación rectangular uniforme o uniform rectangular array (URA) 7x7, con 49 posiciones diferentes desde la antena transmisora hasta la receptora.

Con cada una de las posiciones establecidas para la antena en Rx y Tx, se estuvo midiendo los parámetros S_{21} , es decir, los parámetros de dispersión que se producen en la transmisión realizada entre las dos antenas. Los datos se almacenaron en un dispositivo pen drive conectado al AVR, para después poder trabajar con ellos.

Antes de empezar a medir se realizó una calibración de todos los elementos del sistema, salvo de las antenas, para que en el parámetro de dispersión S_{21} medido se tuviese en cuenta la respuesta del canal de propagación. Así pues, se realizó la medida en la banda de frecuencia de 25 GHz a 40 GHz, para después poder estudiar las bandas de 28 GHz y 37 GHz por separado.

La conexión entre convertidores se realizó mediante un cable de fibra óptica para evitar las posibles interferencias que se pudieran dar con otros aparatos que operaban en el laboratorio, ya que a frecuencias de milimétricas (mmWave) las pérdidas en los cables utilizados son mayores.



Por último, la función del ordenador que se dispone debajo de la mesa de posiciones, es la de controlar dicha mesa, es decir, posicionar la antena receptora en diferentes posiciones sobre la mesa, que en este caso sería de 49 posiciones distintas. Además, también le indica al AVR cuando tiene que realizar la medición, que es cuando la antena receptora se posiciona en el lugar previamente programado.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Power Delay Profile.

El *Power Delay Profile* (PDP) o perfil de retardo de potencia indica la intensidad de la señal recibida a través del canal radio afectado por el efecto multicamino. En la realización de la campaña de medidas se recogieron datos sobre la función de transferencia cronovariante $T(f, t)$, cuya variable t será de 1 hora y 15 minutos, que se corresponde con la duración de cada medida.

Esta función de transferencia cronovariante se define como la transformada de Fourier de la función de ensanchamiento a la entrada $h(t, \tau)$ respecto a la variable de retardos τ o respecto de la variable ν de máxima frecuencia Doppler como se puede observar a continuación:

$$T(f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f, \nu) e^{-i2\pi f\nu} d\nu \quad (4.1)$$

Como se puede comprobar en (4.1) la respuesta en frecuencia varía con el tiempo, en este caso no se produce variabilidad temporal ya que el canal es estacionario, por lo que se hablará en términos de $T(f)$.

El cálculo del *Power Delay Profile* se obtiene aplicando la función de autocorrelación a la función de ensanchamiento a la entrada $h(t, \tau)$:

$$PDP(\tau) = P_h(\tau_i) \triangleq E_t \{|h(t, \tau)|^2\} \quad (4.2)$$

Además, se puede definir también el PDP como la esperanza del módulo al cuadrado de la función de ensanchamiento a la entrada. Así pues, se obtiene un promedio de las potencias de los diferentes ecos recogidos por la antena receptora.

A modo de ejemplo se adjuntan dos gráficas correspondientes al PDP de la banda de 37 GHz para visión directa (LOS) y sin visión directa (NLOS):

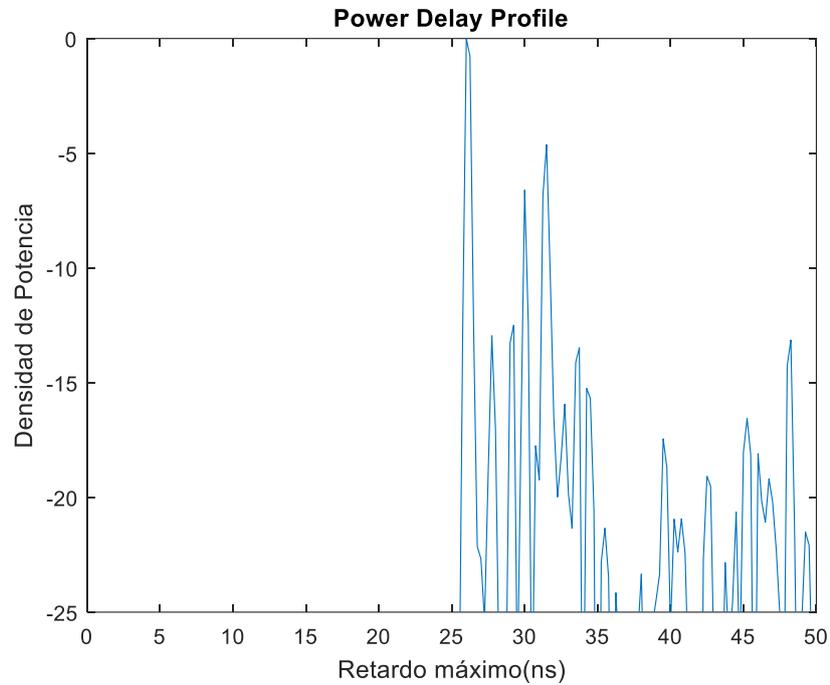


Figura. 4.1 PDP normalizado para posición 1 LOS.

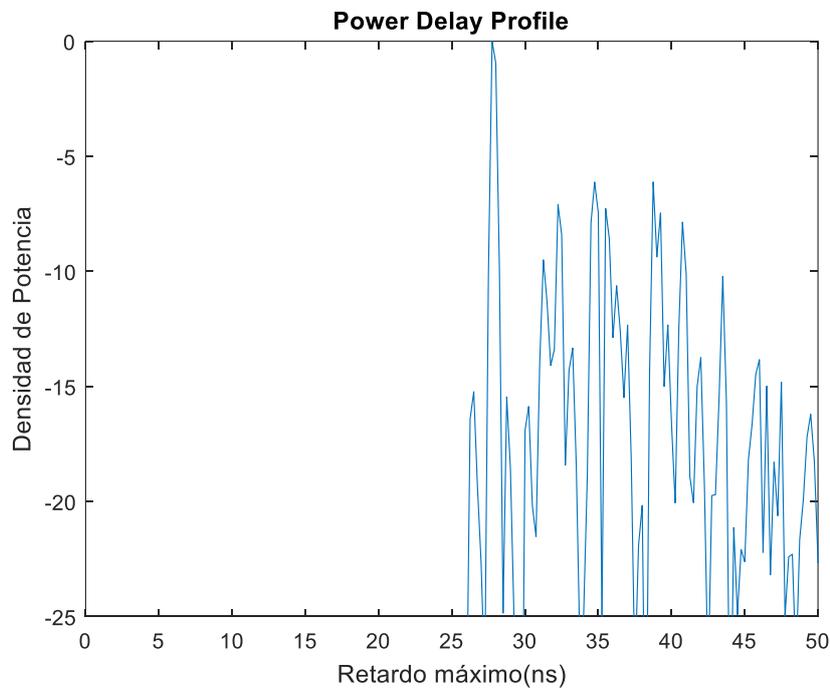


Figura. 4.2 PDP normalizado para posición 2 NLOS.

En ambas figuras se ha utilizado el enventanado Hanning al tener mejor resolución en frecuencia y se han representado para una sola posición de la antena receptora.

En la Figura 4.1 se puede comprobar como el primer pico es la primera contribución que llega a la antena receptora situada en la mesa de posiciones.

Además, se pueden apreciar unas contribuciones más reducidas en comparación a la primera, que se corresponden con contribuciones que rebotan con objetos del entorno y llegan con un determinado retardo. Es el denominado efecto multicamino del que se hablaba con anterioridad, en el cuál llegan diferentes picos de la señal transmitida con un determinado retardo temporal.

En cuanto a la Figura 4.2, se puede observar que a diferencia de LOS, la contribución inicial, que es la que llega primero a la antena receptora, es más pequeña que las contribuciones secundarias. Esto se debe a que la antena transmisora no está orientada con el máximo hacia la antena receptora por lo que se obtienen contribuciones secundarias de mayor densidad de potencia, al estar estas incrementadas por el máximo de la antena transmisora.

A partir del PDP se obtienen los parámetros que se describen a continuación.

4.2 Delay Spread.

El Delay Spread o ensanchamiento de retardo, describe la dispersión temporal que genera el canal, lo que puede llevar a provocar interferencia entre símbolos (IES), la cual se resuelve mediante mecanismos de equalización. El Delay Spread se obtiene de la siguiente forma:

$$\sigma_{\tau} = \tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^{+\infty} (\tau - \bar{\tau})^2 P_h(\tau) d\tau}{\int_0^{+\infty} P_h(\tau) d\tau}} = \{Caso Discreto\} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tau_i - \bar{\tau})^2 P_h(\tau_i)}{\sum_{i=1}^N P_h(\tau_i)}} \quad (4.3)$$

Donde N es el número de puntos medidos, τ es el eje de retardos de la señal y $\bar{\tau}$ es el retardo medio que se define de la siguiente manera:

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\infty} \tau P_h(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} P_h(\tau) d\tau} = \{Caso Discreto\} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i P_h(\tau_i)}{\sum_{i=1}^N P_h(\tau_i)} \quad (4.4)$$

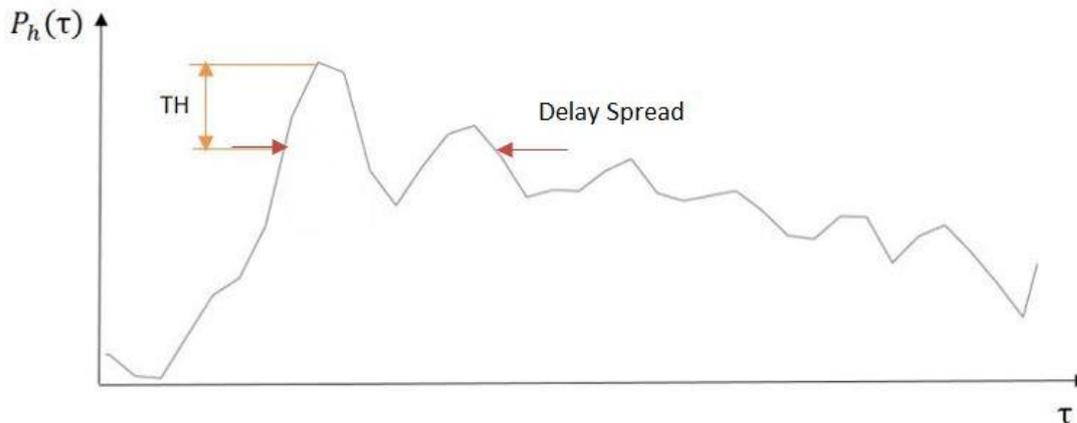


Figura. 4.3 Cálculo del Delay Spread a partir de una representación del *Power Delay Profile*.

Como se puede observar en la Figura 4.3, el Delay Spread da una idea de lo ancho que es el *Power Delay Profile*, por lo tanto, para las Figuras 4.1 y 4.2 citadas anteriormente se puede ver como para LOS, al ser la componente dominante más estrecha, la dispersión es menor y por lo tanto el valor de Delay Spread. Mientras que para NLOS, al tener componentes más anchas se tendrá una mayor dispersión y en consecuencia un valor mayor de Delay Spread.

Por otro lado, el Threshold (TH) es el nivel de señal de *Power Delay Profile* que se escoge para discriminar el ruido del canal, de la onda incidente en la antena receptora y el cual se mide en decibelios (dB), es decir, en potencia relativa.

A la hora de calcular el Delay Spread, se puede realizar mediante dos formas distintas.

Una primera forma sería, para cada valor de PDP, se obtendría un valor diferente de Delay Spread y por lo tanto 49 valores de Delay Spread para cada posición. A continuación, se puede observar la representación del Delay Spread en función de la distancia, para la banda de 28 GHz y 37 GHz:

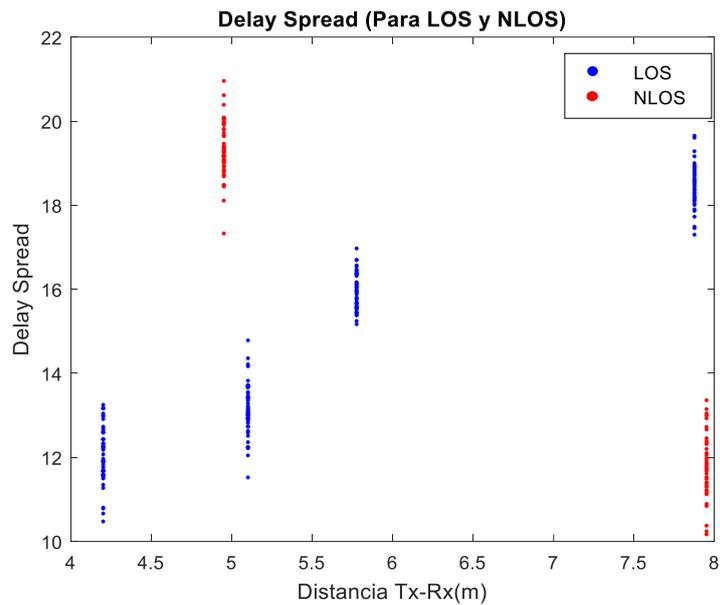


Figura. 4.4 Delay Spread para 28 GHz (LOS y NLOS).

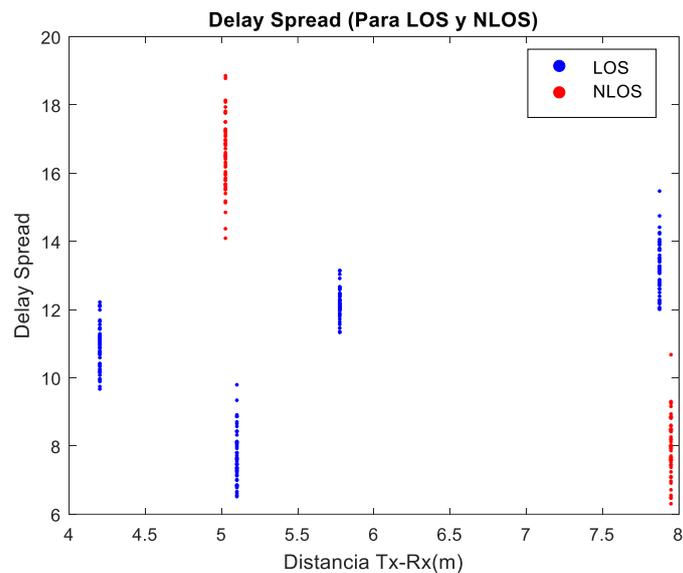


Figura. 4.5 Delay Spread para 37 GHz (LOS y NLOS).

Como se puede apreciar, se confirma lo mencionado anteriormente ya que para la posición 6 (con distancia 4.75 m y color rojo), el Delay Spread es mayor que para cualquier valor obtenido por tener mayor dispersión. Este efecto se produce al haber difracción de la señal, lo que provoca que haya mayor número de reflexiones dispersas que llegan con mayor retardo a la antena receptora. Además, para LOS, se aprecia que, al tener menor dispersión, se obtiene un valor menor de Delay Spread.

En las siguientes figuras se realiza la representación de las Figuras 4.4 y 4.5, mediante la función 'boxplot' en Matlab que tiene en cuenta la mediana del 50% y los cuartiles de 75% y 25%. Esta representación dará información más detallada de la distribución de los puntos representados con anterioridad:

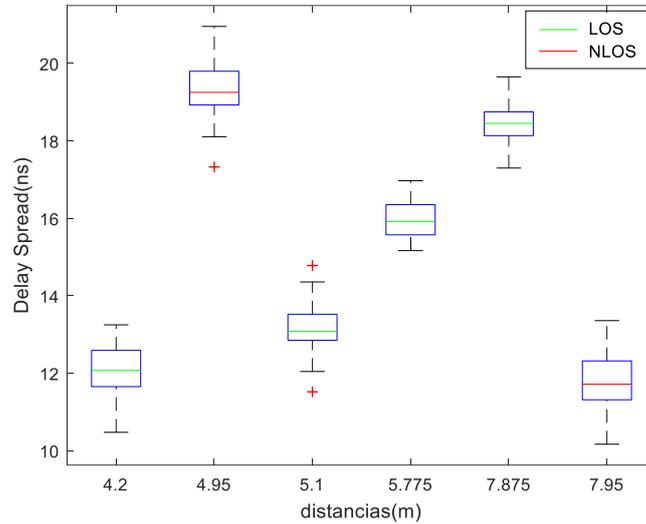


Figura. 4.6 Delay Spread en función de la distancia a 28 GHz (LOS y NLOS).

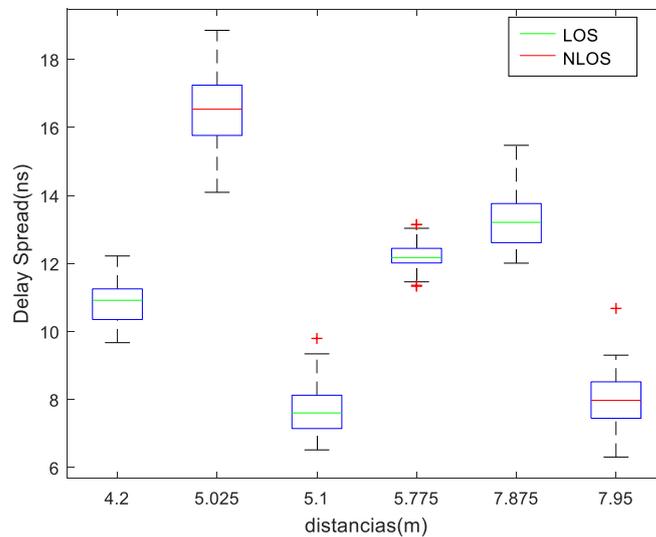


Figura. 4.7 Delay Spread en función de la distancia a 37 GHz (LOS y NLOS).

En dichas figuras se puede ver la dispersión de cada posición medida, representada por los 'bigotes', que es un valor relacionado con los cuartiles e indica la longitud de la dispersión representada. Aquellos valores que salen fuera de los bigotes se representan mediante una cruz roja y son valores que no se han tenido en cuenta a la hora de obtener las gráficas por estar demasiados dispersos de la mayoría de valores. El valor de la mediana representa la línea divisoria entre aquellos valores que se encuentran por encima del cuartil del 75% y por debajo del cuartil del 25%.

Para el caso de la Figura 4.6 el menor valor de mediana para LOS se correspondería con la posición 4 (4.2 m) y por lo tanto la mayoría de datos se encuentran por debajo del cuartil del 25%. Mientras que el mayor valor de mediana se observa para la posición 1 (7.875 m), que además tiene mayor número de valores por encima del cuartil del 75%, lo que indica que para la posición 1 hay mayor dispersión temporal de la señal que para la posición 4. Con respecto a NLOS, el valor más dispersivo sería para la posición 6, como bien se ha comentado anteriormente y el menos dispersivo sería para la posición 2 (7.95 m).

Para la Figura 4.6 se puede observar como la posición 6 (5.025 m) sigue siendo la más dispersiva, ya que tiene mayor longitud de bigotes dada su mayor dispersión. Además, tiene mayor número de datos por encima del cuartil del 75%, mientras que la medida con menor dispersión se encuentra en la posición 3 (5.775 m), con una mediana más cercana al cuartil del 25%.

La longitud de la ‘caja’ se define como Rango Intercuartílico (RIC), el cual depende de la diferencia entre el primer y el tercer cuartil, es decir, el cuartil a 75% y el cuartil a 25%.

A continuación, para verificar lo comentado anteriormente, se adjuntan los valores de Delay Spread correspondientes a las medias obtenidas para las bandas de 28 GHz y 37 GHz de las dos figuras anteriores:

	Posición 1 (LOS)	Posición 2 (NLOS)	Posición 3 (LOS)	Posición 4 (LOS)	Posición 5 (LOS)	Posición 6 (NLOS)
Delay Spread (ns)	18.4519	11.7186	15.9199	12.0717	13.0782	19.2542

Tabla 4.1 Valores de Delay Spread para 28 GHz.

	Posición 1 (LOS)	Posición 2 (NLOS)	Posición 3 (LOS)	Posición 4 (LOS)	Posición 5 (LOS)	Posición 6 (NLOS)
Delay Spread (ns)	13.2079	7.9749	12.1732	10.9165	7.6041	16.5364

Tabla 4.2 Valores de Delay Spread para 37 GHz.

Como se puede observar en las Tablas 4.1 y 4.2, para la posición 6 se obtiene el mayor valor de Delay Spread en ambas bandas de frecuencia. No obstante, se observa que para la posición 1, en la banda de 28GHz, resulta un valor muy elevado de Delay Spread, el cual se debe a que existe mayor dispersión temporal de la señal para dicha posición a 28 GHz. Esto puede resultar un problema a la hora de realizar una transmisión entre ambas antenas, ya que se está hablando de visión directa, sin ningún obstáculo de por medio.

Para la banda de 37 GHz, se observa que, para cada una de las posiciones de la antena transmisora, se obtienen valores de Delay Spread menores que los obtenidos para la banda de 28 GHz. Esto es una primera ventaja de usar bandas de frecuencia milimétricas, ya que existe menor dispersión temporal de la señal.

La segunda forma de obtener el Delay Spread, consiste en calcular la media de los 49 valores de PDP de cada medida para luego obtener un solo valor de Delay Spread. El valor del PDP medio se calcula del siguiente modo:

$$\overline{PDP} = E\{|h(t, \tau)|^2\} = \frac{1}{49} \sum_{i=1}^{49} |h_i(t, \tau)|^2 \quad (4.5)$$

A diferencia de las representaciones anteriores, ahora se representa un único valor por lo que resultará más sencillo de comparar. A continuación, se muestran los puntos obtenidos para cada distancia tanto para LOS como para NLOS, en las bandas de 37 GHz, 28 GHz y 25-40 GHz:

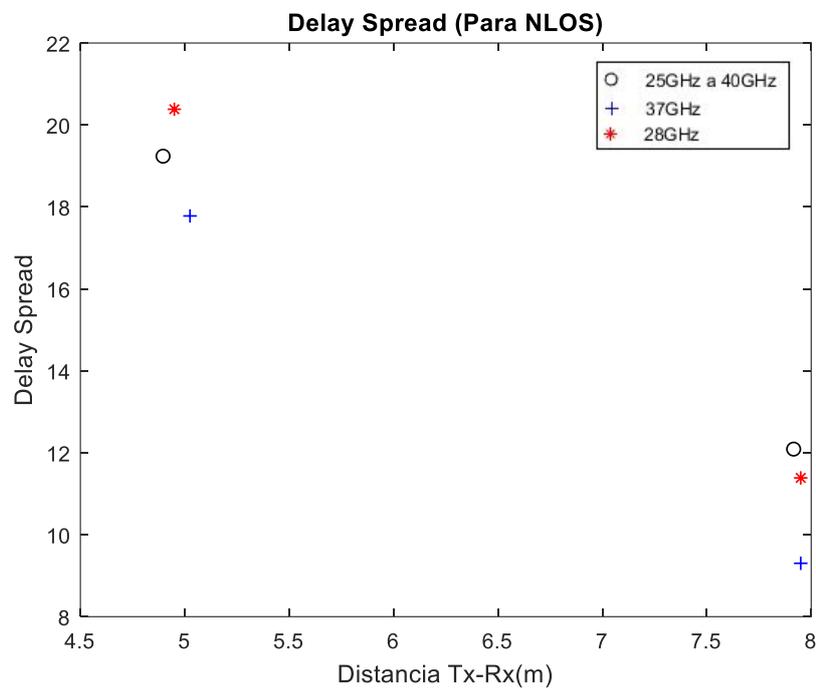


Figura. 4.8 Representación Delay Spread Forma 2 para NLOS.

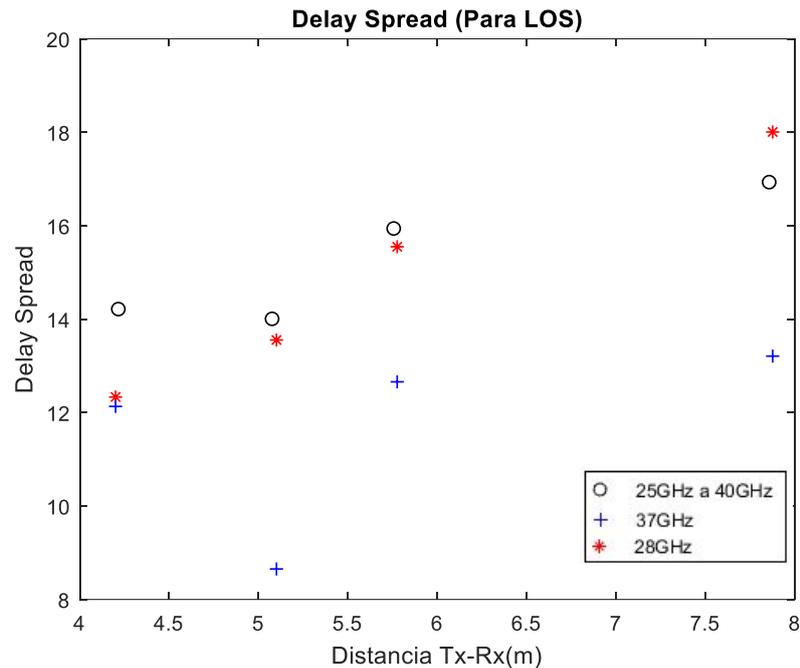


Figura. 4.9 Representación Delay Spread Forma 2 para LOS.

Además, se adjuntan tablas comparativas de valores de Delay Spread para las distintas bandas de frecuencia y posiciones medidas, correspondientes a las Figuras 4.10 y 4.11 representadas con anterioridad:

	25 GHz a 40 GHz	28 GHz	37 GHz
Posición 2 (7.78 m)	12.07 ns	11.39 ns	9.303 ns
Posición 6 (4.75 m)	19.22 ns	20.38 ns	17.78 ns

Tabla 4.3 Valores de Delay Spread para NLOS.

	25 GHz a 40 GHz	28 GHz	37 GHz
Posición 1 (7.73 m)	16.91 ns	18.01 ns	13.21 ns
Posición 3 (5.61 m)	15.92 ns	15.55 ns	12.66 ns
Posición 4 (4.36 m)	14.2 ns	12.33 ns	12.13 ns
Posición 5 (4.91 m)	13.99 ns	13.55 ns	8.652 ns

Tabla 4.4 Valores de Delay Spread para LOS.

Como se puede observar son los valores de la banda de 37 GHz los de menor Delay Spread, por lo que se puede concluir que a medida que se va aumentando en frecuencia, la atenuación de los materiales es mayor, lo que significa que las componentes secundarias se reducen. Por lo tanto, en un caso hipotético de disponer de una frecuencia demasiado elevada, tan solo se tendría el componente directa.

Cabe destacar, que para ambas formas utilizadas para el cálculo del Delay Spread, se han utilizado diferentes niveles de TH tanto para LOS como para NLOS. En concreto, para LOS se ha utilizado un determinado nivel de TH para evitar tener en cuenta el ruido de la señal medida y así poder analizar las primeras componentes que llegan a la antena Rx. Y para NLOS, se ha utilizado otro nivel de TH distinto.

A continuación, se añaden los valores de TH correspondientes a cada banda de frecuencia analizada:

	NLOS	LOS
28 GHz	-20 dB	-30 dB
37 GHz	-15 dB	-25 dB

Tabla 4.5 Valores de Threshold en dB para LOS y NLOS, en 28 GHz y 37 GHz.

Se han escogido para la banda de 37 GHz menores valores de TH que para la banda de 28 GHz, puesto que, al aumentar en frecuencia, las atenuaciones de la señal se incrementan. Por lo tanto, para discriminar las componentes principales que le llegan a la antena Rx, es necesario reducir el nivel de TH.

Por otra parte, también se van a representar los valores de Delay Spread en función del Threshold (TH) para poder comprobar a partir de que valor de TH se obtiene el mismo valor de dispersión temporal. A continuación, se muestran dos ejemplos para la posición 2 (NLOS) y la posición 4 (LOS):

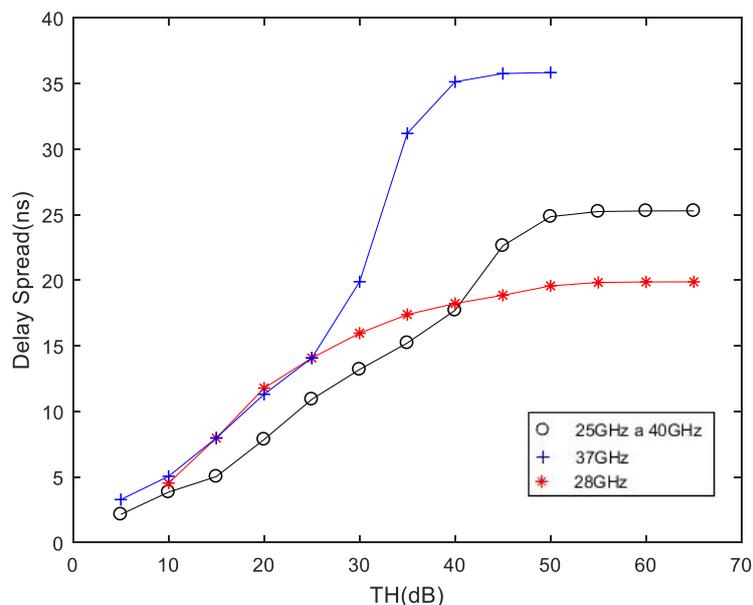


Figura. 4.10 Comparativa Delay Spread y TH Posición 2 (NLOS).

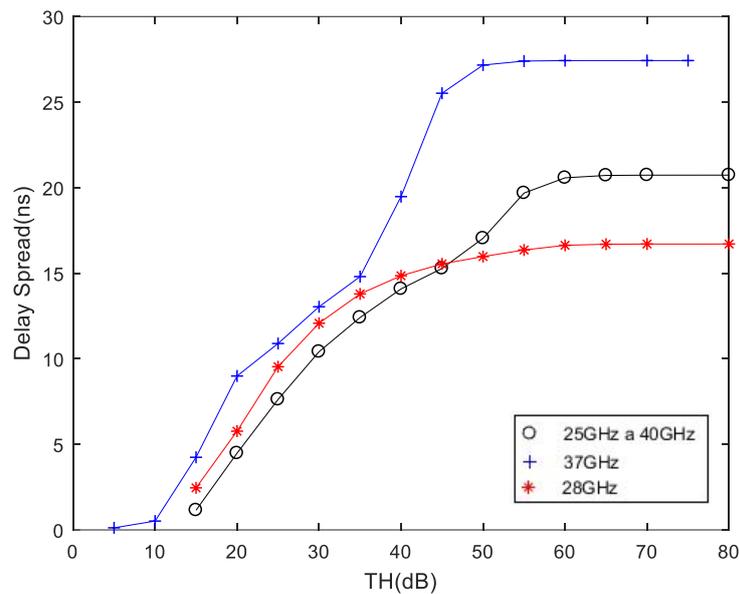


Figura. 4.11 Comparativa Delay Spread y TH Posición 4.

Para cada valor obtenido de Delay Spread se ha escogido un valor de TH, hasta comprobar que para un determinado valor se obtiene siempre el mismo Delay Spread, es decir, llegados a un valor de TH, el valor de Delay Spread se estabiliza. En el caso de la banda de 37 GHz es a partir de 55 dB (LOS) y 45 dB (NLOS), para 28 GHz es a partir de 60 dB (LOS) y 55 dB (NLOS) y para la banda de 25 GHz a 40 GHz es a partir de 65 dB (LOS) y 55 dB (NLOS).

A continuación, resulta de interés comprobar la evolución del Delay Spread a lo largo de la frecuencia para determinados anchos de SPAN.

La idea es escoger una frecuencia central f_c la cual va cambiando gracias al desplazamiento de una ventana de frecuencias definida por el SPAN escogido. El estudio se realiza con un paso de 0.25 GHz que va comprendido desde 26 GHz hasta el final de la ventana bajo estudio.

Se adjuntan las gráficas correspondientes a ventanas con un SPAN de 1 GHz, 2 GHz y 3 GHz para todas las posiciones medidas:

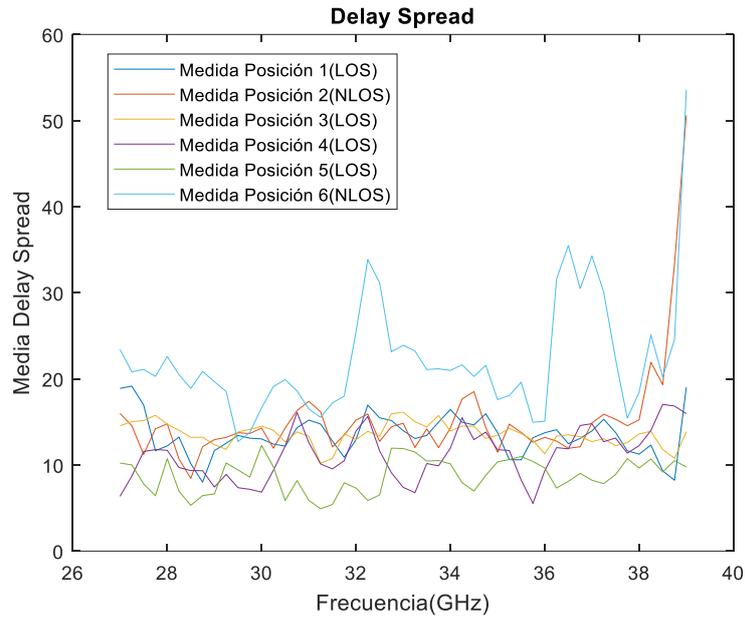


Figura. 4.12 Delay Spread con un SPAN de 1 GHz.

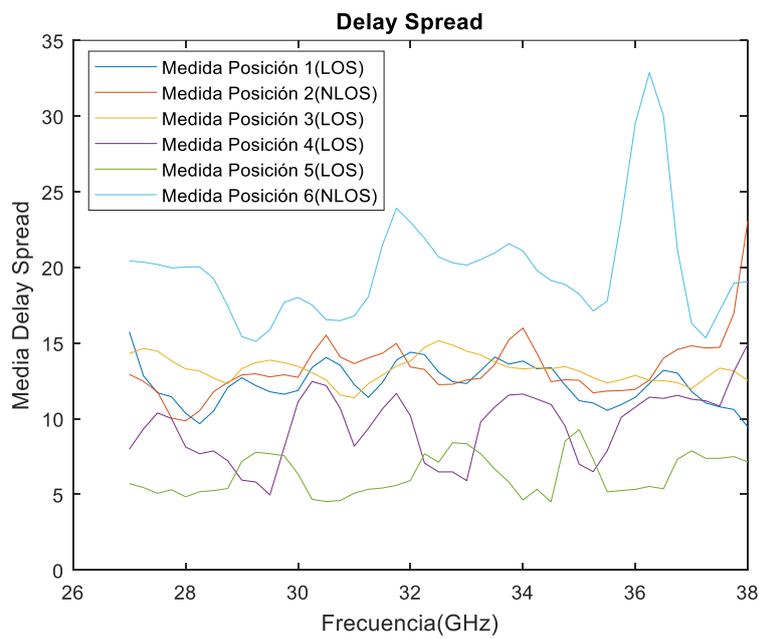


Figura. 4.13 Delay Spread con un SPAN de 2 GHz.

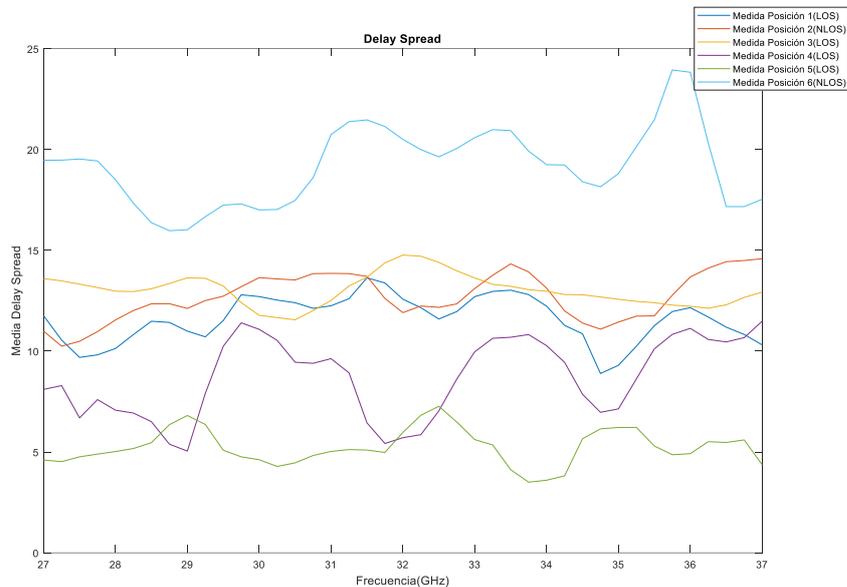


Figura. 4.14 Delay Spread con un SPAN de 3 GHz.

En las tres figuras se puede apreciar como las diferencias en la banda analizada son del orden de 1 o 2 ns, por lo que se mantienen prácticamente constantes. Se pueden apreciar ciertas anomalías en las posiciones analizadas sin visión directa como por ejemplo en la posición 6 (línea azul), donde se aprecia un aumento de Delay Spread para la banda de 37 GHz. Esto se debe a que es NLOS y por lo tanto las contribuciones que llegan a la antena receptora, se ven incrementadas por el efecto multicamino.

La tendencia habitual en este tipo de medidas es que al aumentar en frecuencia disminuya el Delay Spread, por el motivo descrito con anterioridad a causa del aumento de la atenuación de los materiales con la frecuencia.

La comprobación de este tipo de representaciones se realiza comparando las representaciones del Delay Spread respecto de la posición y respecto de la frecuencia, las cuales para una misma posición se debe obtener el mismo valor. Se adjuntan dos ejemplos para el Delay Spread en función de la distancia en la posición 1 (LOS), calculado mediante la forma 2, y otro para esa misma posición, en la banda de 37 GHz con un SPAN de 2 GHz para verificar dicha comprobación:

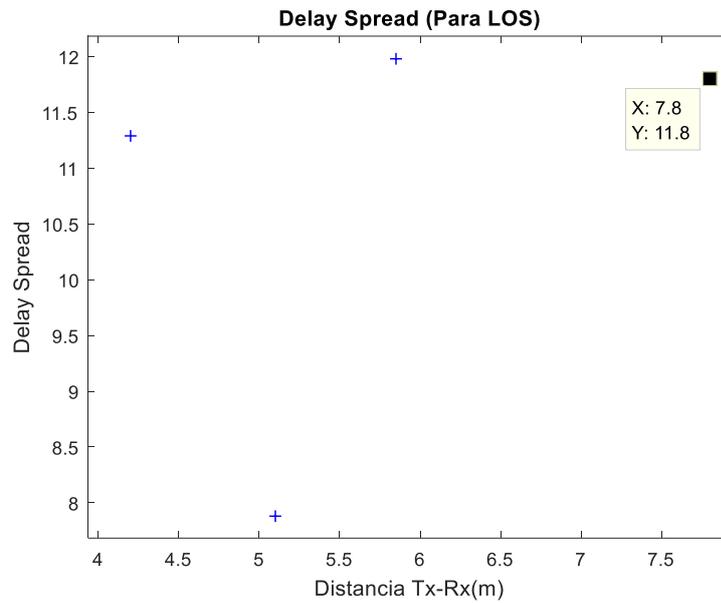


Figura. 4.15 Delay Spread para posición 1 en distancia.

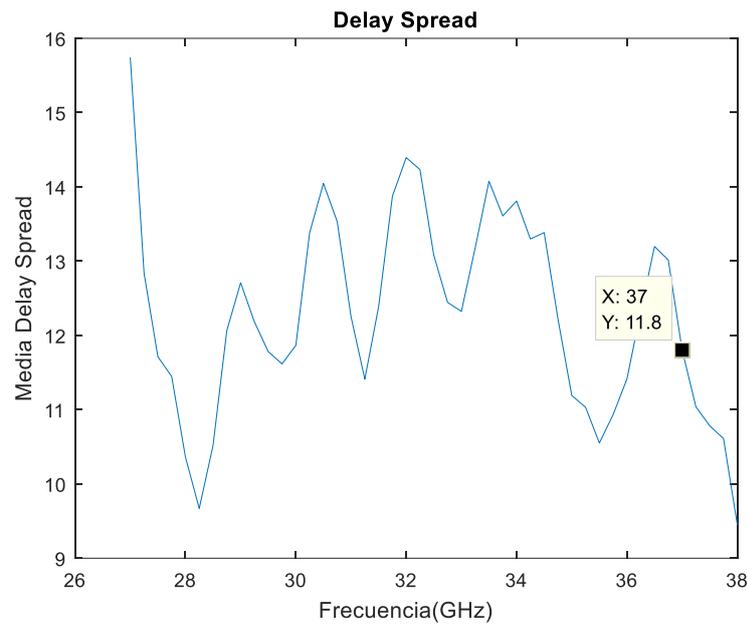


Figura. 4.16 Delay Spread para posición 1 en frecuencia.

De donde se verifica que, para una misma posición, en este caso la posición 1, se obtienen en ambas representaciones el mismo valor de Delay Spread. En el caso de las dos gráficas anteriores, se obtiene un valor de 11.8 ns. Por lo tanto, con ambas representaciones se podrían obtener las mismas conclusiones obtenidas con anterioridad.

Por otra parte, también se incorporan gráficas definidas para una posición determinada con diferentes SPAN (1, 2 y 3 GHz) analizados. Por ejemplo, para la posición 2 y 5 se tendría:

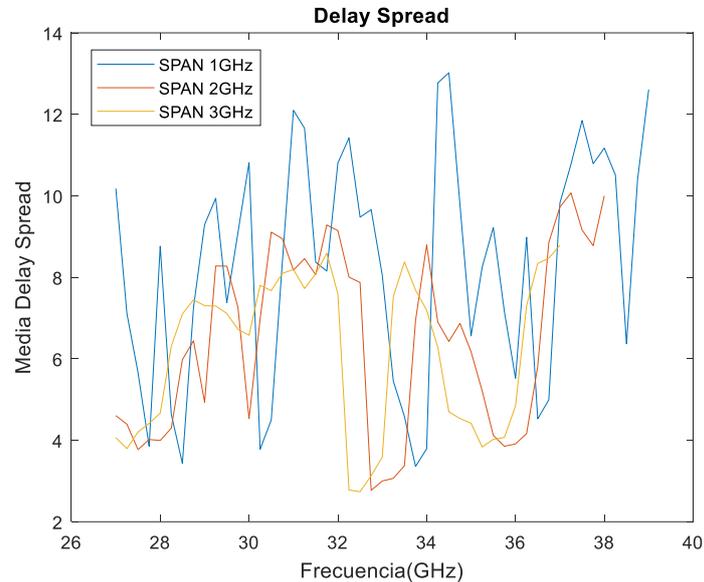


Figura. 4.17 Delay Spread para posición 2 y diferentes SPAN.

Donde se comprueba que las diferencias entre SPAN 2 GHz y 3 GHz son del orden de 1 ns, mientras que, comparando estos dos SPAN con 1 GHz, se aprecian grandes diferencias del orden de 4 o 5 ns. Por lo tanto, para evitar una mayor dispersión temporal de la señal, sería recomendable utilizar un SPAN de 2 o 3 GHz. La tendencia debería ser que el Delay Spread disminuyese a medida que se incrementa en frecuencia, pero al ser NLOS, no se cumple dicha afirmación.

En cuanto a la posición 5 se tiene:

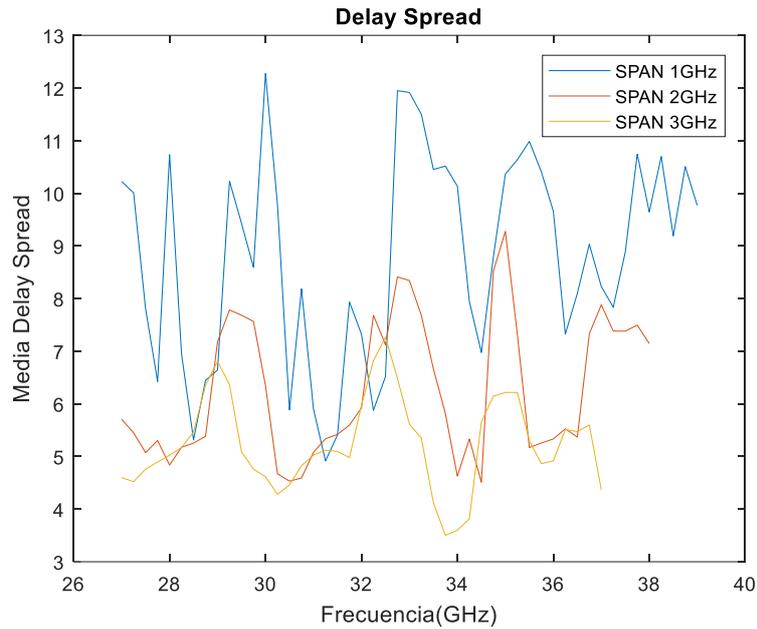


Figura. 4.18 Delay Spread para posición 5 y diferentes SPAN.

Donde se vuelve a verificar lo comprobado para la posición 2 y es que para el SPAN de 1 GHz se tiene mayores niveles de Delay Spread que para un SPAN de 2 GHz o 3 GHz. En este caso, sí se cumple la disminución del Delay Spread a medida que se va incrementando la frecuencia.

A medida que se vaya incrementando el SPAN, se tendrán valores más pequeños de Delay Spread, además la ventana de operación se irá aumentando por lo que no podrán ser analizadas las frecuencias que nos interesan, que son la banda de 28 GHz y 37 GHz. Es por ello que se han analizado tamaños de SPAN tan reducidos.

4.3 Ancho de banda de coherencia.

El ancho de banda de coherencia se define como la diferencia en frecuencia que se requiere para que el coeficiente de correlación (del orden de 0.9, 0.7 o 0.5), sea menor que un umbral determinado. [3] El coeficiente de correlación es una medida estadística de la separación máxima en frecuencia en la cual se ha comprobado que el canal tiene aproximadamente la misma ganancia y un incremento de fase lineal. En este caso se ha estudiado para valores de coeficiente de correlación de 0.9 (90%) y 0.7 (70%).

Además, se puede obtener el ancho de banda de coherencia a partir del Delay Spread, mediante la siguiente aproximación:

$$B_c \cong \frac{1}{2\pi\sigma_\tau} \quad (4.6)$$

Si el ancho de banda que se transmite es superior al ancho de banda de coherencia, en la señal recibida se produce un desvanecimiento selectivo en frecuencia, lo que se traduce en interferencia entre símbolos (IES).

A la hora de realizar la representación del ancho de banda de coherencia, también se dispone de dos formas, como se comentó en la parte de Delay Spread. Además, también se han calculado para las bandas de 37 GHz, 28 GHz y el rango de frecuencias de 25 GHz a 40 GHz.

Con respecto a la primera forma, se realiza el cálculo del ancho de banda de coherencia para cada una de las 49 posiciones correspondientes a la mesa de posiciones.

Para la obtención del ancho de banda de coherencia se utiliza la ecuación de la recta para aquellos valores superiores a 0.7 (70%) o 0.9 (90%).

$$y - y_0 = m(x - x_0) \rightarrow Bc = \frac{z - y_0}{m} + x_0 \quad (4.7)$$

Donde m es el valor de la pendiente correspondiente a la recta entre el primer punto que sobrepasa el valor de 0.7 o 0.9 y el punto anterior a dicho valor de correlación (x_0 o y_0). La variable z será 0.7 (70%) o 0.9 (90%), según el valor propuesto de coeficiente de correlación.

La interpretación gráfica del ancho de banda de coherencia se puede comprobar en la Figura 4.19, correspondiente a la posición 3 para una correlación de 0.7 en la banda de 37 GHz, donde se escogen los puntos comentados con anterioridad.

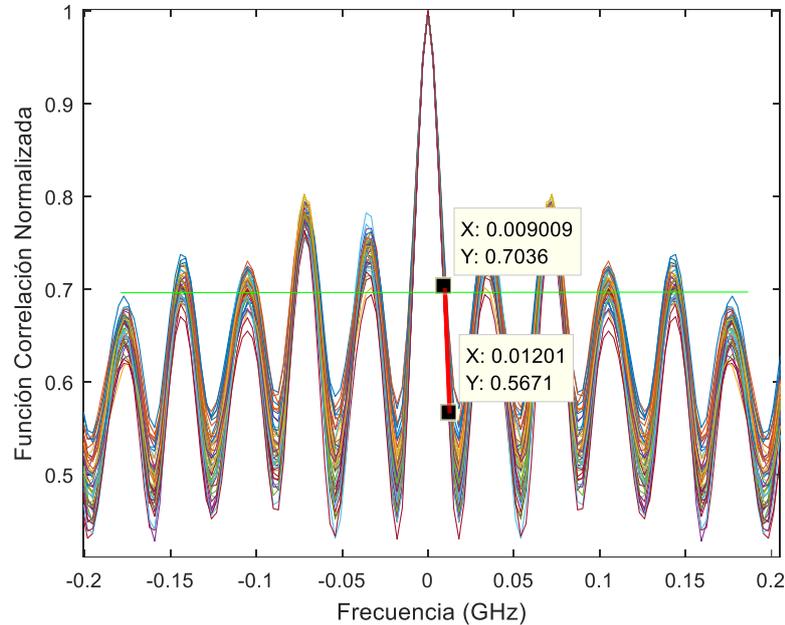


Figura. 4.19 Cálculo de Ancho de banda de coherencia.

De donde se observa como la línea verde se corresponde con el valor del coeficiente de correlación del 70%, a partir del cual se encuentran los puntos con menor valor a 0.7 y mayor valor a 0.7, que se utilizan para calcular la pendiente entre dichos puntos. Esta pendiente se representa con un color rojo y se obtiene mediante la ecuación de la recta indicada en (4.7), donde en este caso la variable z tomará el valor de 0.7.

A continuación, se adjuntan dos ejemplos obtenidos para la banda de 28 GHz y la banda de 25 GHz a 40 GHz con el mismo coeficiente de correlación de antes y situado en la posición 1.

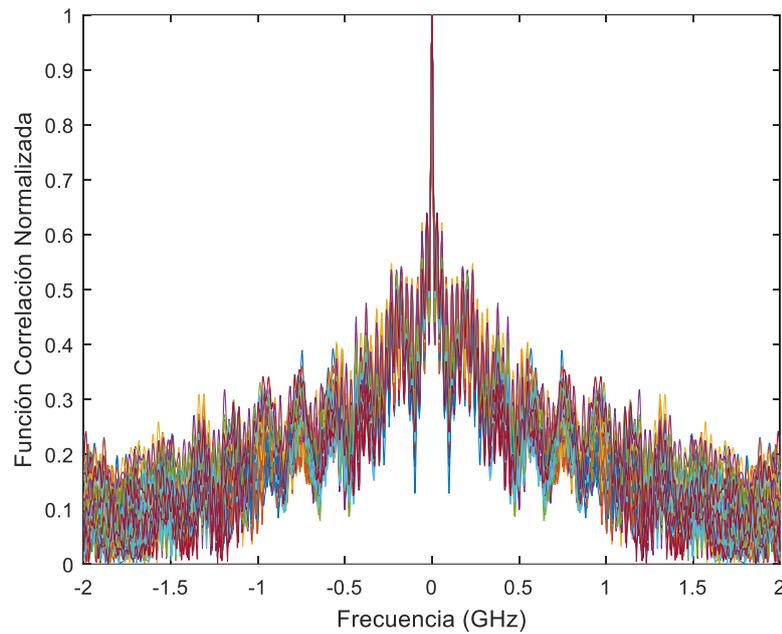


Figura. 4.20 Ancho de Banda Coherencia forma 1 para 28 GHz en la posición 1.

En la Figura 4.20 se observa como las contribuciones para cada una de las 49 posiciones son muy similares y en las cuales hay menor atenuación de la señal para los distintos valores de frecuencia representados.

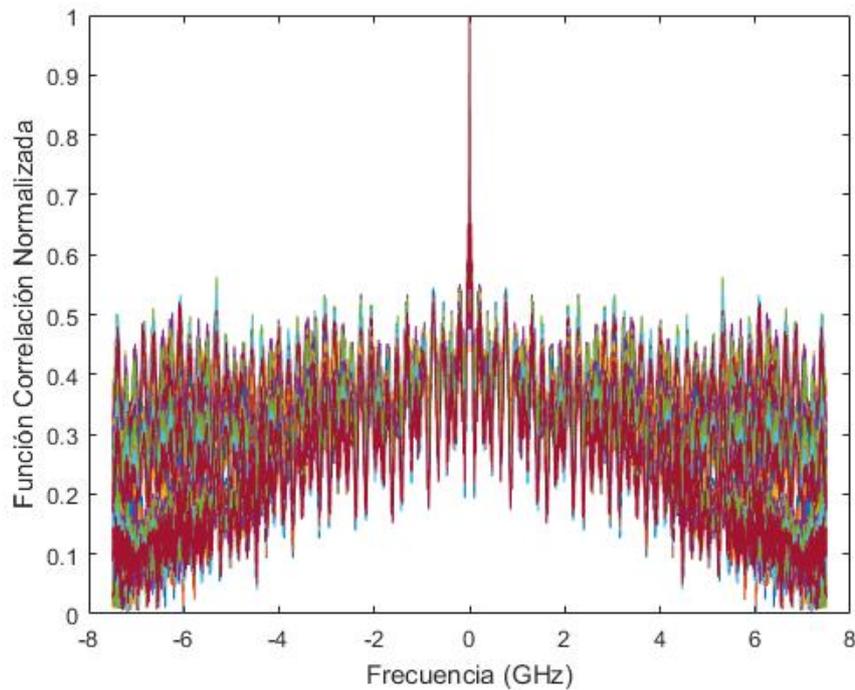


Figura. 4.21 Ancho de Banda Coherencia forma 1 para 25 GHz a 40 GHz en la posición 1.

No obstante, en la Figura 4.21 se observa un incremento de la atenuación en los lóbulos laterales o secundarios, esto se debe a que se está analizando la señal a lo largo de la banda comprendida entre 25 GHz y 40 GHz, por lo que a medida que se aumenta en frecuencia se va incrementando en atenuación y por lo tanto los niveles de los lóbulos secundarios se incrementan respecto de la contribución principal centrada en 0 GHz.

Para la posición 2 y un coeficiente de correlación del 90% se adjuntan las siguientes gráficas obtenidas para las mismas bandas de frecuencias analizadas en las dos figuras anteriores:

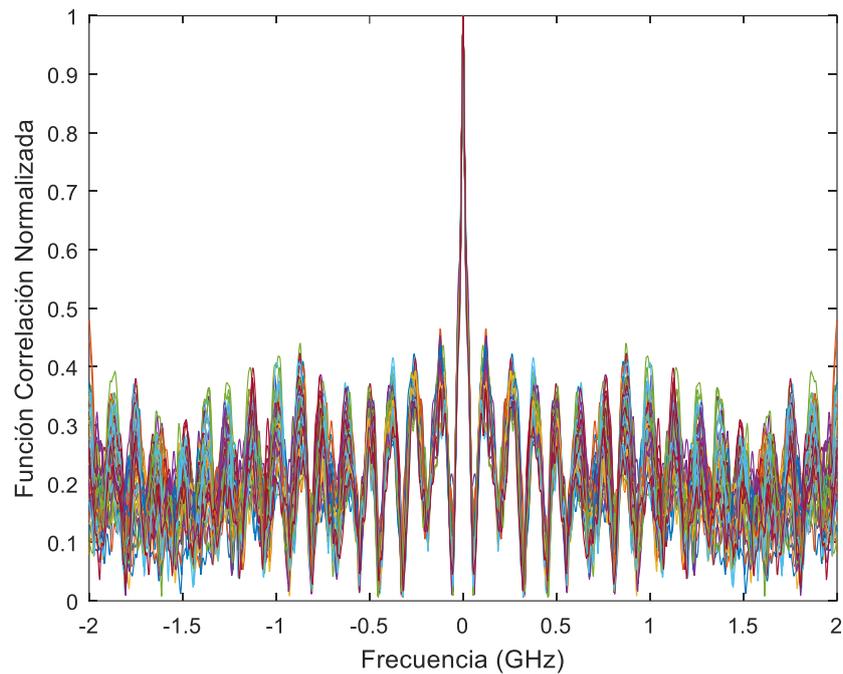


Figura. 4.22 Ancho de Banda Coherencia forma 1 para 28 GHz en la posición 2.

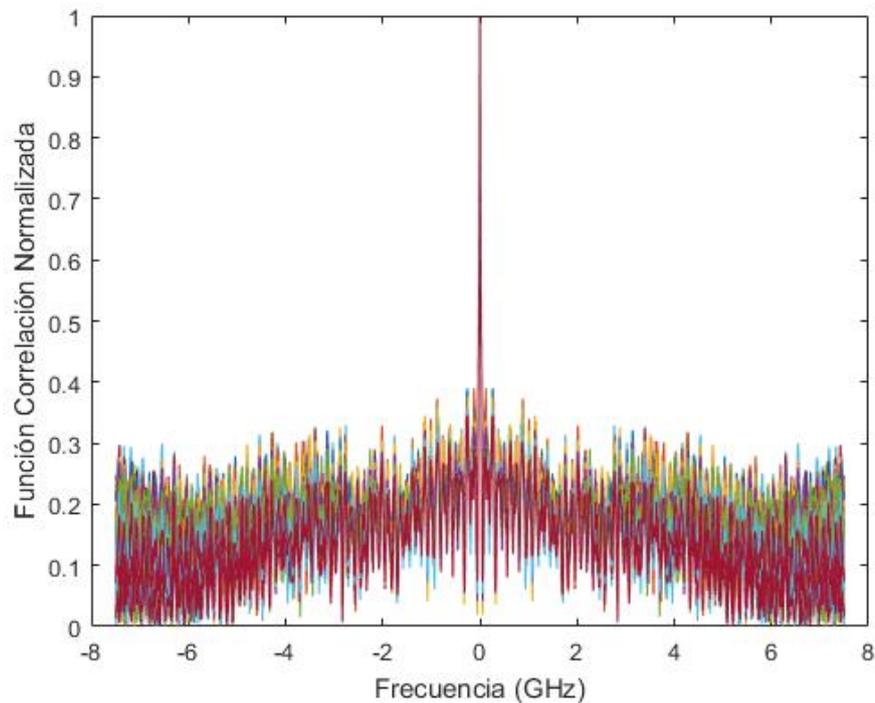


Figura. 4.23 Ancho de Banda Coherencia forma 1 para 25 GHz a 40GHz en la posición 2.

Donde en comparación con las gráficas obtenidas con un coeficiente de correlación del 70% se observa una mayor resolución de los lóbulos representados, ya que en el caso del coeficiente de correlación del 90% se está escogiendo solo el lóbulo principal sin ninguna componente secundaria.

En segundo lugar, se obtiene el ancho de banda de coherencia mediante la forma 2, que consiste, como bien se comentó en la parte 4.2 Delay Spread, en calcular en este caso el ancho de banda de coherencia mediante el valor medio del PDP. Por lo tanto, se obtiene la gráfica del ancho de banda de coherencia medio de las 49 posiciones analizadas.

La fórmula empleada para la obtención del PDP medio se encuentra en (4.5) y cuyo valor se utiliza en la obtención de Bc mediante la fórmula descrita en (4.7).

Este tipo de cálculo resulta muy interesante a la hora de analizar la media de todas las contribuciones sin la necesidad de ir obteniendo para cada posición una gráfica distinta, ya que en este caso es posible realizar un análisis más rápido del Bc.

A continuación, se adjunta a modo de ejemplo la gráfica correspondiente a la posición 4 para un coeficiente de correlación del 70%:

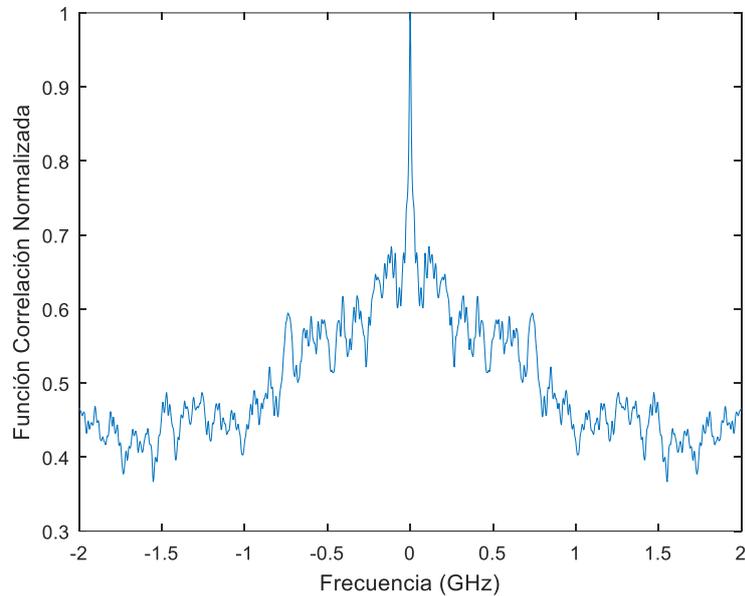


Figura. 4.24 Ancho de Banda de Coherencia para posición 4 con coeficiente de correlación del 70% en 28 GHz.

Como se puede comprobar la media de todas las posiciones resulta un ancho de banda de coherencia menor que los obtenidos en los casos anteriores para la forma 1. Para verificar esto, se adjunta una tabla comparativa entre el cálculo del ancho de banda de coherencia para la posición 4 mediante la Forma 1 y 2.

Ancho de Banda de Coherencia (MHz)	
Forma 1	10.107 MHz
Forma 2	10.015 MHz

Tabla 4.6 Ancho de Banda de Coherencia para posición 4 con correlación del 70% en 28 GHz.

Que como se observan en los valores adjuntos en la Tabla 4.6, la diferencia es muy pequeña para ambas formas de representar el Bc.

Acto seguido se adjuntan los anchos de banda de coherencia obtenidos para todas las bandas y en cada una de las posiciones medidas tanto para el coeficiente de correlación de 90% como para el 70%, obtenidos mediante la forma 2:

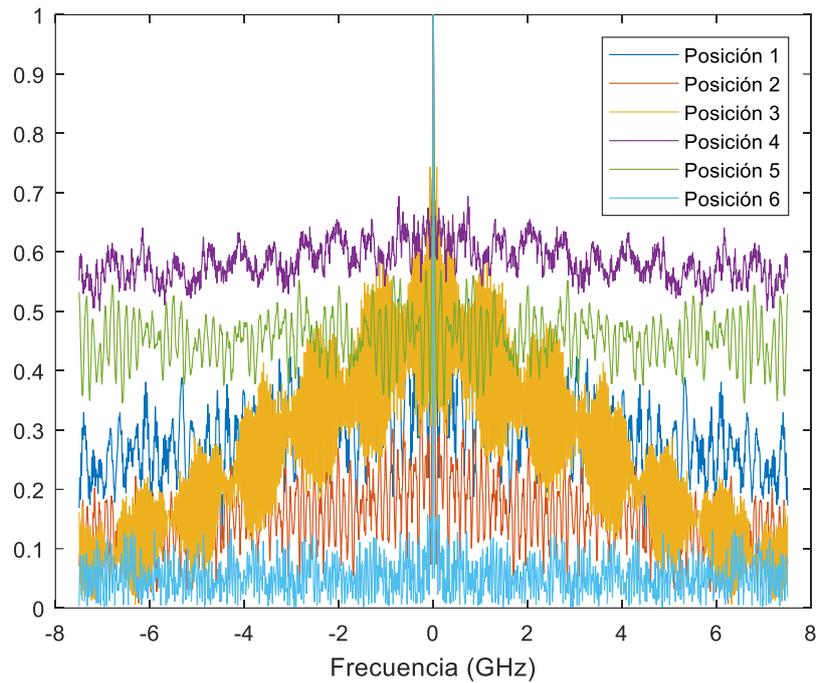


Figura. 4.25 Ancho de Banda de coherencia para 25 GHz a 40 GHz con coeficiente de correlación del 70%.

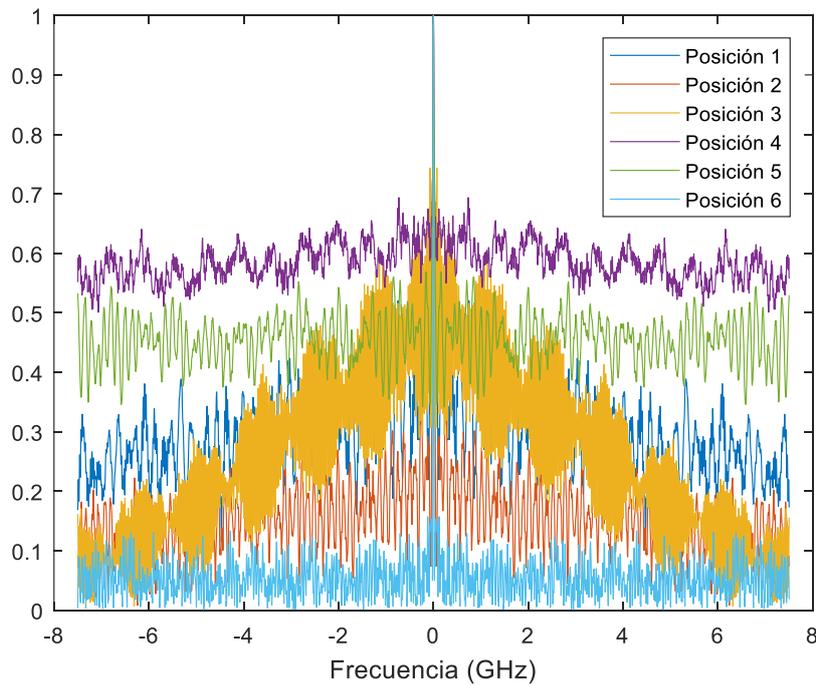


Figura. 4.26 Ancho de Banda de coherencia para 25 GHz a 40 GHz con coeficiente de correlación del 90%.

Donde no se aprecian ningún cambio gráficamente ya que tanto para una correlación del 70% como para 90% se está escogiendo tan solo el lóbulo principal centrado en 0 y no se está teniendo en cuenta ningún lóbulo secundario al situarse estos por debajo de los coeficientes de correlación definidos.

Pero mediante los valores obtenidos, adjuntados en la siguiente tabla, se puede ver que los valores no son los mismo para 70% y 90% de coeficiente de correlación:

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Posición 6
(70%) Bc (MHz)	9.0264	9.4034	8.5163	26.024	21.533	6.2127
(90%) Bc (MHz)	3.8723	3.9336	4.1581	4.6354	5.0917	2.8246

Tabla 4.7 Valores de Ancho de Banda de Coherencia para 25 GHz a 40 GHz.

Por otra parte, se representan también las gráficas correspondientes a las bandas de frecuencia de 28 GHz y 37 GHz, que se muestran a continuación:

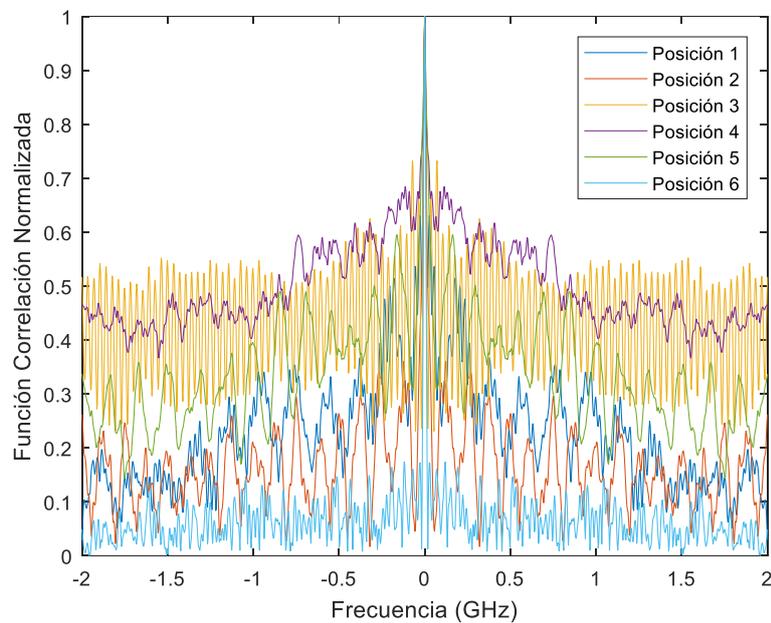


Figura. 4.27 Ancho de Banda de coherencia para 28 GHz con coeficiente de correlación del 70%.

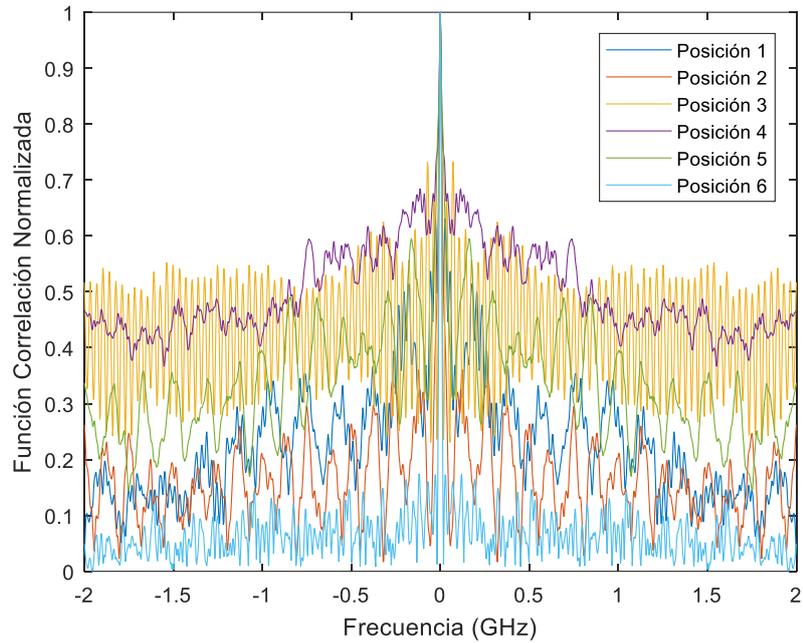


Figura. 4.28 Ancho de Banda de coherencia para 28 GHz con coeficiente de correlación del 90%.

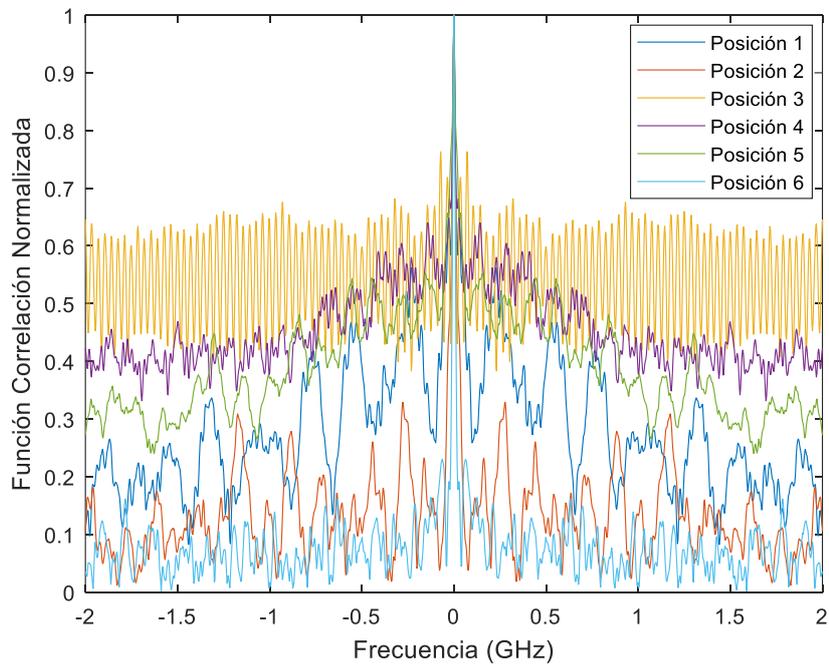


Figura. 4.29 Ancho de Banda de coherencia para 37 GHz con coeficiente de correlación del 70%.

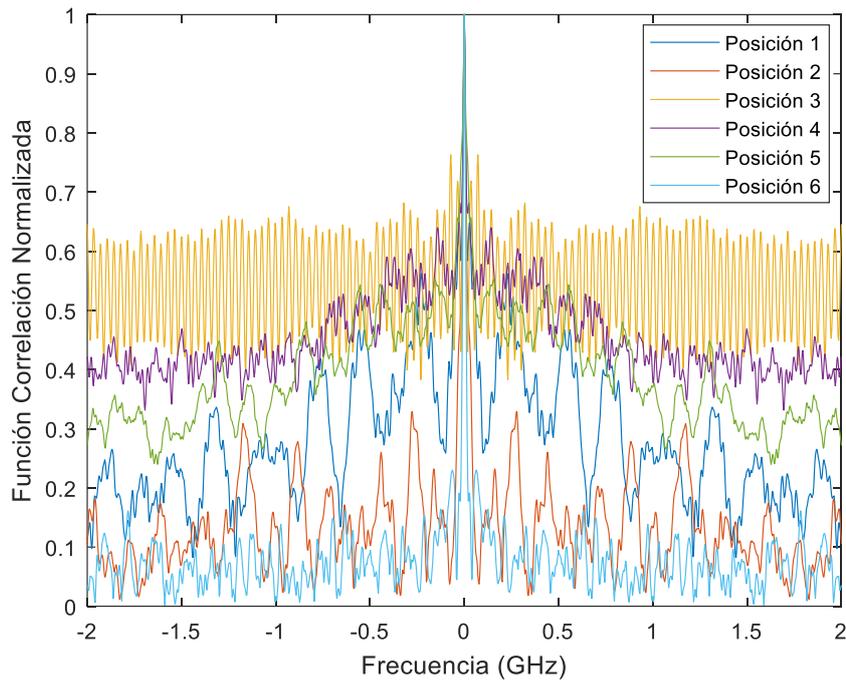


Figura. 4.30 Ancho de Banda de coherencia para 37 GHz con coeficiente de correlación del 90%.

Donde aparentemente se vuelve a apreciar que para una correlación del 70% y 90%, se obtienen las mismas gráficas. Algo que se puede comprobar que es falso, como bien se puede apreciar en las siguientes tablas de valores:

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Posición 6
(70%) Bc (MHz)	8.4415	10.015	8.2761	27.710	21.313	6.0945
(90%) Bc (MHz)	3.7531	4.3361	4.1062	5.1205	5.1166	3.0808

Tabla 4.8 Valores de Ancho de Banda de Coherencia para 28 GHz.

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Posición 6
(70%) Bc (MHz)	10.039	9.2870	9.0880	11.571	22.941	6.3647
(90%) Bc (MHz)	3.9253	3.4791	4.2896	4.1182	4.4922	2.3467

Tabla 4.9 Valores de Ancho de Banda de Coherencia para 37 GHz.



En ambas tablas se puede observar como para el coeficiente de correlación del 90%, se obtienen valores de ancho de banda de coherencia menores que para un coeficiente de correlación del 70%. Esto se debe a que a medida que el coeficiente de correlación se va aumentando, se va acercando al pico situado en la frecuencia central y por lo tanto al valor unidad correspondiente a la correlación normalizada. Como consecuencia de esto, el valor de la frecuencia se va reduciendo, puesto que, para dicho valor de correlación normalizada, el valor de la frecuencia se sitúa cada vez más cercano al valor 0, correspondiente al eje de frecuencias representado.

Por lo que se puede concluir que, a medida que se vaya aumentando el coeficiente de correlación, el valor del ancho de banda de coherencia se verá reducido, como consecuencia de que la contribución centrada en 0, se va reduciendo a medida que se acerca al valor unidad de la correlación normalizada.

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

5.1 Conclusiones

En este trabajo se ha analizado la dispersión temporal del canal radio en un entorno de laboratorio fuertemente dispersivo. Según los datos obtenidos, se ha comprobado como para el caso de tener visión directa, se obtiene una componente principal mayor con respecto a las reflexiones producidas por el efecto multicamino. No obstante, cuando no se tiene visión directa, la primera componente que llega a la antena receptora es menor en comparación a las componentes reflejadas. Esto se debe a que el máximo de directividad de la antena transmisora no apuntaba directamente a la antena receptora.

En cuanto a los valores de Delay Spread, han sido analizados mediante dos formas distintas. Una primera forma se obtiene calculando el Delay Spread para cada una de las 49 posiciones medidas, entre las cuales se obtiene un valor medio de 15 ns para la banda de 28 GHz y 11 ns para la banda de 37 GHz. Y mediante la segunda forma, que se calcula a partir de la media de los 49 PDPs medidos, se obtiene para la banda de 28 GHz un valor de Delay Spread de 15 ns y para la banda de 37 GHz un valor de 12 ns. Para ambas formas se puede apreciar como para la banda de 37 GHz, se obtiene un menor valor de Delay Spread en comparación con la banda de 28 GHz. Lo que significa que a medida que se trabaja en frecuencias mayores se obtienen menores valores de dispersión temporal de la señal transmitida.

Por otra parte, el cálculo del Bc también se obtuvo mediante las dos formas descritas con anterioridad. Para el ejemplo propuesto en esta parte del cálculo de Bc para la banda de 28 GHz y un valor del 70% de coeficiente de correlación, se obtuvo un valor de ≈ 10 MHz para las dos formas propuestas. Que como se aprecia, al ser valores aproximadamente parecidos, ambas formas de calcular el Bc llevarían a conclusiones muy similares. No obstante, para el cálculo de la Forma 2 para todas las posiciones medidas, se obtuvo que para una correlación del 70% y para la banda de 28 GHz, se obtenía un valor de Bc medio de todas las posiciones próximo a 13 MHz y para una correlación del 90%, se obtuvo un valor cercano a 4 MHz. Por lo que a medida que aumente el coeficiente de correlación se irá reduciendo el valor de Bc, por estar cada vez mas cercano a la frecuencia central de 0 GHz. En cuanto a la banda de 37 GHz, se obtuvieron valores muy similares en algunas posiciones a los de la banda de 28 GHz. Por lo tanto, si se dispone de un coeficiente de correlación del 70% en ambas bandas, se podrá transmitir con mayor ancho de banda antes de alcanzar el ancho de banda de coherencia obtenido, ya que si es superado se puede producir un desvanecimiento de la señal y como consecuencia de esto, interferencia entre símbolos.



5.2 Líneas Futuras

Por último, decir que este trabajo presenta resultados preliminares de la dispersión temporal del canal radio en un entorno de laboratorio. Dicho estudio podría ampliarse añadiendo el cálculo de las pérdidas por propagación dentro de este escenario de laboratorio. Este método resultaría interesante para comprobar que nivel de degradación de la señal se obtendría y en que lugares del laboratorio no se tendría señal o se tendría una señal muy débil.

Además, se podrían aplicar técnicas de detección de contribuciones multicamino para poder realizar una caracterización angular de la señal. Lo que permitiría observar las diferentes direcciones que toma la señal transmitida al impactar con los diferentes objetos que se encuentran en el laboratorio y que llega con diferentes ángulos a la antena receptora.



Bibliografía

- [1] IEEE Communications Magazine. “*Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks*”. February 2014.
- [2] Resolution 238 (WRC-15), *The World Radiocommunication Conference* (Geneva, 2015).
- [3] Molisch, Andreas F. “*Wireless Communications*” Second Edition 2011. Chapter 6.
- [4] Theodore S. Rappaport, Yunchou Xing, George R. MacCartney, Andreas F. Molish, Evangelos Mellios, Jianhua Zhang. “*Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a focus on Propagation Models*”. 2017 IEEE
- [5] Diapositivas de la asignatura Radiocomunicaciones del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación. Lorenzo Rubio Arjona.