



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



**Máster Universitario**  
en Tecnologías, Sistemas y  
Redes de Comunicaciones

# Diseño e Implementación Eficiente de una Sonda de Medida para la Caracterización del Canal Radio en Milimétricas

*Autor:* Cristina Catalá Lahoz

*Director 1:* Lorenzo Rubio Arjona

*Director 2:* Vicent Miquel Rodrigo Peñarrocha

*Fecha de comienzo:* 30/09/2020

*Lugar de trabajo:* Grupo Antennas and Propagation Lab del iTEAM

**Objetivos** – Diseño e implementación de una sonda del canal radio en el dominio de la frecuencia para realizar campañas de medida con la finalidad de caracterizar el canal radio con aplicación a 5G, 6G y sistemas MIMO masivo. Además de encontrar los parámetros óptimos para la realización de las medidas utilizando la sonda y el análisis de las posteriores técnicas de procesado.

**Metodología** – Se ha realizado un estudio de los principales parámetros para la caracterización del canal radio. Se ha diseñado una interfaz gráfica para una sonda de medida utilizando la herramienta *App Designer* de MATLAB basada en un analizador de redes vectorial y un sistema de posicionadores. Posteriormente, se han realizado pruebas con distintos parámetros para optimizar el proceso de medida y las distintas técnicas de procesado a utilizar en el análisis de las mismas.

**Desarrollos teóricos realizados** – Diseño de una sonda de canal en el dominio de la frecuencia para caracterizar el canal radio y técnicas de medida . Para ello se eligen los elementos necesarios que forman la sonda y se define su configuración, así como el estudio de los distintos parámetros para realizar medidas del canal radio y sus efectos principales.

**Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio** – Se ha implementado una sonda de canal, para la adquisición de medidas para la caracterización experimental del canal radio en distintos tipos de escenario. El sistema está compuesto por un analizador de redes vectorial (ARV), un enlace de radio sobre fibra de banda ancha, además de cables, antenas y posicionadores. El sistema de medida se ha automatizado creando una interfaz gráfica con *App Designer* de MATLAB, controlando tanto el analizador como los posicionadores. Posteriormente se han realizado medidas con la sonda para su posterior análisis.

**Resultados** – Se ha diseñado e implementado una sonda de canal en el dominio de la frecuencia. Se ha automatizado el sistema de medida para la realización de extensas campañas de medida y se ha posibilitado su uso remoto. Las medidas se han realizado en el laboratorio del grupo Antennas and Propagation Lab (APL) del iTEAM para los distintos parámetros del ARV definidos en la interfaz de la sonda de canal, evaluándose sus efectos. Se ha propuesto un método para la obtención de los parámetros óptimos a partir de medidas experimentales y se han analizado las diferencias al aplicar distintos tipos de enventanado como técnicas de procesado posterior.

**Líneas futuras** – Implementación de un nuevo sistema de posicionamiento circular, añadiéndolo a la sonda diseñada para la realización de nuevos tipos de medida y determinar el ángulo de llegada de las contribuciones. La realización de una campaña de medidas extensa en la banda de milimétricas para la caracterización de sistemas 5G. Por último, una mejora en la sonda para estimar la ocupación en memoria de una medida y determinar si hay espacio suficiente para su posterior salvado.

**Publicaciones** – Català Lahoz, Cristina; Bernardo Clemente, Bernardo; Rodrigo Peñarrocha, Vicent Miquel; Rubio Arjona, Lorenzo; Reig Pascual, Juan-De-Ribera (2021).

“Optimización de la configuración de una sonda de canal en el dominio de la frecuencia en bandas de milimétricas”. En: *XXXVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2021)*. 20-21 de septiembre de 2021.

**Abstract** – This thesis shows the design, implementation and automation of a measurement radio channel sounder to subsequently obtain the most important parameters related to the frequency selective behavior of the radio channel. The system is composed of a vector network analyzer (VNA), a broadband radio over fiber (RoF) link, antennas and the positioner system. In addition, this work analyzes the effects of using the different parameters of the network analyzer to increase the dynamic range in real measurements in a laboratory environment. Finally, the effect of applying different types of windows for the correct calculation of the different channel metrics is studied.

Autor: Cristina Català Lahoz, email: [cricala1@teleco.upv.es](mailto:cricala1@teleco.upv.es)

Director 1: Lorenzo Rubio Arjona, email: [lrubio@ocom.upv.es](mailto:lrubio@ocom.upv.es)

Director 2: Vicent Miquel Rodrigo Peñarrocha, email: [vrodrigo@ocom.upv.es](mailto:vrodrigo@ocom.upv.es)

Fecha de entrega: 01-07-21

## Índice

<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>4</b>
<b>2. El canal radio. Selectividad en tiempo, espacio y frecuencia</b>	<b>5</b>
<b>3. Métricas para el análisis de la selectividad del canal radio</b>	<b>7</b>
3.1. Dispersión temporal y selectividad en frecuencia . . . . .	7
3.2. Dispersión en frecuencia y selectividad temporal . . . . .	9
<b>4. Técnicas de medida del canal radio</b>	<b>10</b>
4.1. Caracterización por impulsos . . . . .	10
4.2. Caracterización por espectro ensanchado . . . . .	11
4.3. Caracterización del canal en el dominio de la frecuencia . . . . .	12
<b>5. Diseño e implementación de una sonda de canal</b>	<b>14</b>
5.1. Diseño y funcionamiento de la interfaz gráfica . . . . .	15
5.1.1. Control del analizador de redes vectorial . . . . .	16
5.1.2. Control del sistema de posicionadores . . . . .	19
<b>6. Resultados</b>	<b>24</b>
6.1. Implementación de la sonda . . . . .	25
6.2. Análisis de los parámetros principales de la sonda . . . . .	25
6.3. Protocolo de obtención de los parámetros óptimos . . . . .	31
6.4. Técnicas de procesado . . . . .	33
<b>7. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>36</b>
<b>8. Agradecimientos</b>	<b>37</b>
<b>A. Artículos</b>	<b>39</b>



## 1. Introducción y objetivos

El despliegue de los futuros sistemas de quinta generación (5G) en la banda de milimétricas (*mmWave*) significará el aumento de la velocidad y capacidad de datos, con volúmenes superiores a 100 Mbps y con velocidades de hasta 10 Gbps, ultra fiables y de baja latencia, y además en escenarios de alta densidad de usuarios [1].

Dado que las longitudes de onda se reducen en un orden de magnitud en *mmWave* en comparación con las frecuencias de microondas usadas actualmente en 4G, la difracción y la penetración del material incurrirán en una mayor atenuación, lo que aumentará la importancia de la propagación, la reflexión y la dispersión [2]. Por tanto, uno de los parámetros más importantes para analizar el desarrollo de los sistemas inalámbricos son las pérdidas de propagación. Además, la implementación de redes 5G depende de la caracterización y el modelado preciso del canal, para mejorar la cobertura y lograr las altas velocidades de transmisión demandadas [3, 4].

Sin embargo, los modelos de propagación requieren de medidas experimentales que incluyan características en entornos de interior o exterior. Además, el despliegue adecuado de las redes 5G en ambientes interiores depende de un estudio cuidadoso del comportamiento del canal, debido a la mayor complejidad en estos entornos.

Los primeros despliegues de 5G a nivel europeo se llevarán a cabo en las bandas de frecuencia por debajo de 1 GHz, en particular la banda de 700 MHz, correspondiente al segundo dividendo digital, junto con la banda de frecuencia de 3,4 a 3,8 GHz [5]. Sin embargo, las altas velocidades de transmisión esperadas en 5G solo se pueden lograr utilizando el espectro en frecuencias superiores a 24 GHz, donde es posible usar anchos de banda mucho mayores.

Se han realizado campañas de medidas tanto en entornos de interior como exterior en algunas bandas típicas de ondas milimétricas [6-11]. Sin embargo, es necesario un estudio más riguroso en las bandas aprobadas por la ITU-R para el despliegue de 5G en *mmWave* y los futuros sistemas 6G.

El objetivo de este proyecto es diseñar e implementar una sonda del canal radio para realizar futuras extensas campañas de medida con la finalidad de caracterizar el canal radio en las potenciales bandas usadas para las comunicaciones 5G en *mmWave* y 6G, junto con la posibilidad de evaluar ciertas tecnologías habilitantes como *massive* MIMO. Además de dar a conocer cuales son los parámetros óptimos para la realización de estas medidas y las posteriores técnicas de procesado.

Esta sonda estará constituida por un analizador de redes vectorial (ARV), un enlace radio sobre fibra (RoF) de banda ancha para aumentar el margen dinámico de las medidas y un sistema de posicionadores para realizar caracterizaciones a pequeña escala. Las medidas para el análisis de los distintos parámetros de la sonda, han sido realizadas en un entorno de laboratorio con condición de visión directa (LOS, *line-of-sight*).

La estructura del trabajo fin de máster se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 describe los efectos de selectividad en espacio-tiempo y frecuencia que introduce el canal radio. En la Sección 3 se presentan las métricas que se utilizan para el análisis de la selectividad y las características del canal radio. En la Sección 4 se explican las distintas técnicas de medida utilizadas en tiempo y frecuencia para la obtención de la respuesta

al impulso del canal. En la Sección 5 se muestra el diseño realizado y el funcionamiento de la sonda de canal, así como su interfaz gráfica y el control del analizador y de los posicionadores. En la Sección 6 se exponen los resultados obtenidos tras la implementación de la sonda, además del análisis de los parámetros principales y sus efectos en las medidas resultantes. También se incluye una comparativa de las técnicas de procesamiento utilizadas posteriormente. Por último, en la Sección 7 se dan a conocer las conclusiones finales y las líneas de investigación futuras.

## 2. El canal radio. Selectividad en tiempo, espacio y frecuencia

En aplicaciones de banda ancha es necesario conocer las consecuencias de la propagación multicamino y la variabilidad con el tiempo del canal radio. Se habla por tanto de la caracterización en banda ancha de canales multicamino. Las variaciones a pequeña escala de una señal de radio móvil pueden estar directamente relacionadas con la respuesta al impulso del canal de radio móvil. La respuesta al impulso es una caracterización de canal de banda ancha y contiene toda la información necesaria para simular o analizar cualquier tipo de transmisión radio a través del canal.

Dado que la señal recibida en un canal multicamino consta de una serie de réplicas atenuadas, retardadas en el tiempo y desplazadas en fase de la señal transmitida, la respuesta al impulso en banda base de un canal multicamino se puede expresar como [12]:

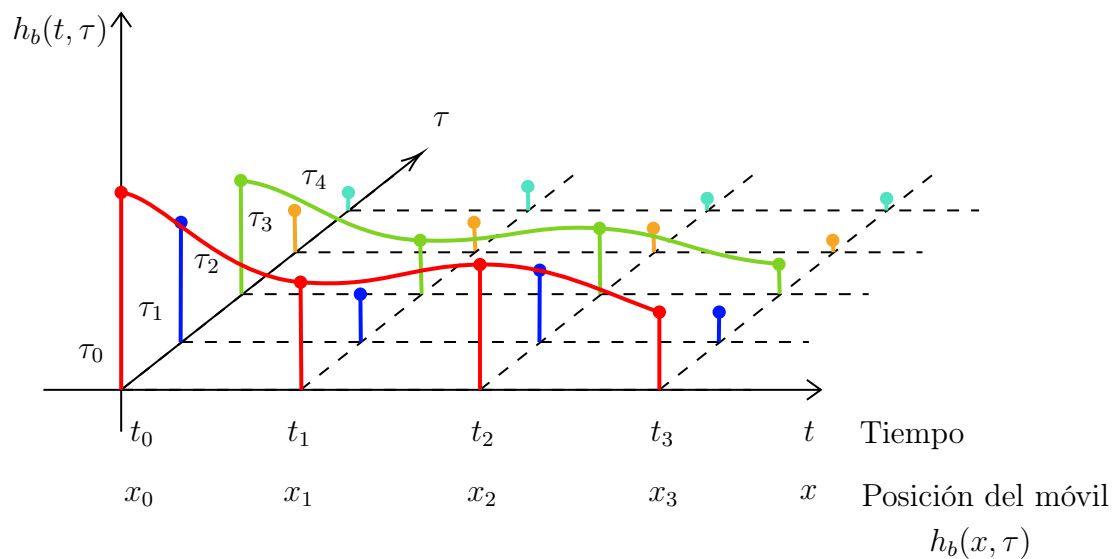
$$h_b(t, \tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i(t) e^{j(2\pi f_c \tau_i(t) + \phi_i(t))} \delta(\tau - \tau_i(t)), \quad (1)$$

donde  $a_i(t)$  y  $\tau_i(t)$  son las amplitudes reales y los retardos en exceso, respectivamente, de la  $i$ -ésima componente multicamino en el instante  $t$ . El término de fase  $2\pi f_c \tau_i(t) + \phi_i(t, \tau)$  representa el desplazamiento de fase debido a la propagación en espacio libre de la componente  $i$ -ésima de los múltiples trayectos, más cualquier desplazamiento de fase adicional que se encuentre en el canal. En general, el término de fase se representa simplemente por una única variable  $\theta_i(t)$ .  $N$  es el número total de contribuciones, y  $\delta(\cdot)$  es la función de impulso unitario que determina los intervalos de trayectos múltiples específicos que tienen componentes en el tiempo  $t$  y retardos en exceso  $\tau_i$ . En la Figura 1 se muestra un ejemplo gráfico de la variación en el tiempo de la respuesta al impulso en un caso discreto para un canal multicamino.

Si se considera que la respuesta al impulso del canal es invariante en el tiempo, o está estacionario durante un intervalo de tiempo o distancia a pequeña escala, entonces la respuesta al impulso del canal se puede simplificar como:

$$h_b(\tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i(\tau) e^{-j\theta_i} \delta(\tau - \tau_i). \quad (2)$$

Al medir  $h_b(\tau)$ , se utiliza en el transmisor un pulso de sondeo  $p(t)$  que se aproxima



**Figura 1:** Ejemplo de la variación en el espacio-tiempo de la respuesta al impulso del canal para un canal multicamino

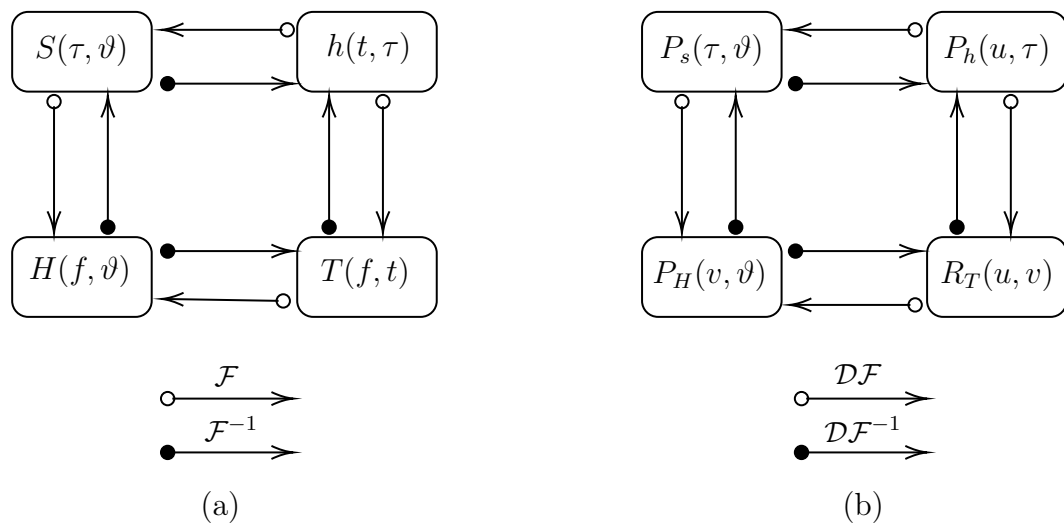
a una función delta. Para el modelado de canales a pequeña escala, el perfil de retardo de potencia del canal se calcula tomando el promedio espacial de  $|h_b(t, \tau)|^2$  sobre un área local. Al realizar varias medidas en dicha área en diferentes posiciones, es posible construir un conjunto de perfiles de retardo de potencia. El perfil de retardo de potencia recibido en un área local viene dado por

$$P(t, \tau) \approx k|h_b(t, \tau)|^2, \quad (3)$$

donde la ganancia  $k$  relaciona la potencia transmitida en el pulso de sondeo  $p(t)$  con la potencia total recibida en el perfil de retardo. Típicamente se promedian muchas instantáneas de  $|h_b(t, \tau)|^2$  sobre un área pequeña para proporcionar un único perfil de retardo de potencia invariante en el tiempo  $P(\tau)$ .

La respuesta al impulso del canal se relaciona mediante transformadas de Fourier con otras funciones de transferencia y de respuesta impulsiva que caracterizan el canal y describen los fenómenos de variación temporal y desplazamiento Doppler. Existen por tanto, cuatro ecuaciones llamadas funciones del sistema o funciones de *Bello* [13] que se relacionan entre sí tal como se ve en la Figura 2a. Pero la caracterización de un canal variable mediante estas funciones es puramente teórica. En la realidad, los canales varían aleatoriamente con el tiempo y las funciones del sistema se convierten en procesos estocásticos. Por tanto, se realiza un estudio aproximado utilizando las funciones de correlación, cuya relación es la misma que las funciones del sistema y se puede ver en la Figura 2b, donde  $u = t_2 - t_1$  y  $v = f_2 - f_1$ , que son parámetros derivados de hacer la correlación.

Estas relaciones son importantes a la hora de medir el canal radio ya que dependiendo de si se mide en el dominio del tiempo o la frecuencia se obtendrá la respuesta impulsional del canal  $h(t, \tau)$  o la función de transferencia cronovariante  $T(f, t)$  respectivamente. Es por eso que a partir de estas funciones obtenidas mediante distintas técnicas de medida se



**Figura 2:** Relaciones de Fourier entre las funciones del sistema (a) y funciones de correlación (b)

llega fácilmente al cálculo posterior del perfil de retardo de potencia (*PDP*, *Power Delay Profile*) y por tanto, al cálculo de distintas métricas usadas en el análisis de la selectividad en tiempo, espacio y frecuencia.

### 3. Métricas para el análisis de la selectividad del canal radio

Muchos parámetros del canal radio se derivan del perfil de retardo de potencia. Los perfiles de retardo de potencia se miden utilizando las técnicas descritas en la Sección 4 y generalmente se representan como gráficos de potencia relativa recibida en función del retardo. Para la caracterización del canal se utilizan algunos parámetros básicos, los cuales se extraen del *PDP* ( $P_h$ ) y de la función de *scattering* ( $P_S$ ).

Para describir la dispersión temporal se utiliza el exceso de retardo medio, el exceso de retardo máximo y la dispersión del retardo rms (*root mean square*), además del ancho de banda de coherencia para describir la selectividad en frecuencia.

Por otro lado, para describir la dispersión en frecuencia se utiliza la dispersión Doppler y el tiempo de coherencia para la selectividad temporal.

#### 3.1. Dispersión temporal y selectividad en frecuencia

Una consecuencia de la propagación multicamino es la llegada al receptor de múltiples ecos con amplitudes, fases y tiempos de llegada distintos. A este efecto se le llama dispersión temporal ya que produce un ensanchamiento del pulso transmitido. Ésta produce, en el dominio del tiempo, interferencia entre símbolos (*ISI*) debido a éste ensanchamiento de los pulsos que provoca que se solapen entre sí, y en el dominio de la frecuencia,

desvanecimiento selectivo en frecuencia.

Las propiedades de dispersión en el tiempo de los canales multicamino se cuantifican más comúnmente por su exceso de retardo medio ( $\bar{\tau}$ ) y su dispersión de retardo rms ( $\sigma_\tau$ ). El exceso de retardo medio es el momento de orden 1 del perfil de retardo de potencia y se define como:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k)\tau_k}{\sum_k P(\tau_k)}. \quad (4)$$

La dispersión de retardo rms es la raíz cuadrada del momento central de orden 2 del perfil de retardo de potencia y se define como:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2}, \quad (5)$$

donde

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k)\tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)}. \quad (6)$$

Estos retrasos se miden en relación con la primera contribución que llega al receptor en  $\tau_0 = 0$ .

El exceso de retardo máximo del perfil de retardo de potencia se define como el retardo de tiempo durante el cual la potencia cae a  $X$  dB por debajo del máximo.

En la práctica, los valores de  $\bar{\tau}$ ,  $\overline{\tau^2}$  y  $\sigma_\tau$  dependen de la elección del umbral de ruido (*threshold*) utilizado para procesar  $P(\tau)$ . El umbral de ruido se utiliza para diferenciar entre las contribuciones multicamino recibidas y el ruido térmico. Si el umbral de ruido se establece demasiado bajo, entonces el ruido se tomará como contribuciones de la señal, dando lugar a valores de dispersión de retardo muy elevados e incorrectos.

Es posible obtener una descripción equivalente del canal en el dominio de la frecuencia. De manera análoga a los parámetros de dispersión del retardo en el dominio del tiempo, el ancho de banda de coherencia se utiliza para caracterizar el canal en el dominio de la frecuencia. La dispersión del retardo rms y el ancho de banda de coherencia son inversamente proporcionales entre sí.

El ancho de banda de coherencia es una medida estadística del rango de frecuencias sobre las que el canal puede considerarse "plano". En otras palabras, el ancho de banda de coherencia es el rango de frecuencias en el que dos componentes de frecuencia tienen un fuerte potencial de correlación de amplitud. Si el ancho de banda de coherencia se define como el ancho de banda sobre el cual la función de correlación de frecuencia es superior a 0.9, entonces el ancho de banda de coherencia es aproximadamente [12]:

$$B_C \approx \frac{1}{50\sigma_\tau}. \quad (7)$$

Si se define una correlación de frecuencia que esté por encima de 0.5, entonces el ancho de banda de coherencia es aproximadamente [12]:

$$B_C \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (8)$$

No existe una relación exacta entre el ancho de banda de coherencia y la dispersión del retardo de rms. En general, se requieren técnicas de análisis espectral y simulación para determinar el impacto exacto que tiene el canal multicamino en el tiempo en una señal transmitida en particular.

### 3.2. Dispersión en frecuencia y selectividad temporal

En cuanto a los efectos debidos a la variabilidad del canal: al transmisor y/o receptor, la señal recibida varía en función del tiempo. Esto produce que el desvanecimiento espacial se transforme en desvanecimiento selectivo en el tiempo. Estas variaciones temporales dan lugar a una dispersión en frecuencia, asociada al desplazamiento Doppler. La dispersión Doppler y el tiempo de coherencia son parámetros que describen la naturaleza variable en el tiempo del canal en una región a pequeña escala.

El ensanchamiento Doppler es una medida del ensanchamiento espectral causado por la tasa de cambio en el tiempo del canal de radio móvil y se define como el rango de frecuencias en las que el espectro Doppler recibido es esencialmente distinto de cero. Cuando se transmite un tono de frecuencia sinusoidal puro, el espectro de la señal recibida, llamado espectro Doppler, tendrá componentes en el rango  $f_c - f_d$  a  $f_c + f_d$  donde  $f_d$  es el desplazamiento Doppler máximo. La cantidad de ensanchamiento espectral depende de  $f_d$ , que es función de la velocidad relativa del móvil y del ángulo  $\theta$  entre la dirección de movimiento del móvil y la dirección de llegada de las contribuciones. Si el ancho de banda de la señal es mucho mayor que  $B_D$ , los efectos de la dispersión Doppler son insignificantes en el receptor, también llamado un canal de desvanecimiento lento (*slow fading*).

El tiempo de coherencia se utiliza para caracterizar la naturaleza variable en el tiempo de la dispersión de frecuencia del canal en el dominio del tiempo. La dispersión Doppler y el tiempo de coherencia son inversamente proporcionales entre sí:

$$T_C \approx \frac{1}{f_m}. \quad (9)$$

El tiempo de coherencia es una medida estadística del tiempo durante el cual la respuesta al impulso del canal es invariante y cuantifica la similitud de la respuesta del canal en diferentes momentos. Si el ancho de banda recíproco de la señal es mayor que el tiempo de coherencia del canal, entonces el canal cambiará durante la transmisión, causando así distorsión en el receptor. Si el tiempo de coherencia se define como el tiempo durante el cual la función de correlación de tiempo está por encima de 0,5, entonces [12]:

$$T_C \approx \frac{1}{16\pi f_m}, \quad (10)$$

donde  $f_m$  es el desplazamiento Doppler máximo definido como  $f_m = v/\lambda$ . Para las comunicaciones digitales modernas se suele definir el tiempo de coherencia como la media geométrica de las ecuaciones (9) y (10):

$$T_C = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_m^2}} = \frac{0,423}{f_m}. \quad (11)$$

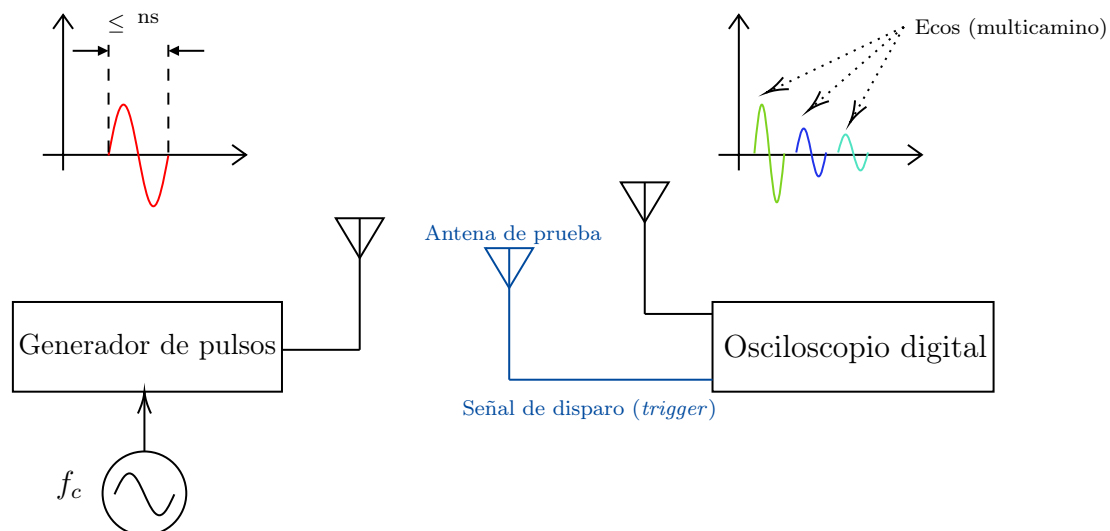
La definición de tiempo de coherencia implica que dos señales que llegan con una separación de tiempo mayor que  $T_C$  se ven afectadas de manera diferente por el canal.

## 4. Técnicas de medida del canal radio

Debido a la importancia de la estructura del canal multicamino para determinar los efectos de desvanecimiento a pequeña escala, se han desarrollado varias técnicas de sondeo o medida de canal de banda ancha. Estas técnicas pueden clasificarse como medidas en el dominio del tiempo, como la caracterización por impulsos y la caracterización por espectro ensanchado; y en el dominio de la frecuencia la estimación de la función de transferencia cronovariable.

### 4.1. Caracterización por impulsos

Una técnica de medida de canal simple es la caracterización por impulsos. Este sistema transmite un pulso repetitivo de un ancho típicamente muy estrecho, del orden de nanosegundos, y utiliza como receptor un osciloscopio digital, tal como se puede ver en el esquema de la Figura 3. Esto da una medida inmediata del cuadrado de la respuesta al impulso del canal convolucionado con el pulso de sondeo. Si el osciloscopio está configurado en modo de promediado, este sistema puede proporcionar un perfil de retardo de potencia promedio local. Otro aspecto positivo de este sistema es la falta de complejidad, ya que se pueden utilizar equipos estándar.



**Figura 3:** Esquema de sistema de medida de caracterización por impulsos

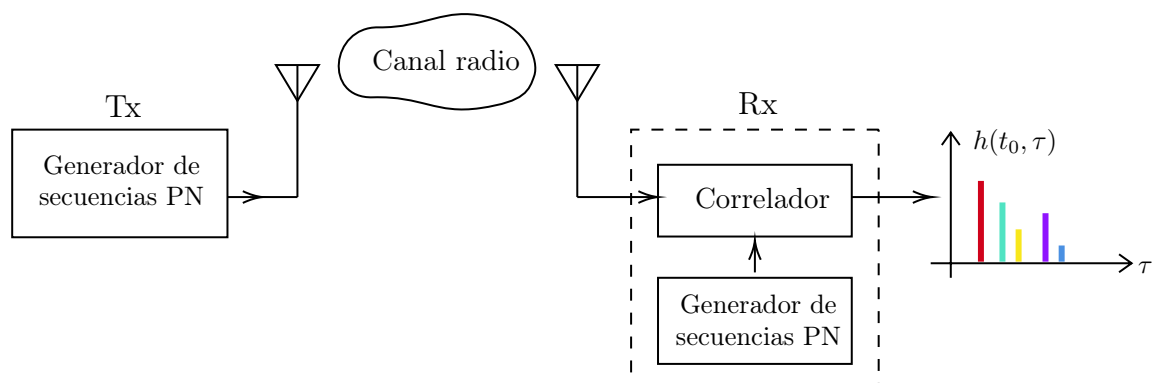
El retardo mínimo que se puede obtener entre la llegada de las contribuciones de trayectos múltiples es igual al ancho del pulso de sondeo. El principal problema de este sistema es que está sujeto a interferencias y ruido, debido al filtro de banda ancha requerido para la resolución de tiempo de las contribuciones. Además, el sistema de pulsos se basa en la capacidad de disparar el osciloscopio en la primera señal que llega. Si la primera señal que llega se bloquea o se desvanece, se produce un desvanecimiento grave y es posible que el sistema no se dispare correctamente. Para ello se puede utilizar una tercera antena que actúe como disparo de la captura de la medida. Esta antena captará la primera contribución multicamino y eso activará una señal de disparo para indicar al osciloscopio que empiece a realizar las capturas de las tramas. En ocasiones se puede prescindir de esta antena y hacer una captura o varias consecutivas en el tiempo y posteriormente mediante técnicas de procesado, sincronizar las distintas tramas para realizar el promediado.

Otra desventaja es que las fases de las contribuciones multicamino no se reciben debido al uso de un detector de envolvente. Sin embargo, el uso de un detector coherente permite medir la fase de trayectos múltiples utilizando esta técnica.

Se pueden encontrar distintos equipos generadores de pulsos que permiten modificar la frecuencia, el ancho y la forma del pulso. Si este generador de pulsos es del orden de nanosegundos necesitamos también osciloscopios digitales con una frecuencia de muestreo muy elevada para poder tener una buena resolución en la respuesta impulsional.

## 4.2. Caracterización por espectro ensanchado

La técnica de caracterización por espectro ensanchado es la otra técnica que se puede utilizar en el dominio del tiempo. Con esta técnica se transmite una secuencia pseudo aleatoria, una secuencia de pseudo ruido. Esa secuencia se propaga por el canal y llega al receptor. En recepción se hace la correlación de la señal recibida con la secuencia de pseudo ruido que transmitida y lo que se obtiene a la salida es la respuesta impulsional del canal radio. Esta es la técnica que se suele utilizar en la mayor parte de los terminales radio para hacer una estimación del canal.



**Figura 4:** Esquema del sistema de medida de la respuesta al impulso del canal por espectro ensanchado

La secuencia de pseudo ruido que se transmite es una secuencia de longitud de  $N$



símbolos (chips) y en recepción se realiza la autocorrelación. La salida del correlador se muestrea a la tasa de chip utilizada y cada valor representará el retardo introducido por el canal. La resolución de esa respuesta impulsional será inversamente proporcional a la tasa de chip, por lo tanto, cuando el chip tenga una duración temporal muy pequeña la resolución temporal será mayor.

El máximo retardo detectable sin alias será  $N$  veces el tiempo de chip ( $NT_c$ ), siendo  $T_c$  el tiempo de chip. Esto es importante a la hora de seleccionar la longitud de la secuencia de pseudo ruido ya que para canales muy dispersivos esta secuencia deberá ser muy larga para tener una buena resolución.

La ventaja de un sistema de espectro ensanchado es que, si bien la señal de sondeo puede ser de banda ancha, es posible detectar la señal transmitida utilizando un receptor de banda estrecha precedido por un mezclador de banda ancha, mejorando así el margen dinámico del sistema en comparación con el sistema de caracterización por impulsos. Además, las potencias requeridas del transmisor pueden ser considerablemente más bajas que las de los sistemas anteriores.

Una desventaja del sistema de espectro ensanchado, en comparación con el sistema anterior, es que las medidas no se realizan en tiempo real, y se requiere un procesamiento posterior. Según los parámetros del sistema y los objetivos de la medida, el tiempo necesario para realizar las medidas del perfil de retardo de potencia puede ser excesivo. Otra desventaja del sistema es que se utiliza un detector no coherente, de modo que no se pueden medir las fases de las contribuciones multicamino. Incluso si se usa la detección coherente, el tiempo de barrido de una señal de espectro ensanchado introduce un retardo tal que las fases de las contribuciones multicamino con retardos de tiempo diferentes se medirían en distintos momentos de tiempo, durante los cuales el canal podría cambiar.

### 4.3. Caracterización del canal en el dominio de la frecuencia

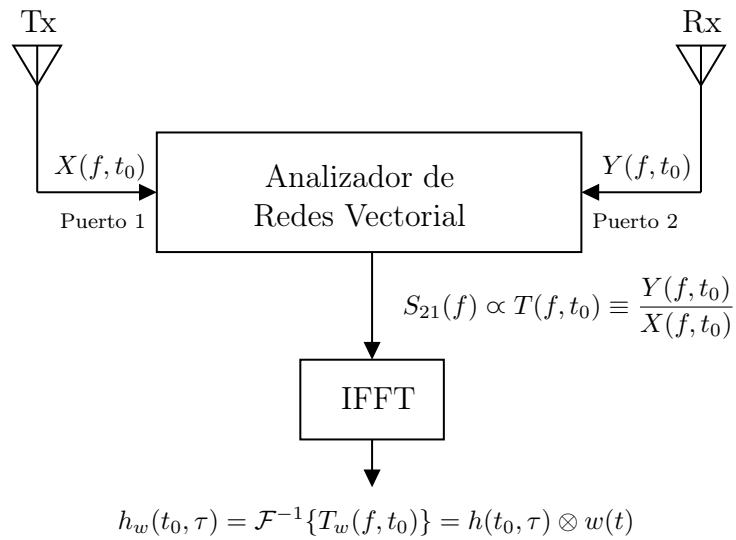
Debido a la relación entre el dominio del tiempo y la frecuencia tal como se ha visto en la Figura 2, es posible medir la respuesta al impulso del canal en el dominio de la frecuencia. La Figura 5 muestra una sonda de canal en el dominio de la frecuencia utilizada para medir la función de transferencia cronovariante del canal.

La antena transmisora se conecta al puerto 1 y la antena receptora se conecta al puerto 2, de esta manera podemos medir el parámetro  $S_{21}(f)$ . Este parámetro es proporcional a la función de transferencia del canal en el instante  $t_0$

$$S_{21}(f) \propto T(f, t_0) \equiv \frac{Y(f, t_0)}{X(f, t_0)}. \quad (12)$$

El analizador de redes vectorial controla un barrido de frecuencia en una banda en particular (centrada en la portadora) pasando por frecuencias discretas, por tanto lo que se mide es la función de transferencia enventanada en una ventana rectangular. Esto es así porque se mide desde una frecuencia inicial hasta una final, por lo que hay un efecto de enventanado.

$$T_w(f, t_0) = T(f, t_0)W(f). \quad (13)$$



**Figura 5:** Esquema de un sistema de medida del canal en el dominio de la frecuencia

Esta respuesta luego se convierte al dominio del tiempo usando la transformada inversa de Fourier, resultando así una versión de banda limitada de la respuesta al impulso del canal. Esta proporciona información de amplitud y fase en el dominio del tiempo:

$$h_w(t_0, \tau) = \mathcal{F}^{-1}\{T_w(f, t_0)\} = h(t_0, \tau) \otimes w(t). \quad (14)$$

A partir de la medida de la respuesta impulsional podemos obtener el perfil de retardo de potencia en el instante  $t_0$  calculando el módulo al cuadrado:

$$PDP(t_0, \tau) = |h_w(t_0, \tau)|^2, \quad (15)$$

y si se realizan varias medidas en el tiempo o en posiciones muy próximas en términos de longitud de onda, se puede calcular el *PDP* promedio como el promediado de los *PDP* individuales:

$$PDP(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N PDP(t_i, \tau). \quad (16)$$

El barrido en frecuencia que realiza el analizador de redes lo hace a través de una senoide desde una frecuencia inicial hasta una frecuencia final y esa diferencia se denomina *SPAN*. La resolución en frecuencia de la medida viene determinada por el *SPAN* y el número de puntos como:

$$\Delta f = \frac{SPAN}{N - 1}, \quad (17)$$

siendo  $N$  el número de puntos. El retardo máximo que se podrá obtener en la medida vendrá determinado por dicha resolución

$$\tau_{\text{máx}} = 1/\Delta f. \quad (18)$$

Además, afecta a la resolución temporal y espacial de la medida de la respuesta al impulso de la siguiente manera:

$$\Delta\tau = 1/SPAN, \quad (19)$$

$$\Delta l = c_0\Delta\tau. \quad (20)$$

Si se utiliza un SPAN muy grande la resolución en el tiempo es muy buena y a medida que el SPAN se va reduciendo la resolución temporal empeora y los distintos ecos empiezan a solaparse unos con otros. Hay equipos que permiten hacer directamente la IFFT y por tanto se obtendría la respuesta impulsional del canal enventanada. Si el equipo no lo tiene, la alternativa es grabar las trazas medidas y, por ejemplo con MATLAB realizar la IFFT.

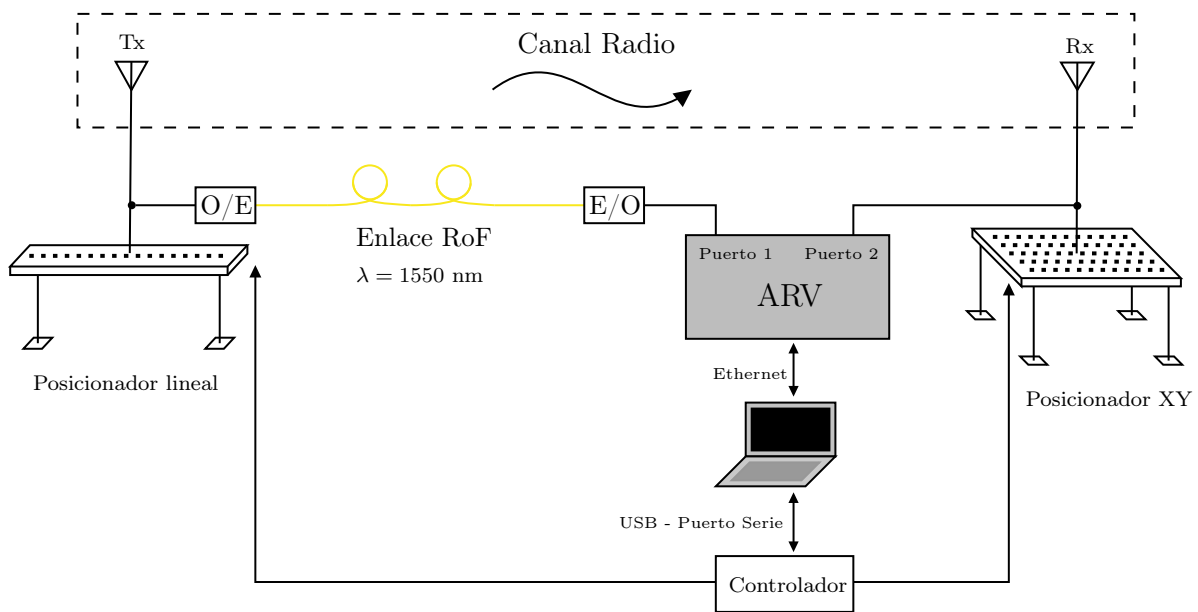
Durante el tiempo de medida se deben garantizar condiciones de estacionariedad en el canal, es decir, todo tiene que permanecer estático (sin gente moviéndose o elementos que puedan alterar la medidas durante ese tiempo). También se debe tener en cuenta que los cables utilizados en el analizador de redes introducen pérdidas adicionales, además de evitar usar amplificadores porque pueden ocasionar reflexiones que podríamos confundir con contribuciones multicamino. En la banda de milimétricas por encima de 30 GHz, donde las atenuaciones son muy grandes, una alternativa es sustituir los cables coaxiales por enlaces de radio sobre fibra (RoF). Esta opción ha sido la elegida para la implementación de la sonda de canal diseñada en este proyecto, ya que ofrece grandes ventajas, incluyendo en el enlace RoF cuando la distancia de separación entre la antena transmisora y la receptora es muy grande y/o se miden en bandas de frecuencia muy elevadas.

## 5. Diseño e implementación de una sonda de canal en el dominio de la frecuencia

La implementación de la sonda consta de distintos equipos. En este caso, se ha utilizado un analizador de redes vectorial, en concreto el modelo N5227A de *Keysight Technologies* de dos puertos disponible en el laboratorio; además de dos posicionadores, uno lineal (con un eje) y otro posicionador XY (con dos ejes), controlados por el sistema C4/MD-2 de *Arrick Robotics*. En estos posicionadores van situadas las antenas transmisora y receptora, montadas sobre un mástil. Por último, para realizar el enlace entre la antena transmisora y el puerto 1 del analizador de redes, se ha utilizado un enlace RoF compuesto por un convertor electro-óptico situado a la salida del analizador, seguido por un cable de fibra óptica y un convertor óptico-eléctrico a la entrada de la antena transmisora.

En la Figura 6 se muestra un esquema detallado de la sonda de medida con todos los elementos utilizados y su conexión. Para el control automatizado del analizador de redes y el sistema de posicionadores, se ha diseñado una interfaz gráfica de usuario con la que se puede fácilmente seleccionar los parámetros para las medidas en el analizador, y automatizar los movimientos de los posicionadores para crear una matriz o vector de posiciones donde se vaya a medir el canal.

Esta interfaz se puede utilizar desde cualquier ordenador, siendo más ventajoso el uso de un ordenador portátil por su ligereza y su fácil transporte.



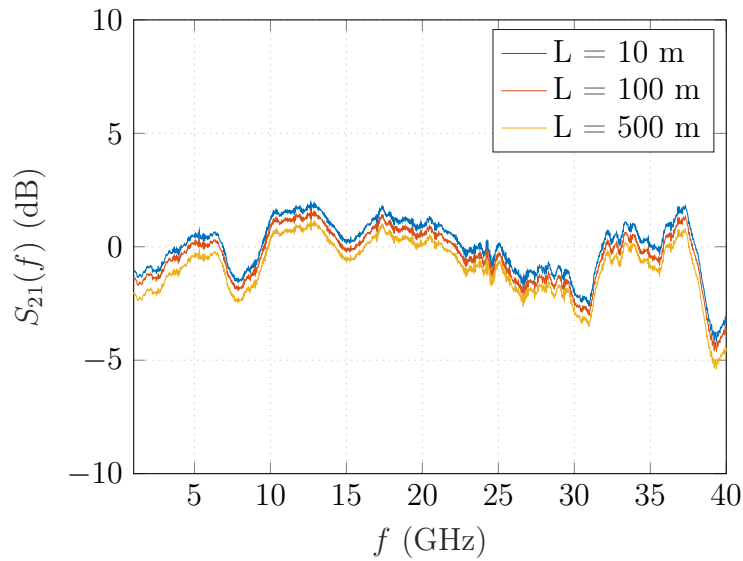
**Figura 6:** Esquemático de la sonda de canal

Respecto a los conversores electro-ópticos del enlace RoF, DAS Photonics RX4005, funcionan en la banda de 1 a 40 GHz y proporcionan una ganancia entorno a 0 dB en toda la banda. La ventaja principal es que, debido a las mínimas pérdidas de la fibra óptica en tercera ventana ( $\approx 0,2$  dB/km a  $\lambda = 1550$  nm), las distancias de separación entre las antenas pueden ser mucho mayores a si se utiliza un cable coaxial, con el que se obtendrían muchas más pérdidas y sería imposible medir el canal con distancias muy grandes entre la antena transmisora y la receptora. En la Figura 7 se muestra la respuesta real medida del enlace RoF utilizando distintas longitudes de fibra óptica. Como se puede observar, la ganancia está entorno a 0 dB en toda la banda de frecuencias y la diferencia entre usar una fibra de 10 y 500 m (disponibles en el laboratorio) es menor a 1 dB.

### 5.1. Diseño y funcionamiento de la interfaz gráfica

El diseño de la aplicación para controlar el ARV y los posicionadores se ha realizado con la herramienta *App Designer* de MATLAB, ya que permite manejar fácilmente el uso de matrices y datos, la representación de datos, la implementación de algoritmos y la comunicación con otros dispositivos hardware. A diferencia de la anterior herramienta de MATLAB para el diseño de aplicaciones, GUIDE, esta nueva versión ofrece una mayor integración entre el diseño visual de la aplicación y el código, además de ser una plataforma más renovada y más atractiva para el usuario. También contiene una gama de componentes más grande y una programación del código más fácil e intuitiva.

A continuación, se van a detallar el diseño y el funcionamiento de las dos partes principales de la aplicación: el control del analizador de redes y el control de los dos posicionadores que se disponen.



**Figura 7:** Respuesta  $S_{21}(f)$  del enlace RoF para distintas longitudes de fibra óptica.

### 5.1.1. Control del analizador de redes vectorial

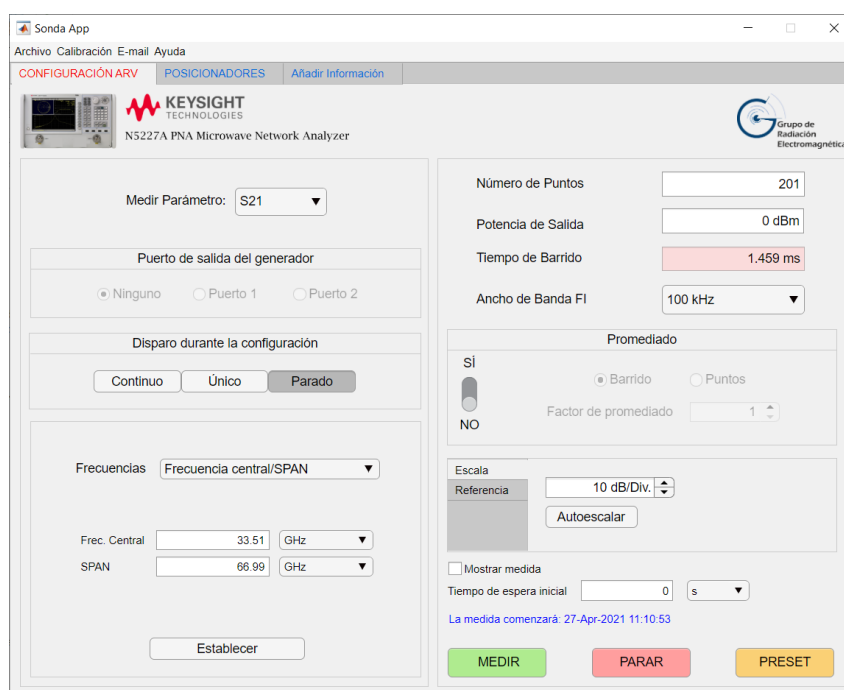
La comunicación con el analizador de redes se realiza a través de una conexión con cable *Ethernet*, por lo que la creación de un objeto VISA TCP/IP permite el envío de instrucciones a través de comandos SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*). Este tipo de comandos se utilizan para controlar dispositivos de prueba y medida programables, como el analizador de redes. Los comandos SCPI son cadenas de texto ASCII, que se envían al instrumento a través de la capa física (por ejemplo, IEEE-488.1). Los comandos son una serie de una o más palabras clave seguidas de los parámetros de configuración adecuados.

Una vez iniciamos la aplicación, ésta comprueba si la conexión con el analizador de redes es correcta. Si no es correcta la conexión aparecerá un mensaje de error en el que permite volver a intentar realizar la conexión con el analizador o abandonar la aplicación.

Una vez la aplicación se haya conectado al analizador de redes, se realizará un reinicio de éste y mostrará una pantalla con la configuración de sus parámetros. En la Figura 8 se muestra esta pantalla principal, donde se pueden cambiar los parámetros que se muestran según la medida que se vaya a realizar. El control del analizador de redes es independiente del uso de los posicionadores, por lo que la aplicación permite hacer cualquier tipo de medida simple sin utilizarlos.

Entre los parámetros que permite configurar se encuentran el parámetro de medida, que puede ser cualquiera de los parámetros de dispersión además de algunos parámetros de potencia y el puerto de salida de ésta. También permite controlar el disparo o *trigger* del analizador mientras se configuran los parámetros.

Entre los parámetros principales se encuentran la frecuencia inicial y final de la medida, o la frecuencia central y el SPAN (ancho de banda), o por el contrario la frecuencia central si se desea medir en onda continua, donde se realiza una medida a una única frecuencia

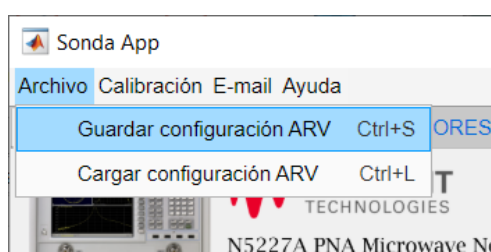


**Figura 8:** Pantalla principal de la configuración del analizador de redes.

durante un tiempo determinado o un número de trazas.

Seguidamente, se pueden elegir el número de puntos de la medida, la potencia de salida del analizador y el ancho de banda de frecuencia intermedia. Según la configuración del número de puntos y el ancho de banda FI la aplicación mostrará el tiempo de barrido que tomará una medida de una traza simple. Además se puede configurar la medida con un factor de promediado, por barrido o por puntos. La elección de estos parámetros para el análisis del canal radio se analiza en la sección de resultados, ya que es imprescindible conocer cual es la configuración óptima del analizador de redes para obtener una buena resolución de la medida, con la mejor relación señal a ruido posible.

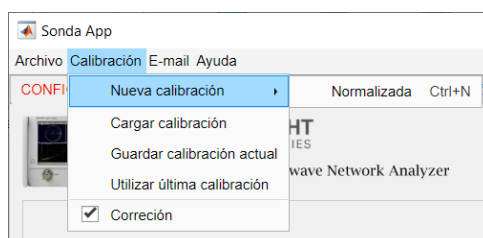
Otras opciones que se han considerado añadir a la aplicación son las que se muestran en la barra superior. En la Figura 9 se ve la opción “Archivo”, donde se puede elegir entre guardar la configuración actual que haya en la aplicación, o cargar una configuración guardada previamente en el ordenador.



**Figura 9:** Opciones disponibles para cargar/guardar una configuración del ARV.

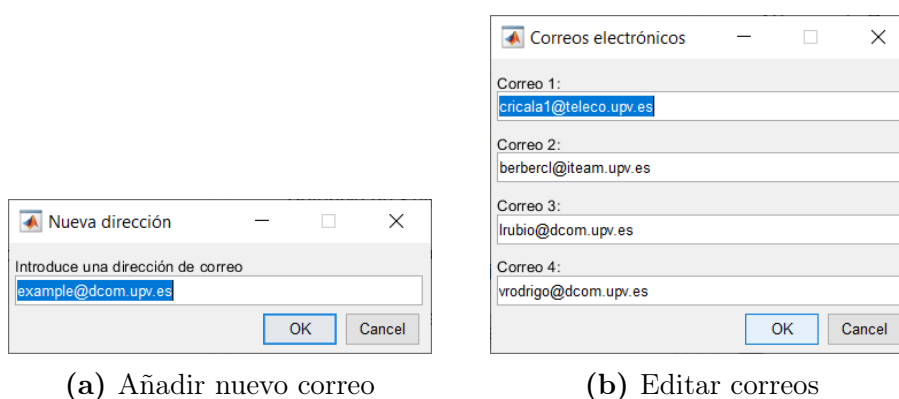
Seguidamente, en la pestaña de la derecha se puede realizar una calibración de tipo

normalizada desde la aplicación, además de guardar la calibración actual o cargar una que se haya guardado previamente. También se puede cargar la última calibración existente en el analizador de redes y desactivar o activar la corrección que se realiza al calibrar, tal como se ve en la Figura 10.



**Figura 10:** Opciones disponibles relacionadas con la calibración del ARV.

La tercera opción consiste en añadir o editar las direcciones de correo electrónico para recibir notificaciones por parte de la aplicación de sonda de cuando empieza y finaliza una medida, con informaciones referentes a dicha medida que se está realizando. En la Figura 11 se muestran las opciones de añadir un nuevo correo o editar los correos existentes configurados por el usuario.



(a) Añadir nuevo correo

(b) Editar correos

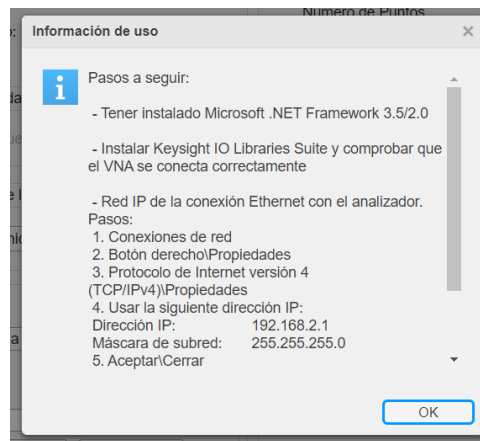
**Figura 11:** Configuración del correo eléctrico para recibir avisos.

Por último, en la Figura 12 se muestra una ventana de información que aparece al pulsar en el apartado de Ayuda, donde se sugieren algunos pasos para el correcto uso de la aplicación.

Mientras se vayan configurado todos estos parámetros, se puede cambiar la escala de la pantalla del analizador, para mejorar la visualización de la medida.

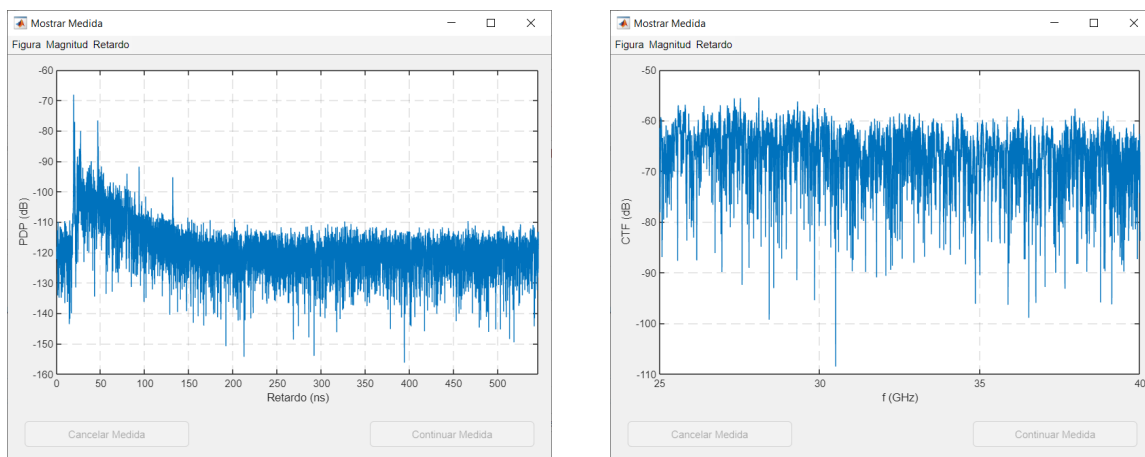
Una vez configurados todos los parámetros, ya se puede realizar una medida dándole al botón MEDIR. Esta medida sería sin utilizar ningún posicionador, y se puede programar para una hora determinada retrasando su comienzo.

Si se desea ver el perfil de retardo de potencia o la función de transferencia del canal en la pantalla del ordenador, se puede marcar la casilla de “Mostrar medida”, y una vez se haya realizado la medida y guardado, la aplicación mostrará una segunda pantalla con el PDP medido, con la opción de mostrarlo en logarítmico o lineal, y también cambiar



**Figura 12:** Información de ayuda para utilizar la aplicación

a la opción de ver la función de transferencia de canal, además de poder guardar una imagen de la figura. En la Figura 13a se muestra un ejemplo de una medida realizada y posteriormente lo que el programa ha mostrado por pantalla, en este caso el PDP, y en la Figura 13b lo que muestra cuando se selecciona mostrar la función de transferencia del canal, en este caso en parámetro  $S_{21}(f)$  medido con el analizador.



(a) PDP

(b) CTF

**Figura 13:** Ejemplo del funcionamiento de “Mostrar medida”

### 5.1.2. Control del sistema de posicionadores

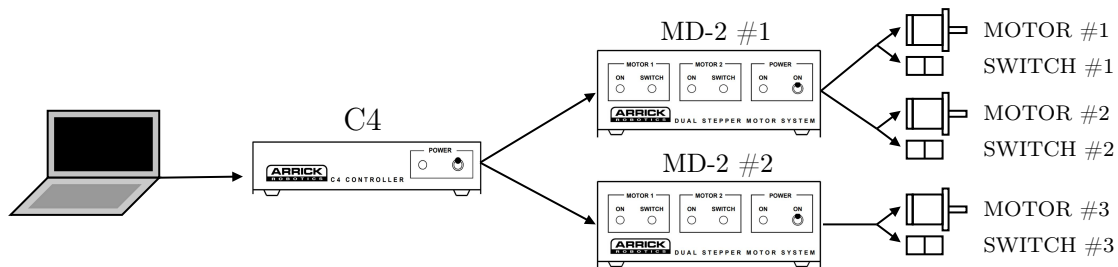
Además de realizar medidas únicamente con el analizador de redes, se tiene la opción de utilizar los posicionadores, posibilitando así realizar medidas SIMO, MISO y MIMO en distintas zonas o áreas.

La comunicación con los posicionadores se realiza a través de un controlador llamado *C4 Controller*. Este está conectado al ordenador a través de un puerto serie con un



convertor a USB, lo que permite una programación más sencilla mediante el envío de unas instrucciones predeterminadas a través de la creación de un objeto tipo puerto serie (**serialport**). A su vez, este controlador está conectado a otros dos controladores llamados MD-2 *Dual Stepper Motor System*, que están conectados directamente a los motores e interruptores de los posicionadores a través de conectores de 9 pines. Cada módulo MD-2 puede controlar dos motores y dos interruptores, y a su vez, con un solo módulo C4 se pueden controlar dos MD-2, que se traduce en cuatro motores y cuatro interruptores a través de una única conexión y un objeto puerto serie.

En el caso de la sonda implementada, únicamente se controlan tres motores y tres interruptores, ya que el posicionador XY contiene dos ejes, y el posicionador lineal solo uno. En la Figura 14 se detalla la conexión entre el ordenador y el sistema de control de los posicionadores con todos los módulos.



**Figura 14:** Esquema de la conexión entre el ordenador y el sistema de control de los posicionadores

A la hora de configurar los posicionadores para las medidas en la aplicación, seleccionando en la pestaña superior correspondiente aparecerá un menú de botones como el de la Figura 15, donde la diferencia entre ellos es el número de posicionadores que se van a utilizar para crear un barrido de posiciones con ellos.

Por ejemplo, si se selecciona una medida MIMO, se puede utilizar el posicionador lineal para crear una configuración ULA (*Uniform Linear Array*) y el posicionador XY para crear una configuración URA (*Uniform Rectangular Array*), tal como se muestra en la Figura 16.

Una vez se haya seleccionado el tipo de medida, se podrán elegir los parámetros para formar la matriz o vector de posiciones. En el caso del ULA, se permite elegir el número de columnas y la separación entre estas en milímetros. En el caso del URA existen más opciones, ya que permite realizar una rejilla de posiciones cuadrada o rectangular, indicando el número de filas y columnas y la separación en milímetros entre ellas; también permite crear una rejilla circular introduciendo el radio de la circunferencia y el número de puntos que la forman. En el caso de querer realizar algún barrido distinto, también se puede cargar un fichero con los datos de las posiciones  $x$  e  $y$  de la matriz.

Estas matrices o vectores de posiciones tienen como centro el punto central de la mesa o del posicionador lineal, respectivamente. Además, se han determinado distintos centros donde realizar dichas matrices y vectores. En la Figura 17 se puede ver, a la izquierda, que para el posicionador lineal se han determinado tres centros distintos, y para el posicionador

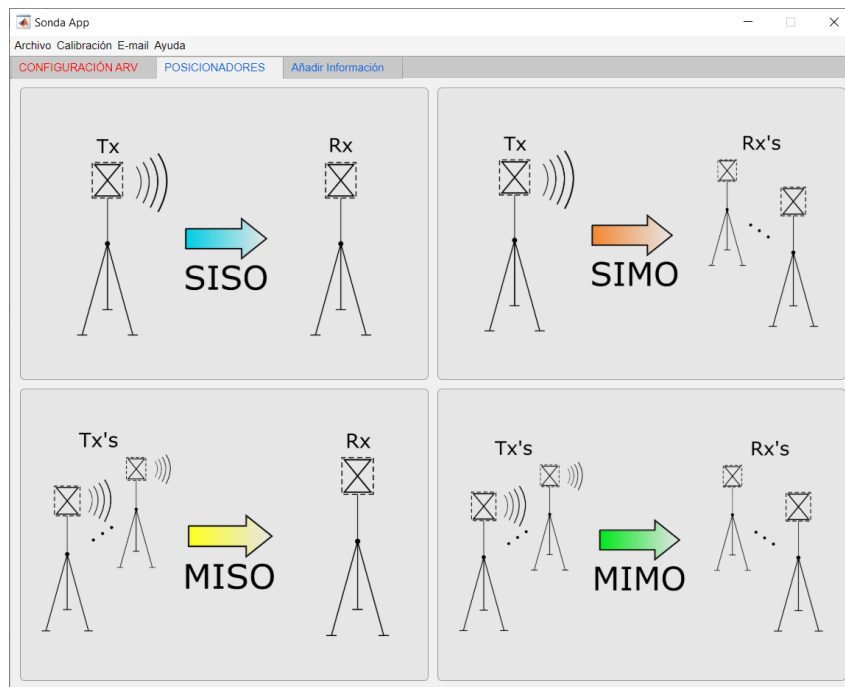
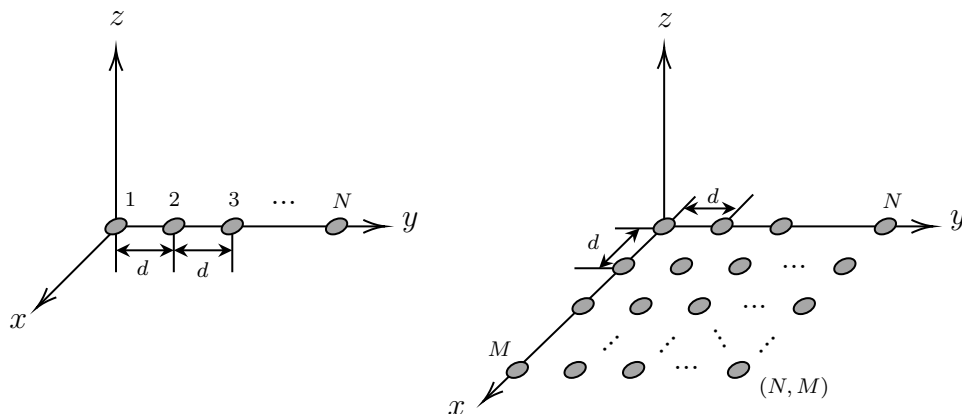


Figura 15: Pantalla de selección para la configuración de los posicionadores



(a) ULA (*Uniform Linear Array*)      (b) URA (*Uniform Rectangular Array*)

Figura 16: Ejemplo de configuraciones ULA y URA

XY, a la derecha, nueve centros distintos. Según el centro de la medida elegido, la matriz o vector podrá tener una dimensión total más grande o más pequeña, ya que si se selecciona un centro situado en una esquina de la mesa, la matriz podrá tener unas dimensiones como mucho de una novena parte de dicha mesa. El movimiento de barrido por dichas posiciones podrá ser en sentido normal (desde la posición inicial a la final) y en sentido inverso (desde la posición final a la inicial) siendo la posición inicial  $(1, 1)$  y la posición final  $(N, M)$  con  $N$  columnas y  $M$  filas. Además, para el posicionador XY este barrido podrá realizarse

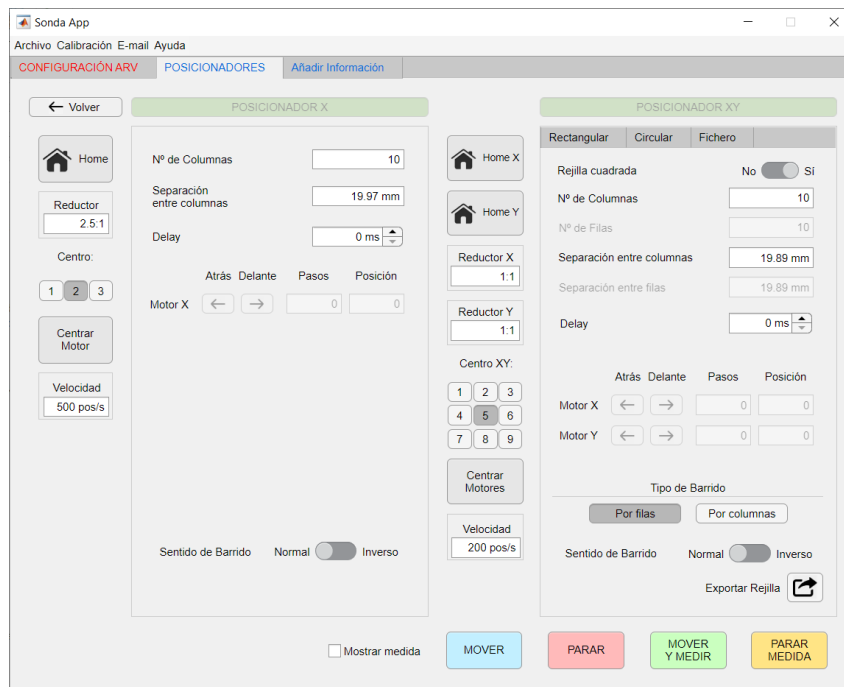


Figura 17: Configuración de los posicionadores para una medida MIMO

por filas o por columnas.

Con respecto a los posicionadores, se pueden configurar algunos de sus parámetros como la velocidad de los motores, en posiciones por segundo, y la relación de reducción, ya que es posible utilizar reductores para los motores. Si no se utiliza reductor, la distancia de separación mínima entre dos posiciones consecutivas es de 0,1267 mm, lo que permite configurar una matriz de 6000x6000 posiciones en el posicionador XY y un vector de 11760 posiciones en el posicionador lineal. Tal como se ve en la Figura 17 se está utilizando actualmente un reductor 2.5:1 para el posicionador lineal, lo que permite una resolución entre posiciones de 50.68  $\mu\text{m}$  y un vector total de 29400 posiciones a lo largo del posicionador.

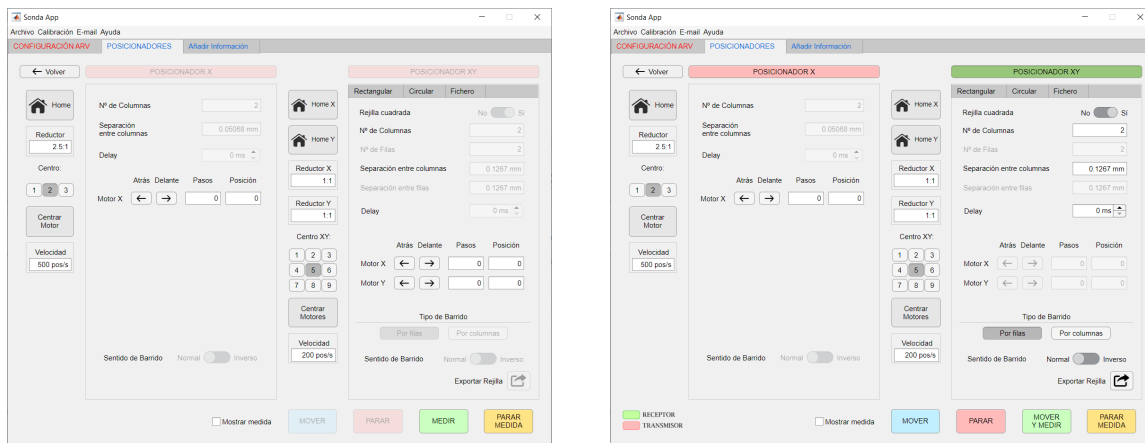
Otras opciones que permite el programa es mover independientemente los posicionadores a las posiciones de *home*, acción que realiza la aplicación automáticamente al iniciar una medida para calibrar los posicionadores, y a la posición central elegida.

Por último, permite elegir un tiempo de espera o retardo (*delay*) entre cada posición de la rejilla configurada. Esto ayuda a evitar el balanceo del mástil que sujeta la antena, ya que el movimiento y frenado de la plataforma del posicionador donde se encuentra el mástil con la antena, puede moverse más o menos rápido, generando así que cuando se pare en una posición para realizar una medida, si el mástil es muy largo o algo inestable, exista un balanceo indeseado de dicho mástil que puede afectar a la medida, donde todo debe estar estático.

Respecto a los otros tipos de medida, en la Figura 18a se puede ver la configuración para una medida SISO, donde es posible utilizar los dos posicionadores, pero únicamente permite moverlos a una posición determinada introduciendo el número de pasos o la

posición directamente de cada uno de los motores, además del resto de la configuración como la velocidad o la reducción del motor. Lo único que no permite es realizar una matriz o vector de posiciones ya que una medida SISO consiste únicamente en medir en una posición. Este tipo de medida también se podría realizar poniendo las antenas sobre dos trípodes.

Los dos últimos menús disponibles, SIMO y MISO, permiten realizar una rejilla de posiciones únicamente con uno de los posicionadores, pudiendo elegir cualquiera siempre que estén conectados. El otro posicionador se podría utilizar, como en SISO, en una única posición, sin movimiento, o simplemente utilizando un trípode en su lugar. Este tipo de configuración se muestra en la Figura 18b.



(a) Menú SISO

(b) Menú SIMO/MISO

**Figura 18:** Resto de menús para la configuración de los posicionadores

Una vez se haya elegido el tipo de medida y su configuración, incluyendo la del analizador de redes y la de los posicionadores, para comenzar a medir únicamente se selecciona el botón MOVER Y MEDIR. Si se ha marcado la casilla de mostrar medida, los posicionadores se moverán a la primera posición, se realizará una medida y ésta aparecerá por pantalla tal como en la Figura 13, pero en este caso estarán activos los botones inferiores, donde se da la opción de continuar con el resto de la medida o cancelarla. Esto es útil para observar que todo se está realizando correctamente y sin errores antes de lanzar una medida muy larga.

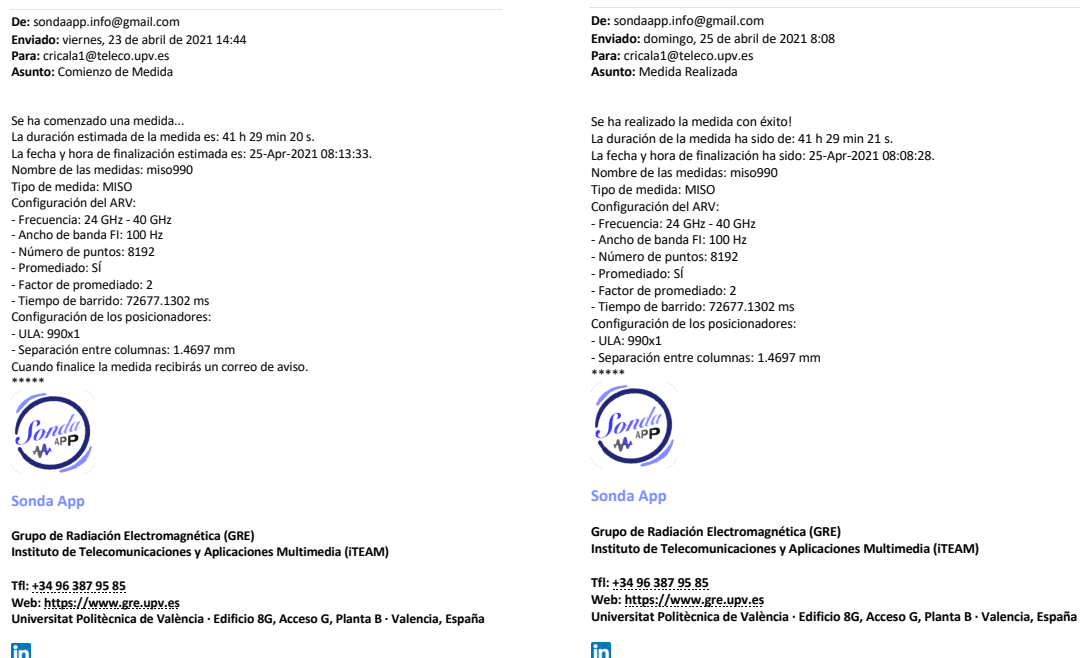
Si se ha elegido continuar con la medida, o la casilla de mostrar medida no ha sido marcada, el programa mostrará una barra de proceso donde muestra la posición en la que está midiendo, el tiempo estimado total de la medida, y la hora de finalización estimada. Esta estimación se realiza a partir de la duración de la medida en la primera posición y el tiempo que ha tardado en ir de una posición a la siguiente.

Además, el programa envía un correo electrónico cuando comienza una medida, con la información general de la configuración, la duración estimada y la fecha y hora de finalización estimada, ya que estas medidas pueden tomar muchas horas o días, y es necesario tener una estimación de cuando van a finalizar. También es posible realizar una medida desde fuera del entorno donde se vaya a medir, conectándose remotamente al ordenador

que controla la sonda, por lo que también es útil recibir un correo de confirmación de que la medida lanzada ha comenzado correctamente.

Cuando la medida finaliza, también se envía otro correo de confirmación, con la duración real de la medida y la fecha y hora de finalización, además de la información general. En este momento ya se puede acceder a las medidas que se hayan generado, guardadas en una carpeta de red compartida del analizador de redes a la que se puede acceder desde el ordenador. También se habrá generado un archivo de texto con toda la información relevante sobre la medida e información que se haya querido añadir a través de la pestaña “Añadir información” de la aplicación.

Un ejemplo del contenido de los correos de comienzo y finalización de una medida se pueden ver en la Figura 19, donde se realizó una medida MISO utilizando el posicionador lineal, con una duración total de unas 41 horas.



(a) Comienzo de medida

(b) Finalización de medida

**Figura 19:** Correos de aviso de inicio y finalización de una medida

## 6. Resultados

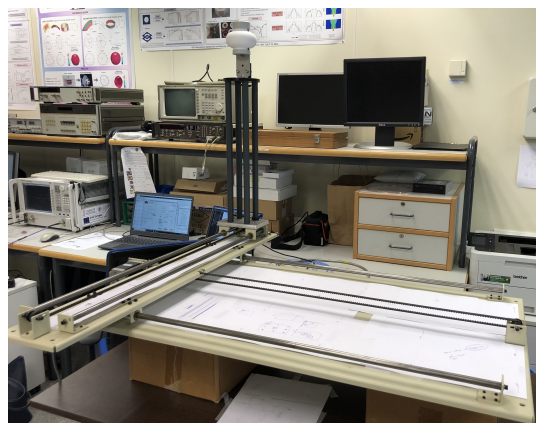
En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras hacer distintos tipos de medidas con la sonda y analizar cuales son los parámetros óptimos para el analizador de redes vectorial con el fin de obtener la mayor calidad de la medida posible y sin errores. Además también se analiza la aplicación de las distintas técnicas de procesado sobre las medidas realizadas.

## 6.1. Implementación de la sonda

La implementación de la sonda se ha llevado a cabo en el laboratorio del grupo Antenas and Propagation Lab del iTEAM. Tal como se expone en el esquema de la Figura 6, para la implementación de la sonda se han utilizado el analizador de redes vectorial, el sistema de posicionadores y el enlace electro-óptico descritos anteriormente. Además, las antenas utilizadas en el transmisor y receptor son antenas omnidireccionales de banda ultraancha, en concreto el modelo QOM-SL-0.8-40-K-SG-L de la empresa Steatite Ltd. Operan de 800 MHz a 40 GHz y tienen polarización vertical. En la Figura 20 se pueden ver los dos posicionadores utilizados con sus respectivas antenas sobre un mástil diseñado específicamente para ello.



(a) Posicionador lineal



(b) Posicionador XY

**Figura 20:** Posicionadores utilizados en el laboratorio para realizar medidas con sus respectivas antenas

Las medidas se han realizado en un entorno de laboratorio, con condición de visión directa entre las antenas transmisora y receptora. Debido a la presencia de numerosos objetos metálicos, este entorno es abundante en reflexiones multicamino.

En el siguiente apartado se exponen los resultados de la comparación de las distintas medidas variando los parámetros principales del analizador de redes. Para ello, las medidas se han realizado en el rango de frecuencias de 25 a 40 GHz para analizar los distintos parámetros en la banda de milimétricas.

## 6.2. Análisis de los parámetros principales de la sonda

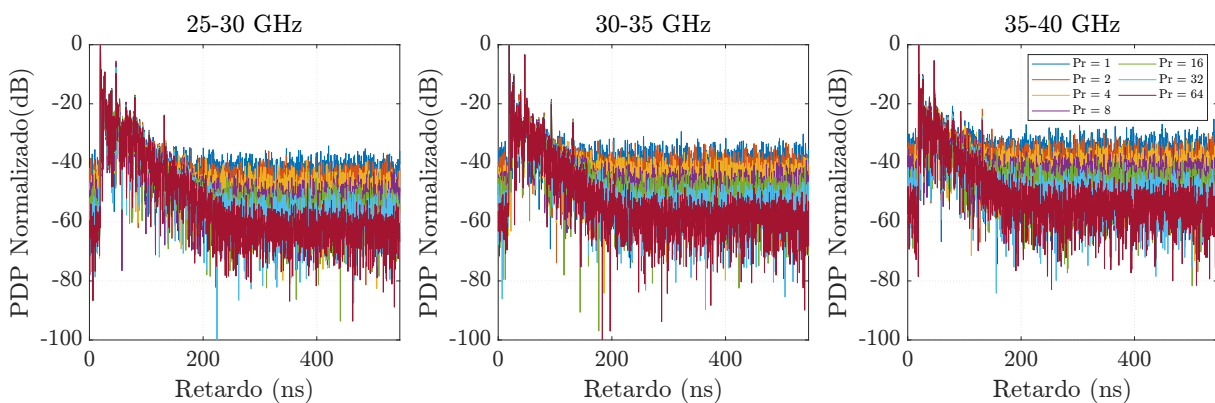
Para obtener unos buenos resultados en una extensa campaña de medidas, primero hay que saber que consecuencias tendrá elegir unos parámetros u otros a la hora de configurar el analizador de redes. Los parámetros analizados son el factor de promediado, el ancho de banda de frecuencia intermedia, la potencia y el número de puntos. Para obtener un análisis completo de cómo afectan estos parámetros a las medidas, se han calculado las distintas métricas del canal a partir del perfil de retardo de potencia para ver la dispersión temporal y la selectividad en frecuencia. Para ello se ha calculado el ancho de banda de



coherencia para una correlación del 70 y 90 % y la dispersión del retardo para tres bandas de frecuencia distintas: 25-30 GHz, 30-35 GHz y 35-40 GHz. Para ello se ha utilizado un umbral de -40 dB y una ventana de Blackman, ya que aporta buenos resultados.

A continuación, se evalúa el efecto de aplicar promediado a una medida, variando el factor de promediado de 0 a 64 en valores de potencias de dos. La medida se ha realizado con un SPAN de 15 GHz con 8192 puntos en frecuencia, con lo que se obtiene una resolución en frecuencia de 1,83 MHz y un retardo máximo detectable de 546 ns. Además, se ha utilizado un ancho de banda de frecuencia intermedia de 500 Hz y una potencia de salida de 0 dBm.

En la Figura 21 se representan los distintos perfiles de potencia obtenidos de las siete medidas realizadas con factores de promediado distintos. Al observar el PDP normalizado respecto a la contribución principal, se puede distinguir claramente que el margen dinámico de la medida es mayor al aumentar el factor de promediado. Por lo tanto, el promediado ayuda a aumentar el margen dinámico de la medida.

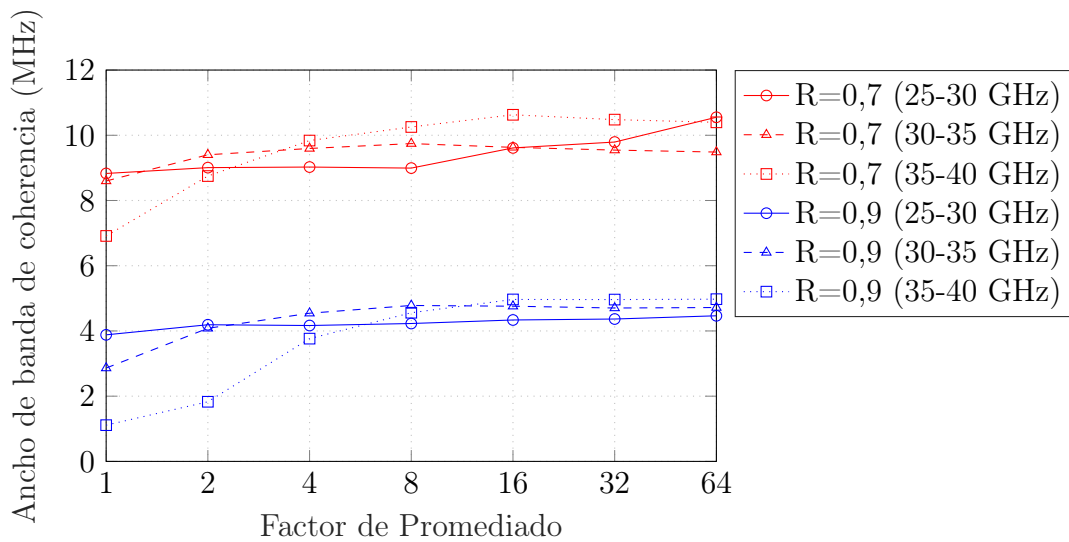


**Figura 21:** PDP Normalizado para distintos factores de promediado

Por otro lado, cuanto mayor es el factor de promediado, más tardará la medida en realizarse, ya que realizará tantos barridos como factor de promediado se haya introducido. Por tanto, hay que buscar un compromiso entre el tiempo total de la medida y el factor de promediado. Para ello, se analizan también el efecto de éste en el cálculo del ancho de banda de coherencia y de la dispersión del retardo.

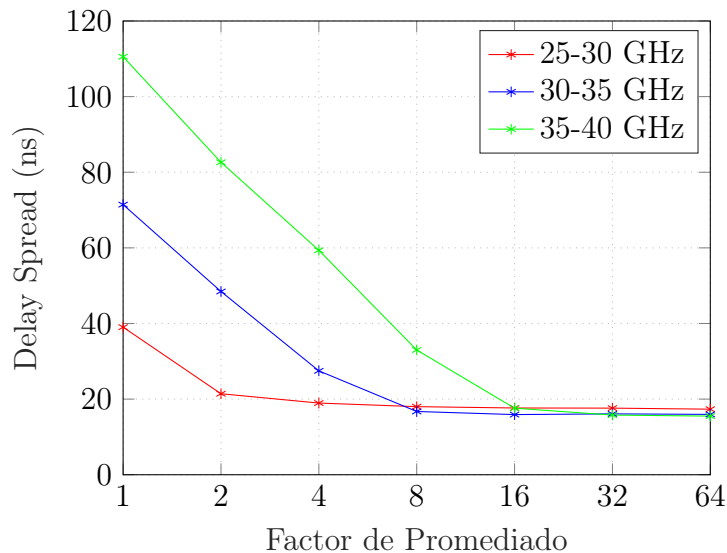
En la Figura 22 se ha representado el valor calculado de ancho de banda de coherencia para una correlación del 70 y 90 % para los 7 valores del factor de promediado empleado en tres bandas de frecuencia distintas con un ancho de banda de 5 GHz cada una. Como se puede observar, el valor del ancho de banda de coherencia se vuelve constante a partir de aproximadamente un factor de promediado de 4 barridos en frecuencia para la banda de frecuencias más elevada. Por ello, un promediado de 4 sería el mínimo con el se podría calcular de una forma más precisa el ancho de banda de coherencia si se realizan medidas en las bandas más altas, con esta configuración. En todas las bandas se observa una mejoría considerable aplicando únicamente un promediado de 2 trazas. En este caso influye el tiempo total de la medida que se quiera realizar.

Por otro lado, también se puede ver como afecta el promediado al resultado de la



**Figura 22:** Ancho de banda de coherencia al 70 y 90 % para distintos factores de promediado en tres bandas de frecuencia distintas

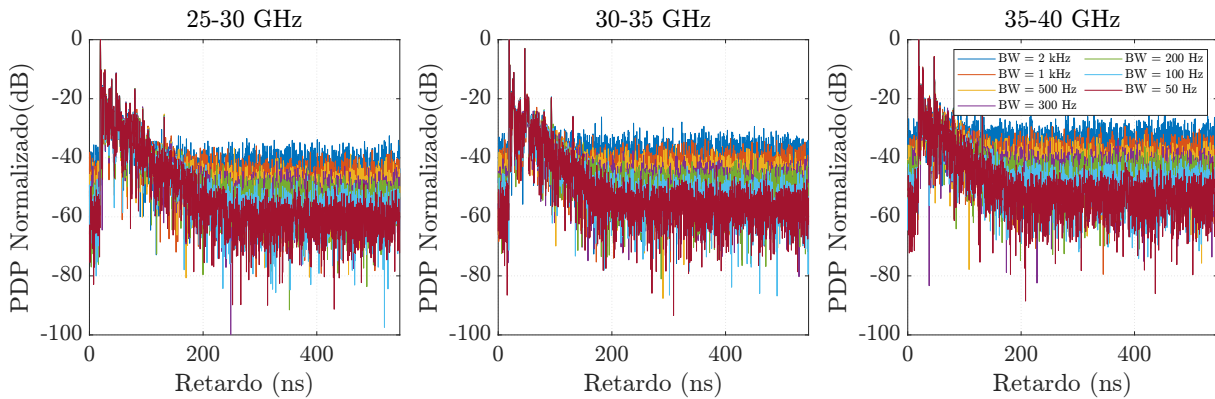
dispersión del retardo. Para ello se ha representado en la Figura 23, la dispersión del retardo para las tres bandas, dependiendo del factor de promediado empleado. Los resultados indican que no se obtiene un resultado correcto del cálculo hasta usar un factor de promediado de 16 para la banda más alta en frecuencia, que es la que tiene menor margen dinámico. Según la banda de frecuencias donde se quieran realizar las medidas, será óptimo utilizar un factor de promediado u otro además del resto de la configuración.



**Figura 23:** Dispersión del retardo para distintos factores de promediado en tres bandas de frecuencia distintas



Algo similar ocurre en el PDP para los distintos valores de ancho de banda de frecuencia intermedia, ya que a menor ancho de banda, más margen dinámico en las medidas, pero también mayor tiempo de adquisición. Esto se puede ver en la Figura 24. Estas medidas se han realizado utilizando un factor de promediado fijo para todas ellas, en este caso un factor 4.



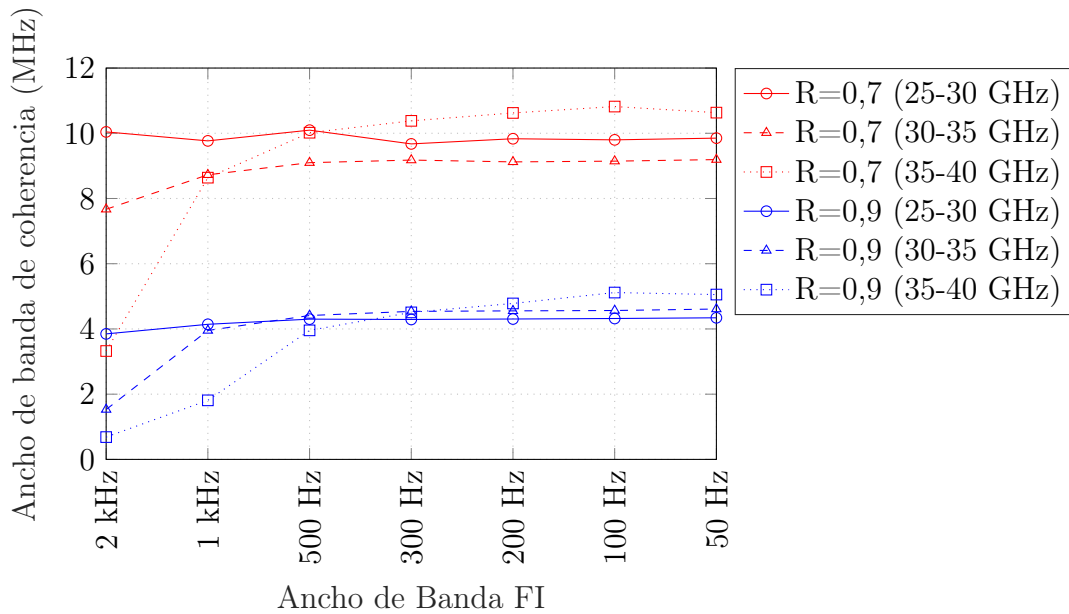
**Figura 24:** PDP Normalizado para distintos anchos de banda FI

Viendo los resultados de las Figuras 25 y 26, se puede concluir que, para la banda de mayor frecuencia, con un ancho de banda de 100 Hz sería suficiente aplicando un umbral de -40 dB en este caso para el cálculo de la dispersión del retardo y 500 Hz para el cálculo del ancho de banda de coherencia.

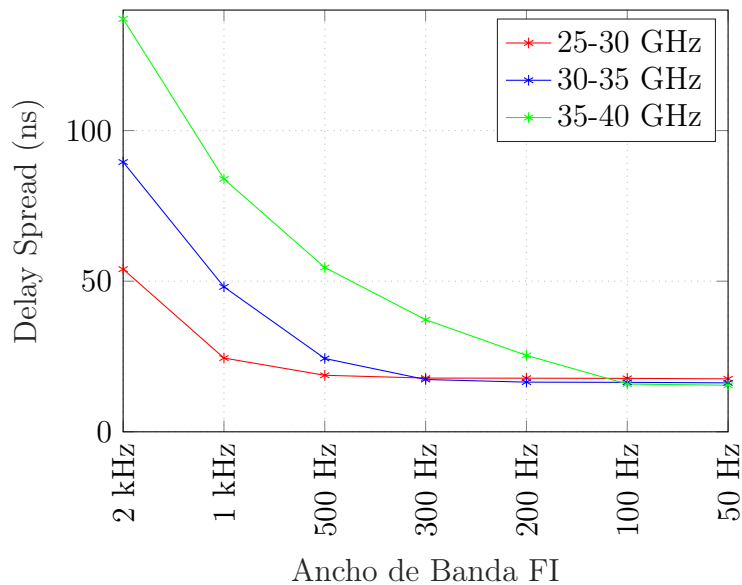
Cabe decir que el ancho de banda de frecuencia intermedia influye en el tiempo de barrido que dura una traza. Cuanto menor es el ancho de banda, mayor tiempo de barrido. El uso del enlace RoF añade una limitación en el tiempo de barrido, ya que añade un retardo a la señal. Si el tiempo de barrido del ARV es más rápido del adecuado, medirá la señal recibida antes de que llegue, por lo que dará un resultado erróneo. Por tanto, la configuración elegida (número de puntos y ancho de banda FI) tendrá que cumplir que el tiempo de barrido de una traza sea menor a unos 3 segundos, que es el tiempo necesario para el conversor. En el caso de este tipo de medidas no afecta este problema ya que se necesita un buen margen dinámico y para ello es necesario un ancho de banda FI bajo.

Otro parámetro que podemos modificar para mejorar el margen dinámico es la potencia de salida del analizador de redes. En este caso, el conversor electro-óptico tiene una potencia de saturación de 10 dBm, pero el analizador solo permite hasta 8 dBm como potencia de salida máxima. Por ello se ha evaluado las diferencias para distintos valores de potencia entre 0 y 8 dBm. En la Figura 27 se puede observar que existe una mejora en el margen dinámico al subir la potencia de salida. Por tanto, como seleccionar una potencia más elevada no introduce más tiempo de medida, lo óptimo será siempre realizar las medidas con la mayor potencia de salida que permita el sistema de medida.

Por último, se analizan los efectos para siete medidas realizadas con distinto número de puntos, desde 128 puntos hasta 8192 puntos en un ancho de banda de 2 GHz, desde 25 a 27 GHz. Por tanto, cada medida se ha realizado con un espaciado en frecuencia distinto. La medida con menos puntos, tiene una resolución en frecuencia de 15,748 MHz



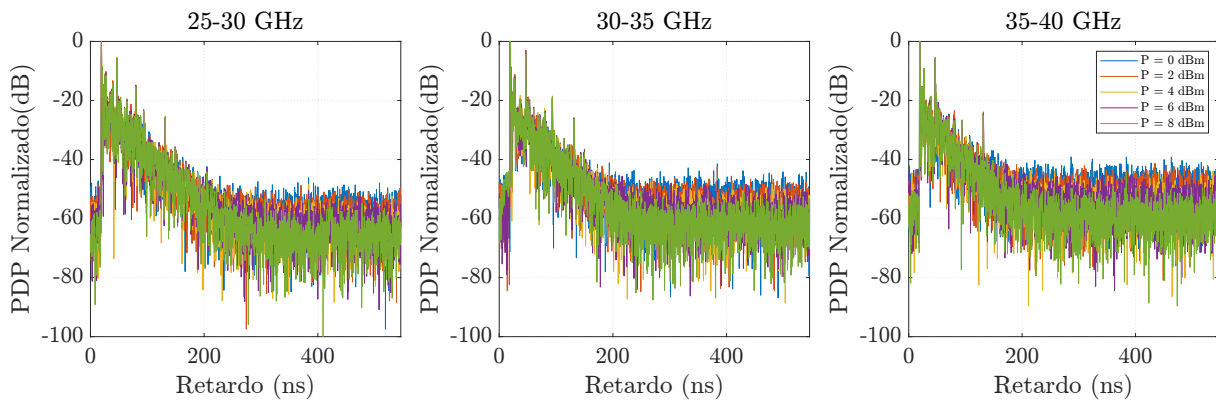
**Figura 25:** Ancho de banda de coherencia al 70 y 90 % para distintos anchos de banda de FI



**Figura 26:** Dispersión del retardo para distintos anchos de banda de FI

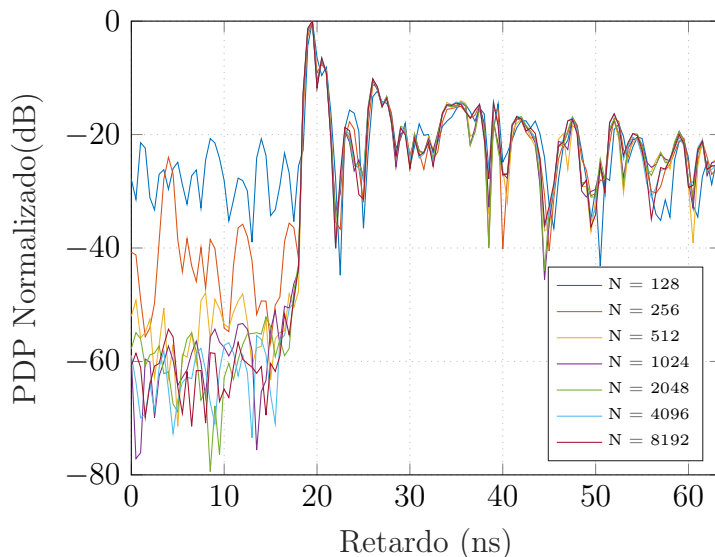
y un retardo máximo de 63,5 ns. Por el contrario, la medida con 8192 puntos tiene una resolución en frecuencia de 244,17 kHz y un retardo máximo de 4095,5 ns.

Al margen de que se obtiene más retardo cuanto mayor es el número de puntos elegido, en la Figura 28 se observa que para las medidas con un número de puntos muy bajo, al realizar la IFFT, el PDP toma picos de amplitud elevados antes de la contribución



**Figura 27:** PDP Normalizado para distintos valores de potencia de salida

principal. Esto se observa para  $N = 128$  y  $N = 256$ . Este efecto de aliasing puede llevar a cálculos erróneos de las métricas del canal como la dispersión del retardo (*delay spread*) ya que el cálculo puede tomar estos picos de amplitud como contribuciones válidas.



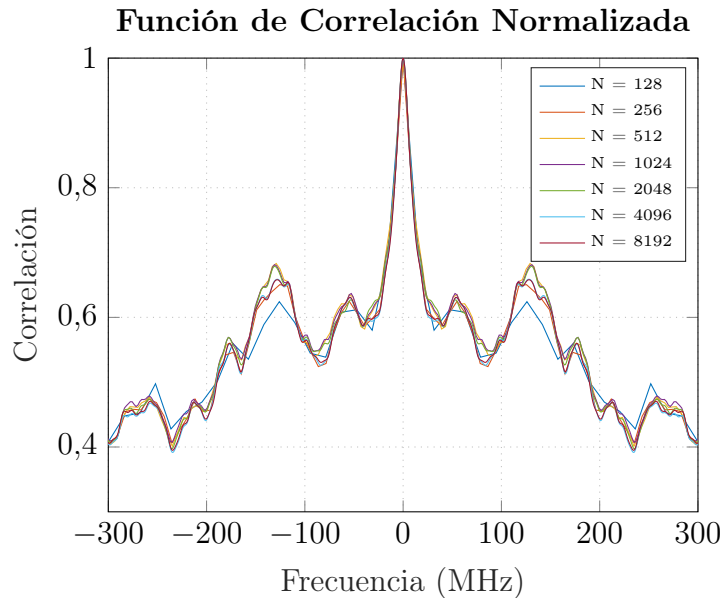
**Figura 28:** PDP Normalizado para distinto número de puntos

Cuanto mayor sea el número de puntos, más tardará el analizador en realizar una medida completa. Por tanto, hay que buscar un número de puntos lo suficientemente elevado para evitar el efecto del aliasing pero también el mínimo para obtener el suficiente retardo y un tiempo de barrido mínimo. El número de puntos mínimo necesario para evitar el aliasing vendrá dado por

$$N = \text{SPAN} \cdot \tau_{\text{máx}}, \quad (21)$$

siendo SPAN el ancho de banda medido con el ARV y  $\tau_{\text{máx}}$  el retardo máximo que se desea obtener en el PDP.

Con respecto al ancho de banda de coherencia para distinto número de puntos, en la Figura 29 se observa la función de correlación normalizada para las siete medidas anteriores, donde la diferencia reside principalmente en la resolución de los lóbulos secundarios debido al menor o mayor número de puntos.



**Figura 29:** Función de correlación normalizada para distinto número de puntos

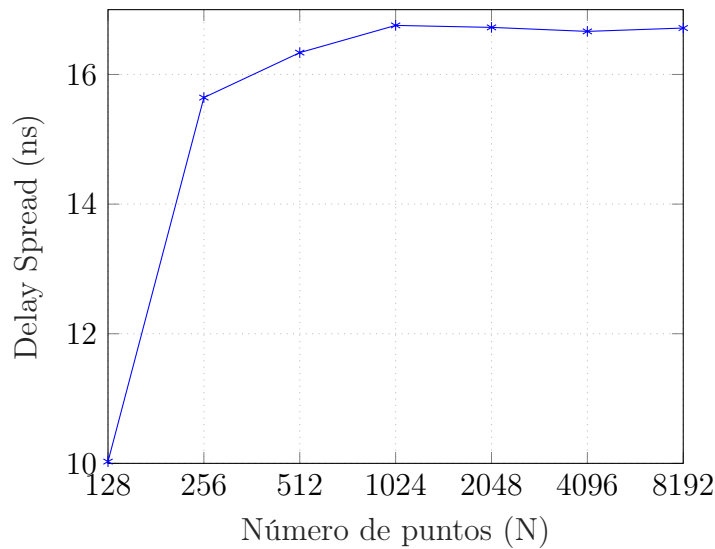
Por último, en el cálculo de la dispersión del retardo, se concluye que el cálculo es más aproximado a partir de 1024 puntos para estas medidas, tal como se muestra en la Figura 30. Con esta configuración, la resolución en frecuencia es de 1,955 MHz y se obtiene un retardo máximo de 511,5 ns.

Por todo lo expuesto anteriormente, se concluye que una buena elección de los parámetros determina el buen resultado del cálculo de las métricas del canal para su posterior análisis.

### 6.3. Protocolo de obtención de los parámetros óptimos

Los parámetros óptimos variarán dependiendo del entorno de propagación, el sistema de medida utilizado o el margen dinámico que se desea obtener en las medidas. Por ello, en este apartado se define un protocolo con una serie de directrices a seguir para la sencilla obtención de los parámetros óptimos según el margen dinámico objetivo que se desea obtener con el menor tiempo de medida posible.

El primer parámetro a tener en cuenta es la potencia de salida del puerto del ARV, ya que al aumentar su valor se consigue mayor margen dinámico sin aumentar el tiempo de la medida, tal como se ha visto en el apartado anterior. Hay que tener en cuenta la potencia máxima permitida por el ARV, el enlace de RoF o por los componentes del equipo de medida.



**Figura 30:** Dispersión del retardo para distinto número de puntos

El segundo paso consiste en establecer unos parámetros iniciales en el ARV, como punto de partida para obtener los óptimos. El número de puntos vendrá dado por la ecuación (21) dependiendo del retardo máximo que se necesite obtener en el PDP. Con respecto al ancho de banda de FI, para las frecuencias empleadas, un buen punto de comienzo es utilizar un ancho de banda de FI de 100 Hz, ya que asegura un buen cálculo inicial de los parámetros al ser un ancho de banda reducido. Por último, es recomendable aplicar el mínimo promediado de 2 para obtener el menor tiempo de medida posible, y además mejora la medida con respecto a no aplicar promediado.

El tercer paso es realizar una medida simple con esta configuración y observar el PDP. Si no se ha cumplido el margen dinámico impuesto como objetivo en la medida, es necesario aumentar el factor de promediado al doble o reducir el ancho de banda de FI y volver a realizar la medida hasta que se obtenga el margen dinámico objetivo. Si por el contrario, ya se ha obtenido el margen dinámico objetivo o un valor mayor, el siguiente paso es aumentar el ancho de banda de FI y volver a realizar la medida. Si el margen dinámico sigue siendo igual o mayor que el objetivo y además el cálculo de los parámetros dan el mismo resultado en las dos medidas, significa que se puede seguir aumentando el ancho de banda de FI hasta que esto ya no se cumpla. Este último valor con el que se cumple la igualdad de los parámetros de dispersión será el óptimo para las medidas a realizar, ya que proporcionará un buen resultando utilizando el menor tiempo de medida posible.

Siguiendo este método se ha conseguido reducir el tiempo total que conlleva una campaña de 22 grupos de medidas en un entorno de laboratorio. Se ha utilizado una potencia de salida de 8 dBm, un total de 8192 puntos para medir en el rango de frecuencias de 24 a 40 GHz, un ancho de banda de FI de 200 Hz y un factor de promediado de 2. Con estos parámetros de configuración se ha realizado una medida MIMO (*Multiple-Input Multiple-*

*Output*) con matrices de dimensiones  $7 \times 7$  en el URA y  $10 \times 1$  en el ULA. La duración total una medida es de 10 h 45 min aproximadamente, por lo que toda la campaña duraría 10 días sin parar de medir. Realmente no es así ya que se necesita completa estabilidad en el entorno y por ello se debe medir cuando no hay gente (noches y fines de semana), por lo que la campaña de medida dura aproximadamente 18 días midiendo 1 medida por día y 4 los fines de semana.

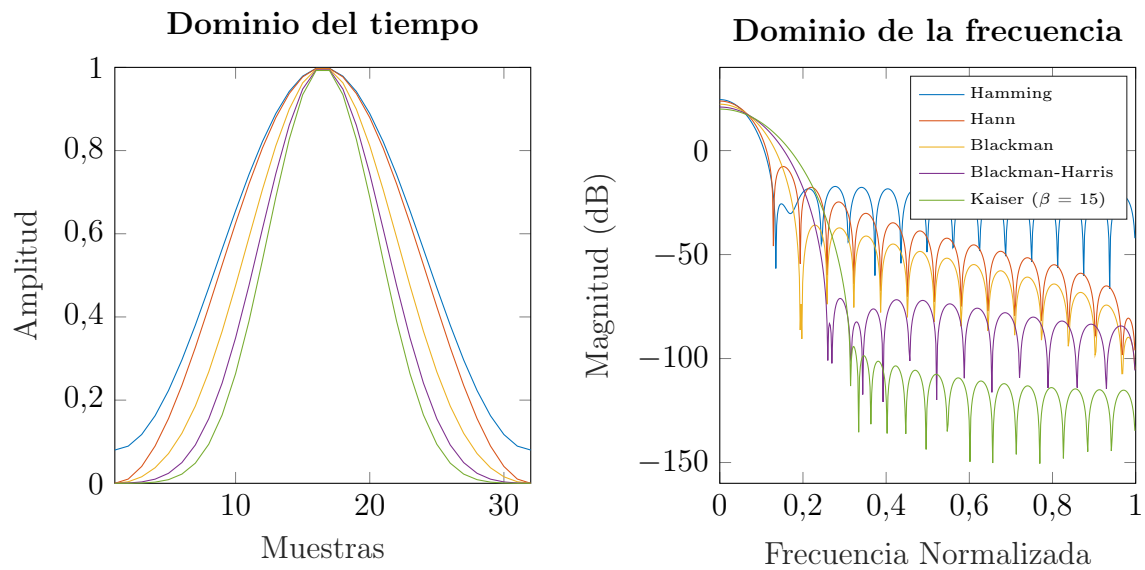
Sin utilizar este método, se hubiesen realizado las medidas con un ancho de banda de FI de 100 Hz y un factor de promediado 4, ya que los resultados son buenos, pero una medida duraría unas 43 h y toda la campaña casi 40 días sin parar de medir. Si se tiene en cuenta que el entorno debe estar estable, solo sería posible medir el fin de semana ya que la medida dura 43 h, por lo que en total la campaña de medida llevaría unos 5 meses y medio realizando 4 medidas por mes. Con esto, se expone la gran ventaja de la optimización de los parámetros de medida para campañas con gran volumen de medidas.

## 6.4. Técnicas de procesado

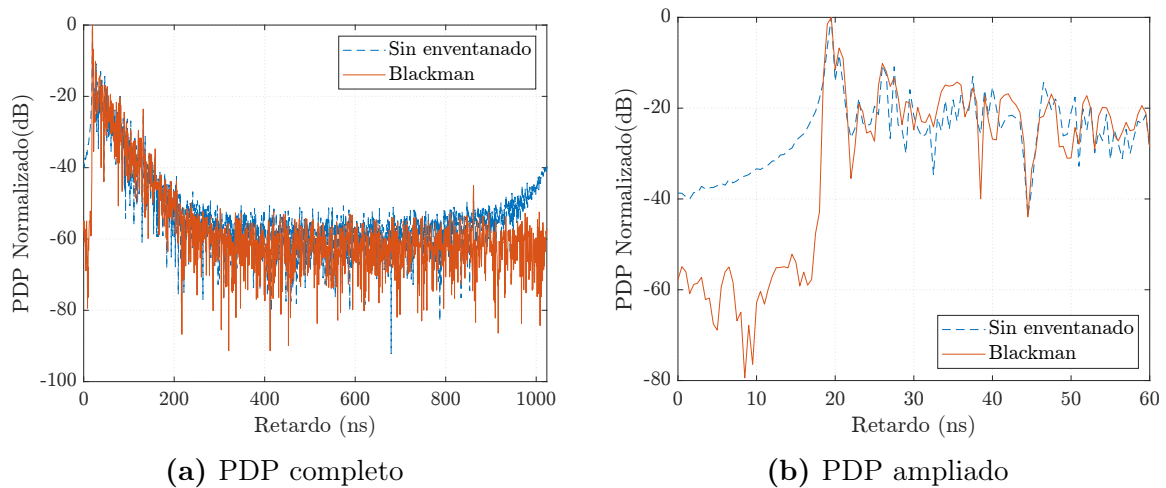
Una consideración a tener en cuenta antes de realizar la IFFT para obtener la respuesta al impulso del canal  $h(t_0, \tau)$ , es inventanar la respuesta en frecuencia para reducir los lóbulos secundarios tal como se explica en [14]. Existen distintos tipos de ventana que se pueden aplicar a la respuesta en frecuencia obtenida con el ARV, con MATLAB por ejemplo, donde hay funciones específicas para ello. El tipo de ventana aplicada influye en la resolución de las contribuciones y, por tanto, en el cálculo de los parámetros del canal. En [15] se ha investigado el efecto de tres tipos de ventanas sobre los parámetros del canal UWB (*Ultra WideBand*).

En la Figura 31 se han representado cinco tipos de ventana frecuentemente usadas en este tipo de aplicaciones: Hamming, Hann, Blackman, Blackman-Harris, y Kaiser para 32 muestras. El caso específico de la ventana de Kaiser es que depende de un parámetro  $\beta$  es un factor de forma que afecta a la atenuación del lóbulo lateral de la transformada de Fourier de la ventana. El aumento del parámetro  $\beta$  ensancha el lóbulo principal y disminuye la amplitud de los lóbulos laterales. En la Figura 31 se ha utilizado  $\beta = 15$ , pero utilizando  $\beta \approx 6$  se obtiene una respuesta similar a la ventana de Hamming, por lo que la ventana de Kaiser ofrece mucha variabilidad. En este ejemplo se ve claramente que, en el dominio de la frecuencia, según el tipo de ventana escogida, se obtendrá una mayor atenuación de los lóbulos secundarios, como el ejemplo de Blackman-Harris, pero a cambio el lóbulo principal será más ancho y por tanto, puede ocasionar menor resolución de las contribuciones. En los ejemplos como Hann o Blackman, el lóbulo secundario tiene mayor amplitud pero estos van tomando valores más bajos en comparación con la ventana de Hamming.

Para ver la diferencia al aplicar un inventanado en una medida real, se ha comprobado su efecto sobre una medida realizada en el rango de frecuencias de 25 a 27 GHz, con 2048 puntos en frecuencia. El PDP obtenido tras la aplicación de la ventana de Blackman, en comparación a no aplicar ninguna ventana, se muestra en la Figura 32a. Se observa una reducción del ruido de fondo de las medidas, que es importante a la hora del cálculo de las métricas del canal.



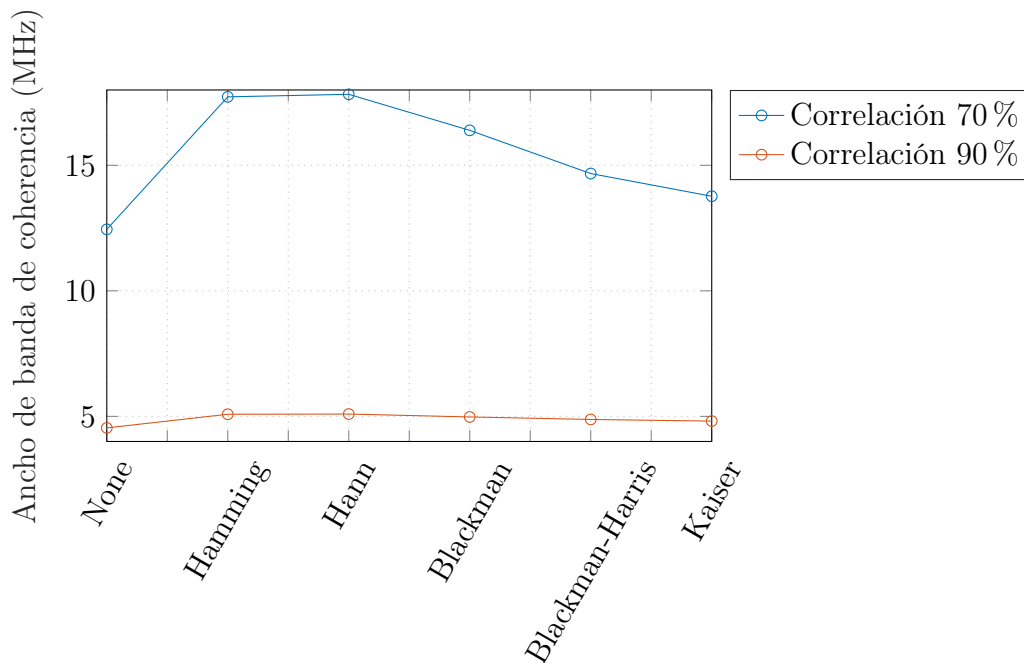
**Figura 31:** Ejemplo de las distintas ventanas utilizadas con 32 muestras



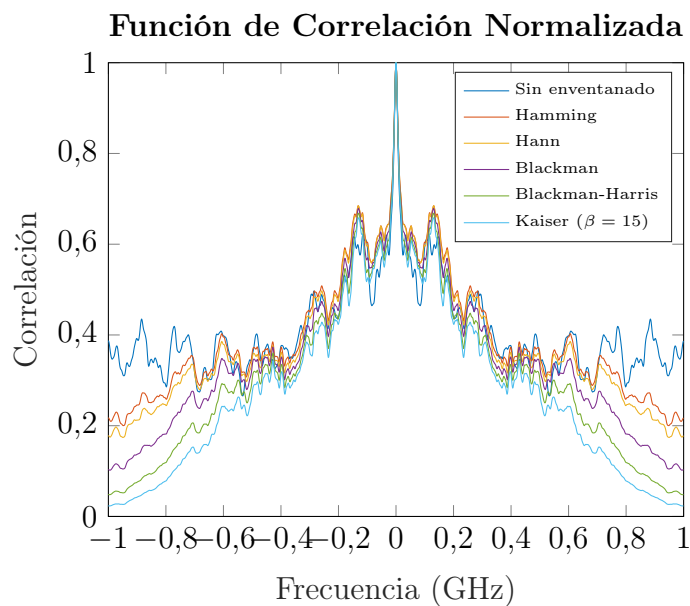
**Figura 32:** PDP Normalizado para distintos enventados

Si calculamos el ancho de banda de coherencia para una correlación del 0,7 y 0,9 se puede observar en la Figura 33 que, respecto a no aplicar ningún enventanado, el cálculo del ancho de banda de coherencia para 0,7 es mayor al aplicar las ventanas de Hamming, Hann y Blackman y se va reduciendo cuanto mayor es la atenuación de los lóbulos secundarios de la respuesta en frecuencia de la ventana. Está diferencia se puede observar también en la Figura 34, donde también se aprecian las diferencias en la función de correlación para cada tipo de ventana.

Por último, se realiza también el cálculo de la dispersión del retardo para la misma medida según el tipo de ventana aplicada aplicando un umbral de -40 dB, tal como en los apartados anteriores. En la Figura 35 se observa, sobretodo, la gran ventaja de aplicar un enventanado a las medidas, ya que el resultado del cálculo de la dispersión del retardo es



**Figura 33:** Ancho de banda de coherencia al 70 y 90 % para distintos eventanados

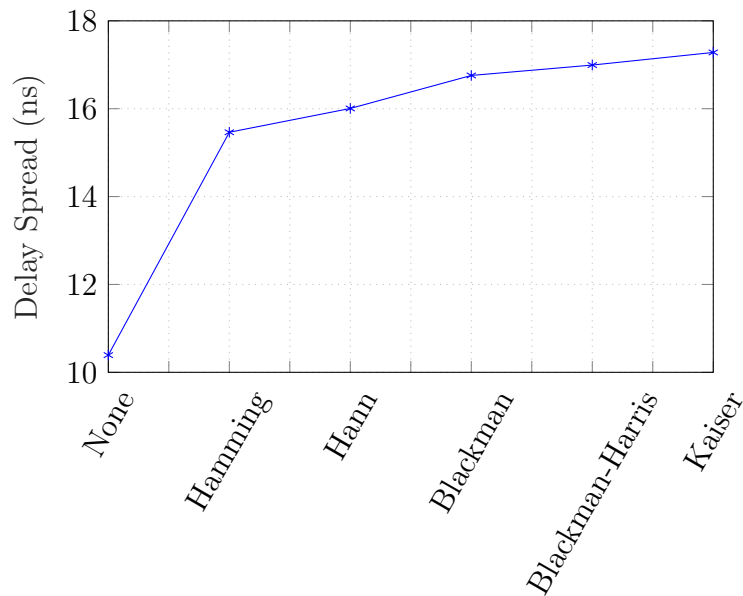


**Figura 34:** Función de correlación normalizada para los distintos tipos de ventanas

mucho más acertado que sin eventanado. Dentro de los distintos eventanados, cuanto mayor es el ancho del lóbulo de la ventana, se obtiene una dispersión del retardo un poco mayor.

Como conclusión de este último apartado, cabe decir que para el cálculo del ancho de





**Figura 35:** Dispersión del retardo para distintos eventados aplicando distintos umbrales

banda de coherencia y la dispersión del retardo, la ventana de Blackman ofrece un punto intermedio, aunque con todas se obtiene un mejor resultado que sin aplicar eventanado.

## 7. Conclusiones y líneas futuras

En este trabajo se ha diseñado una sonda de medida del canal radio en el dominio de la frecuencia. La interfaz gráfica de la sonda se ha programado con *App Designer* de MATLAB y controla un analizador de redes vectorial, de forma independiente a la sonda de medida, por lo que es posible utilizarlo para cualquier tipo de medidas. Además la interfaz es capaz de controlar dos posicionadores para crear matrices y vectores de posiciones para realizar medidas a pequeña escala (*small local area*). Para unas menores pérdidas en separaciones entre antena transmisora y receptora muy grandes, se ha implementado la sonda con un enlace de radio sobre fibra que opera hasta 40 GHz y de ganancia 0 dB, con el que se pueden realizar medidas con mínimas pérdidas y mejorar el margen dinámico. Esta interfaz es sencilla e intuitiva para cualquier usuario, además de poder controlarla desde un ordenador remoto, con opción de realizar calibraciones o cargar archivos de calibración guardados. Para confirmar la correcta realización de una medida extensa, la aplicación envía un correo de inicio y finalización de medida a las direcciones configuradas, con los datos de dicha medida.

Posteriormente, se han realizado medidas reales en un entorno de laboratorio para el análisis de cómo afecta la elección de los distintos parámetros del analizador de redes en las medidas. Esto ayuda a seleccionar fácilmente un buen conjunto de parámetros en posteriores campañas de medida. Con estos resultados, se proporciona un protocolo

práctico y sencillo de obtención de los parámetros óptimos para reducir el tiempo de medida.

Por último, se han analizado algunos de los inventanados más comunes aplicados como técnica de procesado a las medidas realizadas para obtener un mejor resultado en el cálculo de las métricas del canal radio.

Como líneas futuras de investigación se destaca la implementación de un nuevo sistema de posicionamiento circular adquirido, añadiéndolo a la sonda diseñada para la realización de nuevos tipos de medida y determinar el ángulo de llegada de las contribuciones.

También, la realización de una campaña de medidas extensa en la banda de milimétricas para el análisis de la relación de los desvanecimientos en dominio frecuencial y espacio-temporal.

Respecto al programa, a modo de ejemplo, una mejora que podría incorporarse en un futuro es la estimación de la ocupación en memoria de una medida y determinar si dicha medida podrá guardarse correctamente sin que se quede sin memoria suficiente en el analizador, ya que esto puede dar el error de que una medida no se complete.

## 8. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad a través del proyecto TEC2017-86779-C2-2-R, a través de la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Me gustaría agradecer a los profesores Lorenzo Rubio y Vicent Miquel Rodrigo por su ayuda y apoyo durante toda la realización de este proyecto. También, al técnico del laboratorio Bernardo Bernardo por su ayuda en la implementación de la sonda en el laboratorio. Por último, agradecer a mi pareja y familia por su apoyo y ánimo para continuar con mis estudios.

## Referencias

- [1] Jeffrey G. Andrews, Stefano Buzzi, Wan Choi, Stephen V. Hanly, Angel Lozano, Anthony C. K. Soong y Jianzhong Charlie Zhang. "What Will 5G Be?" En: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 32.6 (2014), págs. 1065-1082. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
- [2] Cheng-Xiang Wang, Ji Bian, Jian Sun, Wensheng Zhang y Minggao Zhang. "A Survey of 5G Channel Measurements and Models". En: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 20.4 (2018), págs. 3142-3168. DOI: 10.1109/COMST.2018.2862141.
- [3] International Telecommunication Union. *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020*. 2017. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2412-2017-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2412-2017-PDF-E.pdf) (visitado 03-05-2021).

- [4] Danping He, Bo Ai, Ke Guan, Longhe Wang, Zhangdui Zhong y Thomas Kürner. “The Design and Applications of High-Performance Ray-Tracing Simulation Platform for 5G and Beyond Wireless Communications: A Tutorial”. En: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 21.1 (2019), págs. 10-27. DOI: 10.1109/COMST.2018.2865724.
- [5] European Commission - Radio Spectrum Policy Group. *Strategic Roadmap Towards 5G for Europe*. 2016. URL: [https://rspg-spectrum.eu/wp-content/uploads/2013/05/RPSG16-032-0pinion\\_5G.pdf](https://rspg-spectrum.eu/wp-content/uploads/2013/05/RPSG16-032-0pinion_5G.pdf) (visitado 03-05-2021).
- [6] George R. Maccartney, Theodore S. Rappaport, Shu Sun y Sijia Deng. “Indoor Office Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models at 28 and 73 GHz for Ultra-Dense 5G Wireless Networks”. En: *IEEE Access* 3 (2015), págs. 2388-2424. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2486778.
- [7] Katsuyuki Haneda, Jan Järveläinen, Aki Karttunen, Mikko Kyrö y Jyri Putkonen. “A Statistical Spatio-Temporal Radio Channel Model for Large Indoor Environments at 60 and 70 GHz”. En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 63.6 (2015), págs. 2694-2704. DOI: 10.1109/TAP.2015.2412147.
- [8] Jie Huang, Cheng-Xiang Wang, Rui Feng, Jian Sun, Wensheng Zhang y Yang Yang. “Multi-Frequency mmWave Massive MIMO Channel Measurements and Characterization for 5G Wireless Communication Systems”. En: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 35.7 (2017), págs. 1591-1605. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2699381.
- [9] Pan Tang, Jianhua Zhang, Mansoor Shafi, Pawel A. Dmochowski y Peter J. Smith. “Millimeter Wave Channel Measurements and Modelling in an Indoor Hotspot Scenario at 28 GHz”. En: *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. 2018, págs. 1-5. DOI: 10.1109/VTCFall.2018.8690888.
- [10] Lorenzo Rubio, Vicent M. Rodrigo Peñarrocha, José-María Molina-García-Pardo, Leandro Juan-Llácer, Juan Pascual-García, Juan Reig y Concepción Sanchis-Borras. “Millimeter Wave Channel Measurements in an Intra-Wagon Environment”. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68.12 (2019), págs. 12427-12431. DOI: 10.1109/TVT.2019.2947205.
- [11] Lorenzo Rubio, Rafael P. Torres, Vicent M. Rodrigo Peñarrocha, Jesús R. Pérez, Herman Fernández, Jose-Maria Molina-Garcia-Pardo y Juan Reig. “Contribution to the Channel Path Loss and Time-Dispersion Characterization in an Office Environment at 26 GHz”. En: *Electronics* 8.11 (2019). DOI: 10.3390/electronics8111261.
- [12] Theodore S. Rappaport. *Wireless communications: Principles and practice*. English (US). 2nd. Prentice Hall communications engineering and emerging technologies series. Prentice Hall, 2002. ISBN: 0130422320.
- [13] P. Bello. “Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channels”. En: *IEEE Transactions on Communications Systems* 11.4 (1963), págs. 360-393. DOI: 10.1109/TCOM.1963.1088793.

- 
- [14] Zoubir Irahauten, Homayoun Nikookar y Gerard Janssen. “An overview of ultra wide band indoor channel measurements and modeling”. En: *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE* 14 (sep. de 2004), págs. 386-388. DOI: 10.1109/LMWC.2004.832620.
- [15] F.J. Harris. “On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform”. En: *Proceedings of the IEEE* 66.1 (1978), págs. 51-83. DOI: 10.1109/PROC.1978.10837.

## A. Artículos

Català Lahoz, Cristina; Bernardo Clemente, Bernardo; Rodrigo Peñarrocha, Vicent Miquel; Rubio Arjona, Lorenzo; Reig Pascual, Juan-De-Ribera (2021). “Optimización de la configuración de una sonda de canal en el dominio de la frecuencia en bandas de milimétricas”. En: *XXXVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2021)*. 20-21 de septiembre de 2021.

# Optimización de la Configuración de una Sonda de Canal en el Dominio de la Frecuencia en Bandas de Milimétricas

Cristina Català, Bernardo Bernardo, Vicent M. Rodrigo Peñarrocha, Lorenzo Rubio, Juan Reig  
cricala1@teleco.upv.es, berbercl@iteam.upv.es, vrodrigo@dcom.upv.es, lrubio@dcom.upv.es, jreig@dcom.upv.es,  
Instituto iTEAM, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia. España

**Resumen**—In this contribution to the conference, we present different methods to improve the dynamic range of mobile radio channel measurements using a channel sounder in the frequency domain for millimeter wave (mmWave) propagation measurements. The advantages of using a radio over fiber (RoF) link are explained to avoid the losses introduced by a coaxial cable in measurements carried out in indoor and outdoor environments. Furthermore, measurements are carried out in a laboratory environment in order to obtain the optimal configuration parameters to carry out large measurement campaigns in the shortest possible time while maintaining the highest possible dynamic range and the correct calculation of the dispersion parameters. Finally, a simple protocol is disclosed to obtain the optimal parameters mentioned through three short steps.

## I. INTRODUCCIÓN

Los primeros despliegues de redes 5G se han realizado en la banda de 700 MHz correspondiente al segundo dividendo digital, junto con la banda de 3,4 a 3,8 GHz [1]. Sin embargo, las altas velocidades de transmisión esperadas en 5G solo se pueden alcanzar utilizando frecuencias superiores a 24 GHz, donde es posible usar anchos de banda del orden de MHz [2]. En la última Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR), celebrada en 2019, se establecieron las bandas de milimétricas (*mmWave*) para el despliegue de las futuras redes móviles [3]. Entre estas, las bandas de 26, 28 y 38 GHz, son las que dominan en soporte e impulso internacional [4].

A la hora de estudiar el canal radio y establecer modelos de propagación se requiere la realización de medidas experimentales que incluyan características en entornos de interior o exterior. Además, el despliegue adecuado de las redes 5G en ambientes interiores depende de un estudio cuidadoso del comportamiento del canal, debido a la mayor complejidad en estos entornos. Para ello es necesario realizar un sondeo del canal utilizando un sistema de medida que permita obtener la respuesta al impulso del canal. Existen distintas técnicas de medida [5], tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia y en [6] se describen distintos diseños de sondas de canal para canales de banda ultra ancha. La sonda de canal descrita en esta publicación mide la respuesta en frecuencia del canal utilizando un analizador de redes vectorial (ARV) y ha sido utilizada en distintas campañas de medida [7]–[9].

Una sonda de canal requiere de un uso correcto y optimizado, para obtener el mayor margen dinámico posible en las medidas y evitar pérdidas innecesarias que introducen a menudo los cables. En [10], [11] ya se habla del uso de un enlace radio sobre fibra (RoF) para evitar el uso de un cable coaxial, y mejorar así el sistema de medida completo para uso

en medidas de interior y exterior, donde las distancias entre las antenas son mas grandes. También se menciona el tiempo de retardo que introducen algunos componentes ópticos, que se debe tener en cuenta a la hora de realizar medidas y en [12] se detallan otros errores sistemáticos que se cometen a la hora de sondear el canal. Además de tener en cuenta todos estos factores, hay que saber que parámetros configurar en el ARV para obtener la medida correcta, ya que el uso de un factor de promediado alto y un ancho de banda de frecuencia intermedia bajo ayudan a aumentar el margen dinámico de una medida, pero también que ésta tome un tiempo de realización muy elevado. Es por ello que se busca optimizar estos y otros parámetros del ARV para obtener los datos correctos en el menor tiempo de medida posible.

## II. MEDIDA DEL CANAL RADIO

### A. Descripción del Sistema de Medida

Se ha implementado una sonda de canal en el dominio de la frecuencia (Fig. 1) para medir la función de transferencia compleja del canal (CTF), denotada por  $H(f)$ . La sonda está basada en un ARV, en concreto el Keysight N5227-A. Se han empleado las antenas de banda ultra ancha QOM-SL-0.8-40-K-SG-L de la empresa Steatite Ltd., como elementos transmisor y receptor. Estas antenas operan desde 800 MHz hasta 40 GHz, son omnidireccionales en el plano horizontal, casi isotrópicas, y tienen polarización lineal. La antena transmisora se ha conectado al ARV a través de un enlace RoF de banda ancha, DAS Photonics RX4005, de ganancia aproximadamente 0 dB en toda la banda de 1 a 40 GHz (Fig. 2). Esta práctica ausencia de pérdidas supone la gran ventaja del enlace RoF sobre el cable coaxial, que aumenta sus pérdidas con la frecuencia. De esta manera se consigue que el margen dinámico de las medidas sólo se vea reducido por la distancia en la propagación y no por los cables de la sonda.

La antena Tx está ubicada en un sistema de posicionamiento lineal, donde es posible implementar una agrupación lineal uniforme (ULA, *Uniform Linear Array*); y la antena Rx está sobre un sistema de posicionamiento XY, donde se puede implementar una agrupación rectangular uniforme (URA, *Uniform Rectangular Array*). La precisión de estos posicionadores es de 50,68 y 126,7  $\mu\text{m}$  entre posiciones consecutivas, respectivamente. Esto permite separaciones menores a  $\lambda/4$  a frecuencias muy altas para tener en cuenta los efectos de desvanecimiento a pequeña escala.

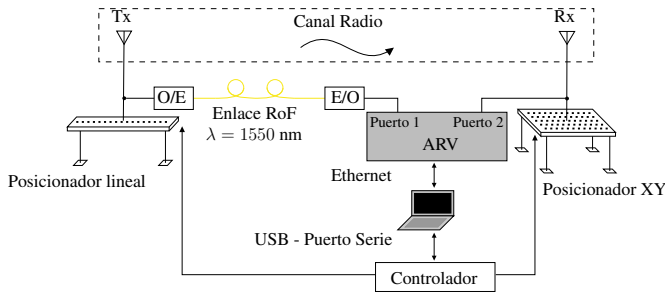


Fig. 1. Esquématico de la configuración de la sonda de canal.

Esta sonda permite la realización de medidas en miles de posiciones. Cada medida, dependiendo de la configuración aplicada al ARV, tardará un tiempo. La duración de una medida puede extenderse desde minutos a días. Ante ello surge la necesidad de optimizar el tiempo requerido para realizar correctamente cada una de las medidas individuales, de forma que al multiplicar por  $n$  medidas el tiempo total sea el mínimo imprescindible.

Se debe realizar previamente a las medidas un proceso de calibración. De esta forma los puntos de referencia serán las entradas los extremos de los cables que conectan las antenas Tx y Rx, por lo que el CTF medido tiene en cuenta la respuesta del canal de propagación y de las antenas. Tanto el ARV como el sistema de posicionamiento están controlados y automatizados por un ordenador personal.

### B. Uso de un Enlace RoF

A la hora de realizar medidas, ya sea en entornos de interior o exterior, es deseable obtener el mayor margen dinámico posible de la función de transferencia, ya que esto determinará el correcto análisis de los parámetros del canal radio. Un aumento de dicho margen dinámico se puede obtener cambiando el cable coaxial de mayor longitud entre el ARV y antenas, por un enlace RoF, que como se ha indicado, no presenta prácticamente pérdidas ( $G \approx 0$  dB). Se puede observar una gran mejora incluso a distancias cortas, como por ejemplo en medidas en entornos de interior. Por tanto, se puede obtener una gran mejora en el margen dinámico del perfil de retardo medido utilizando un enlace óptico. En pruebas realizadas en un entorno de interior, con una separación entre las antenas de aproximadamente 5 metros, se obtuvo una mejora en el margen dinámico de 10 dB al utilizar el enlace RoF con respecto a utilizar un cable coaxial, que aproximadamente corresponde a la atenuación del coaxial ( $\approx -15$  dB) menos las pérdidas del enlace electro-óptico en la banda de 35 a 40 GHz.

En la Fig. 2 se ha representado la respuesta  $S_{21}(f)$  del enlace RoF, para distintas longitudes de fibra óptica. La diferencia de amplitud al pasar de una longitud de fibra de 10 metros a una de 500 metros es menor de 1 dB, por lo que este enlace permitirá medidas con separaciones mucho mayores entre las antenas.

El uso del enlace RoF añade una limitación en el tiempo de barrido, ya que añade un retardo a la señal. Si el tiempo de barrido del ARV es más rápido del adecuado, medirá la señal recibida antes de que llegue, por lo que dará un resultado erróneo [10]. El tiempo de barrido del ARV se

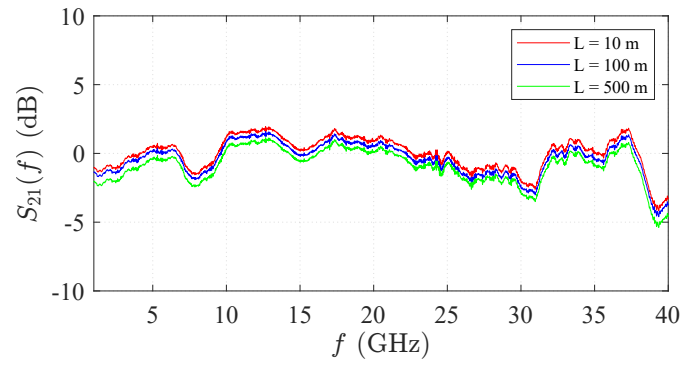


Fig. 2. Respuesta en frecuencia del enlace RoF para diferentes longitudes de fibra óptica.

puede aumentar de varias formas: manualmente (poniendo el valor deseado), aumentando el número de puntos de la medida o disminuyendo el ancho de banda de frecuencia intermedia (FI). En esta sonda, el tiempo de barrido mínimo necesario es de 3 segundos por traza. Este tiempo no es un inconveniente ya que en las medidas del canal habitualmente se utilizan anchos de banda de FI bajos para reducir el ruido, lo que da lugar a tiempos de barrido más elevados.

### C. Entorno de Propagación

Se han llevado a cabo distintas medidas con la sonda de canal anteriormente descrita, utilizando el enlace RoF, en un entorno de laboratorio. Dicho entorno contiene múltiples objetos con propiedades reflexivas por lo que dará como resultado la llegada al receptor de múltiples contribuciones multicamino. Se han realizado medidas, cambiando distintos parámetros de configuración de la sonda, con el objetivo de minimizar el tiempo de medida para conseguir un valor estable de los parámetros característicos del entorno de propagación.

## III. RESULTADOS

En este apartado se exponen los resultados de las distintas medidas realizadas con la sonda de canal. Para determinar los parámetros óptimos del analizador de redes en este tipo de medidas se ha evaluado el comportamiento de los siguientes parámetros: factor de promediado, ancho de banda de FI y número de puntos en frecuencia. Estos parámetros afectan al cálculo de las métricas del canal ya que afectan directamente al margen dinámico obtenido en las medidas realizadas con la sonda de canal. Para comprobarlo, se han realizado distintas medidas cambiando estos parámetros, con una previa calibración de la respuesta para cada uno de ellos. Además, se sugiere un protocolo a seguir para la obtención de los parámetros óptimos a utilizar, a partir de medidas experimentales, dependiendo del rango de frecuencias a medir y el margen dinámico deseado. Antes de realizar una campaña extensa de medidas es importante saber que parámetros darán el resultado buscado, ya que el tiempo de dicha campaña dependerá de ello.

### A. Medidas realizadas

Primero, se evaluaron las diferencias de realizar una medida sin promediado y con distintos factores de promediado (de 2 a 64 trazas promediadas). El promediado en este caso se realizó por barrido o traza completa. Se aprecia una diferencia notable

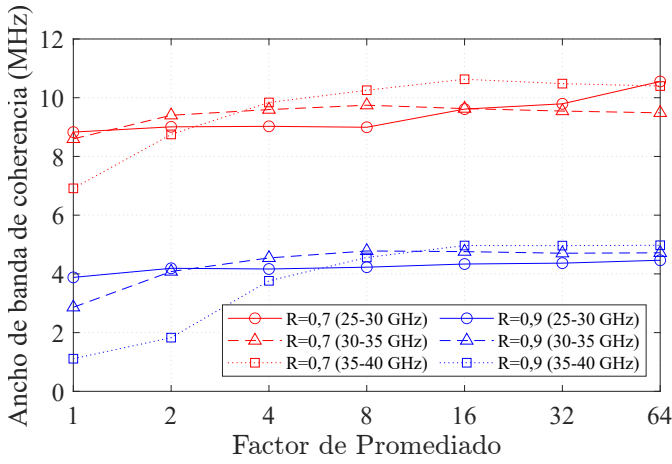


Fig. 3. Ancho de banda de coherencia en función del factor de promediado aplicado

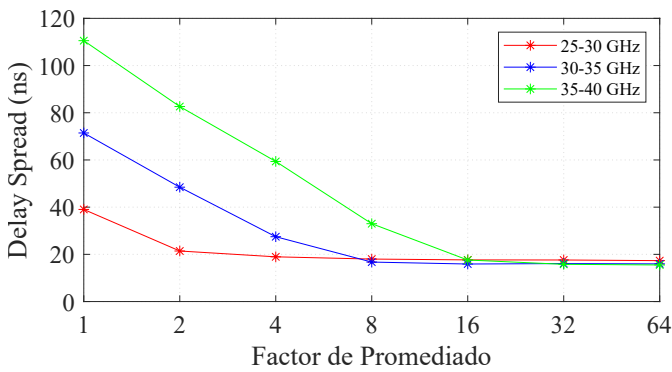


Fig. 4. Dispersión del retardo en función del factor de promediado aplicado

en el margen dinámico obtenido en el PDP, ya que se obtiene una mejora progresiva desde no aplicar promediado hasta un promediado de 64 trazas de 15 dB, lo que significa unos 2,5 dB de mejora al duplicar el número de trazas promediadas.

Para evaluar los efectos que tiene aumentar el factor de promediado sobre el cálculo de la dispersión en el tiempo y el ancho de banda de coherencia se ha medido el canal en el rango de 25 a 40 GHz, en tres intervalos de 5 GHz de ancho de banda. Se ha utilizado un ancho de banda de FI de 500 Hz y una potencia de salida de 0 dBm. Aplicando un umbral (*threshold*) de -40 dB, se ha obtenido el ancho de banda de coherencia obtenido en función del factor de promediado aplicado (Fig. 3) en cada una de las bandas de frecuencia para una correlación R de 0,7 y 0,9.

Se observa un aumento del ancho de banda de coherencia al utilizar un mayor factor de promediado en las bandas más altas de frecuencia, debido al menor margen dinámico obtenido. Llegado a un valor de promediado, el resultado obtenido es el mismo aunque este siga aumentando, por lo que sería el factor de promediado óptimo para esas medidas. Esto indica que no se obtiene el ancho de banda de coherencia correcto hasta cierto factor de promediado aplicando un umbral concreto, en este caso -40 dB. Equivalentemente ocurre con la dispersión del retardo (Fig. 4), donde no se obtiene el valor correcto ( $\approx 17$  ns) hasta promediar 16 trazas para la banda de frecuencia más alta.

Reducir el ancho de banda de FI, reduce el ruido en las

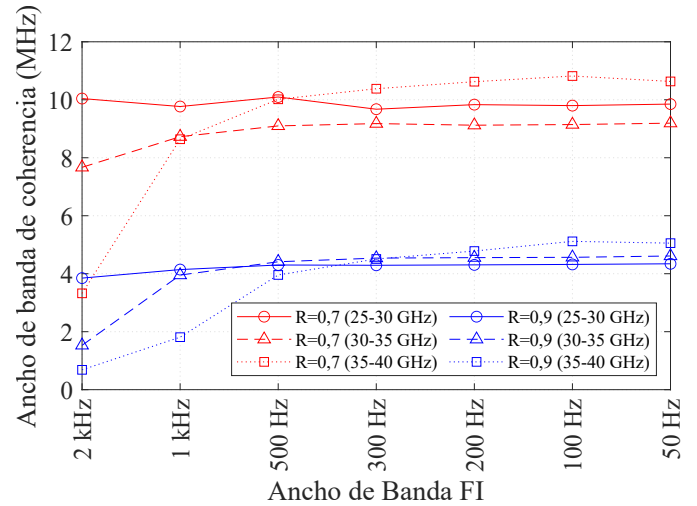


Fig. 5. Ancho de banda de coherencia en función del ancho de banda de FI aplicado

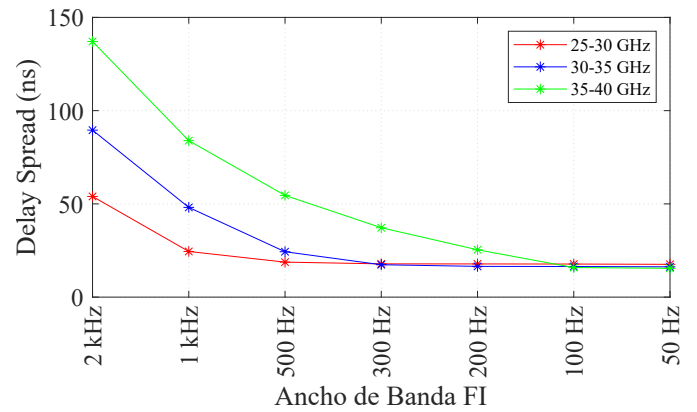


Fig. 6. Dispersión del retardo en función del ancho de banda de FI aplicado

medidas y por tanto, a aumenta el margen dinámico. Pero incrementa el tiempo de barrido. Para observar las diferencias al usar distinto ancho de banda de FI se fijó un factor de promediado de 4 trazas y una potencia de salida de 0 dBm. Para los cálculos posteriores se utilizó el mismo umbral que en el ejemplo anterior, -40 dBm. El resultado del cálculo del ancho de banda de coherencia (Fig. 5) y de la dispersión del retardo (Fig. 6) para valores de ancho de banda de FI entre 50 Hz y 2 kHz, indican que a menor ancho de banda de FI se obtiene mejor margen dinámico y por tanto una mejor estimación de los parámetros. En estas medidas no se obtiene un valor estable de ancho de banda de coherencia hasta utilizar un ancho de banda de FI de 500 Hz, y de 100 Hz para la dispersión del retardo, en la banda de frecuencias más alta.

Por último, el número de puntos de frecuencia escogido también afecta a la dispersión del retardo. Si se escoge un número de puntos muy pequeño, el resultado puede dar un efecto de aliasing en la respuesta en frecuencia del canal, y una resolución temporal máxima muy corta que no será suficiente para reconstruir la señal completa. El número de puntos mínimo necesario para evitar el aliasing vendrá dado por

$$N = \text{SPAN} \cdot \tau_m \quad (1)$$

siendo SPAN el ancho de banda medido con el ARV y  $\tau_m$  el

retardo máximo que se desea obtener en el PDP.

Para observar este efecto se han realizado medidas con un ancho de banda de 2 GHz en el rango de 25 a 27 GHz con un ancho de banda FI de 100 Hz, una potencia de salida de 0 dBm y un promediado de 4 trazas. El resultado del cálculo de la dispersión del retardo indica un cálculo más aproximado a partir de 1024 puntos, con un resolución en frecuencia de 1,955 MHz y una resolución temporal máxima de 511,5 ns.

#### B. Protocolo de obtención de los parámetros óptimos

Los parámetros óptimos variarán dependiendo del entorno de propagación, el sistema de medida utilizado o el margen dinámico que se desea obtener en las medidas. Por ello, en este apartado se define un protocolo con una serie de directrices a seguir para la sencilla obtención de los parámetros óptimos según el margen dinámico objetivo que se desea obtener con el menor tiempo de medida posible.

El primer parámetro a tener en cuenta es la potencia de salida del puerto del ARV, ya que al aumentar su valor se consigue mayor margen dinámico sin aumentar el tiempo de la medida. Hay que tener en cuenta la potencia máxima permitida por el ARV, el enlace de RoF o por los componentes del equipo de medida. En el sistema de medida descrito anteriormente la potencia máxima de salida permitida es de 8 dBm, por lo que tras posteriores pruebas, se comprobó un aumento del margen dinámico de aproximadamente 8 dB en comparación a utilizar una potencia de salida de 0 dBm.

El segundo paso es establecer unos parámetros en el ARV iniciales, como punto de partida para obtener los óptimos. El número de puntos vendrá dado por la ecuación (1) dependiendo del retardo máximo que se necesite obtener en el PDP. Con respecto al ancho de banda de FI, para las frecuencias empleadas, un buen punto de comienzo es utilizar un ancho de banda de FI de 100 Hz, ya que asegura un buen cálculo inicial de los parámetros al ser un ancho de banda reducido. Por último, es recomendable aplicar el mínimo promediado de 2 para obtener el menor tiempo de medida posible.

El tercer paso es realizar una medida simple con esta configuración y observar el PDP. Si no se ha cumplido el margen dinámico impuesto como objetivo en la medida, es necesario aumentar el factor de promediado al doble o reducir el ancho de banda de FI y volver a realizar la medida hasta que se obtenga el margen dinámico objetivo. Si por el contrario, ya se ha obtenido el margen dinámico objetivo o un margen dinámico mayor, el siguiente paso es aumentar el ancho de banda de FI y volver a realizar la medida. Si el margen dinámico sigue siendo igual o mayor que el objetivo y además el cálculo de los parámetros dan el mismo resultado en las dos medidas, significa que se puede seguir aumentando el ancho de banda de FI hasta que esto ya no se cumpla. Este último valor con el que se cumple la igualdad de los parámetros de dispersión será el óptimo para las medidas a realizar.

Siguiendo este método se ha conseguido reducir el tiempo total que conlleva una campaña de 22 grupos de medidas en un entorno de laboratorio. Se ha utilizado una potencia de salida de 8 dBm, un total de 8.192 puntos para medir en el rango de frecuencias de 24 a 40 GHz, un ancho de banda de FI de 200 Hz y un factor de promediado de 2. Con estos parámetros se ha realizado una medida MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) con matrices de dimensiones  $7 \times 7$  en

el URA y  $10 \times 1$  en el ULA. La duración total una medida es de 10 h 45 min aproximadamente, por lo que toda la campaña duraría 10 días sin parar de medir. Sin utilizar este método, se hubiesen realizado las medidas con un ancho de banda de FI de 100 Hz y un factor de promediado 4, ya que los resultados son buenos, pero una medida duraría unas 43 h y toda la campaña casi 40 días sin parar de medir. Con esto, se expone la gran ventaja de la optimización de los parámetros de medida para campañas con gran volumen de medidas.

#### IV. CONCLUSIONES

En esta contribución se han analizado distintas formas de obtener un mayor margen dinámico en medidas realizadas mediante una sonda de canal implementada en el dominio de la frecuencia optimizando el tiempo de medida al menor permitido. Se ha utilizado un enlace radio sobre fibra en el sistema de medida para mejorar el margen dinámico tanto en medidas de entornos en interior o exterior. Se han obtenido resultados de los principales parámetros que caracterizan el canal en función de los parámetros del ARV que permiten mejorar el margen dinámico en frecuencias milimétricas y se han analizado en función de su variación. Por último, se ha establecido un protocolo práctico y sencillo de obtención de los parámetros óptimos para reducir el tiempo de medida a partir de los resultados obtenidos.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad a través del proyecto TEC2017-86779-C2-2-R (AEI/FEDER, UE).

#### REFERENCIAS

- [1] Plan Nacional 5G 2018-2020.
- [2] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, and A. Lozano, "What will 5G be?" *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, Jun. 2014.
- [3] World Radio Communications Conference. Resolutions COM4/8-9. Sharm El-Sheikh, Egypt, 2019, Nov 2015.
- [4] European Commission - Radio Spectrum Policy Group, "Strategic Roadmap Towards 5G for Europe," Nov. 2016.
- [5] X.H. Mao, Y.H. Lee, and B.C. Ng, "Comparison of wideband channel sounding techniques," in *Proc. PIERS*, Aug. 2009, pp. 400-404.
- [6] C. Gentile et al., "Methodology for Benchmarking Radio-Frequency Channel Sounders Through a System Model," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 10, pp. 6504-6519, Oct. 2020.
- [7] L. Rubio, R.P. Torres, V.M. Rodrigo Peñarocha, J.R. Pérez, H. Fernández, J.M. Molina-García-Pardo and J. Reig, "Contribution to the Channel Path Loss and Time-Dispersion Characterization in an Office Environment at 26 GHz," in *Electronics*, 2019; 8(11):1261.
- [8] L. Rubio et al., "Millimeter Wave Channel Measurements in an Intra-Wagon Environment," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 12, pp. 12427-12431, Dec. 2019.
- [9] L. Rubio, J. Reig, H. Fernández, and V. M. Rodrigo-Peñarocha, "Experimental UWB propagation channel path loss and time-dispersion characterization in a laboratory environment," *Int. J. Antennas Propag.*, pp. 1-7, Mar. 2013, Art. no. 350167.
- [10] A. M. Street, L. Lukama and D. J. Edwards, "Use of VNAs for wideband propagation measurements," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, Vol. 148, pt. 1, No. 6, pp. 41 1-415, Dec. 2001.
- [11] A. M. Street, J. G. O. Moss, A. P. Jenkins and D. J. Edwards, "Outdoor-indoor wideband study for third generation communication systems," *IEE National Conference on Antennas and Propagation*, 1999, pp. 128-131.
- [12] G. Matz, A. F. Molisch, M. Steinbauer, F. Hlawatsch, I. Gaspard and H. Artes, "Bounds on the systematic measurement errors of channel sounders for time-varying mobile radio channels," *Gateway to 21st Century Communications Village. VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference (Cat. No.99CH36324)*, 1999, pp. 1465-1470 vol.3.





Organiza:

Escola de Enxeñaría  
de Telecomunicación

Universidade de Vigo

[← Contribuciones](#)

Español ▾

17:24:55 CEST

Cristina Català Lahoz ▾

Terminar sesión

[Sumario](#) > [Contribuciones](#) > [Datos de la contribución](#)



## Datos de la contribución

Grupo de trabajo/Tipo de contribución: Contribución URSI 2021

### Optimización de la configuración de una sonda de canal en el dominio de la frecuencia en bandas de milimétricas

171

[Català Lahoz, Cristina](#) ; [Bernardo Clemente, Bernardo](#) ; [Rodrigo Peñarrocha, Vicent Miquel](#) ; [Rubio Arjona, Lorenzo](#) ; [Reig Pascual, Juan-De-Ribera](#)

Organización: Universitat Politècnica de València, España

Enviado por: **Cristina Català Lahoz (Universitat Politècnica de València, ES)**, ID: 1210

Ponente: Català Lahoz, Cristina [cricala1@teleco.upv.es](mailto:cricala1@teleco.upv.es)

Temas: Radiación Dispersión y Radiopropagación

Palabras clave: sonda de canal, canal radio, propagación, milimétricas, medidas de canal

4 páginas

Impreso de copyright firmado por Cristina Català Lahoz el 28/06/2021

## Resumen

In this contribution to the conference, we present different methods to improve the dynamic range of mobile radio channel measurements using a channel sounder in the frequency domain for millimeter wave (mmWave) propagation measurements. The advantages of using a radio over fiber (RoF) link are explained to avoid the losses introduced by a coaxial cable in measurements carried out in indoor and outdoor environments. Furthermore, measurements are carried out in a laboratory environment in order to obtain the optimal configuration parameters to carry out large measurement campaigns in the shortest possible time while maintaining the highest possible dynamic range and the correct calculation of the dispersion parameters. Finally, a simple protocol is disclosed to obtain the optimal parameters mentioned through three short steps.

## Descargar

Primer archivo [Contribución URSI 2021.pdf](#)

[Sumario](#) > [Contribuciones](#) > [Datos de la contribución](#)

Imprimir visualización

[Aviso legal](#) · [Contacto: ursi2021@uvigo.es](mailto:ursi2021@uvigo.es)  
[Declaración de privacidad](#) · Congreso: URSI 2021

Conference Software - **ConfTool Pro** 2.6.138  
© 2001 - 2021 by Dr. H. Weinreich, Hamburg, Germany

---

**De:** Comité Científico URSI 2021  
**Enviado:** jueves, 1 de julio de 2021 20:00  
**Para:** cricala1@teleco.upv.es  
**CC:** catalalahozcristina@gmail.com  
**Asunto:** URSI 2021

Estimada Cristina Català Lahoz,

Me complace comunicarle que su contribución, referida a continuación, ha sido aceptada para su presentación en el XXXVI Simposio Nacional de la URSI, que se celebrará entre el 20 y 24 de Septiembre en Vigo en modo virtual con acceso remoto.

DATOS DE LA CONTRIBUCIÓN

-----

ID: 171

Título: Optimización de la configuración de una sonda de canal en el dominio de la frecuencia en bandas de milimétricas

Se abre un plazo, hasta el día 23 de Julio, para las acciones siguientes:

- Enviar la versión definitiva del trabajo, si en función de los comentarios de los revisores, considera conveniente hacer alguna mejora en el texto. Esta acción se realiza desde su cuenta en la plataforma de gestión de las contribuciones
- Enviar el copyright de la contribución. También en la plataforma de gestión de contribuciones
- Proceder a la inscripción anticipada de una persona por cada artículo aceptado. Esta inscripción se realiza en la WEB del simposio <https://ursivigo2021.com/inscripcion/> , directamente con la agencia encargada de la Secretaría Técnica (El Corte Inglés)

RESUMEN DE REVISIONES INDIVIDUALES

-----

Revisión 1

=====

Comentarios para los autores

-----

Buen trabajo para mejorar un sistema de medidas de comunicaciones 5G. Se describe detalladamente la implementación y la optimización del sistema de medida. No presentan ideas originales nuevas para la mejora de este tipo de medidas

-----

Revisión 2

=====

Comentarios para los autores

-----

Innovación moderada. Se trata de una labor de optimización de un método.

-----

Revisión 3

=====

Comentarios para los autores

-----

--

-----

Meta-revisión 4

=====

Comentarios para los autores

-----

--

Saludos cordiales

Antonio Pino / Iñigo Cuiñas

Comité Organizador

XXXVI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio

<https://www.conftool.net/ursi2021/>

<https://ursivigo2021.com/>