

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 μm 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.

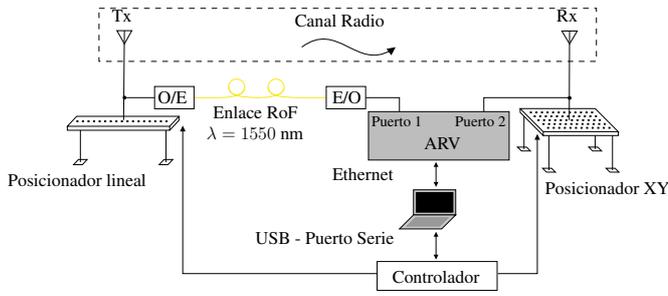


Fig. 1. Esquématico de la configuración de la sonda de canal.

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 (≈ -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

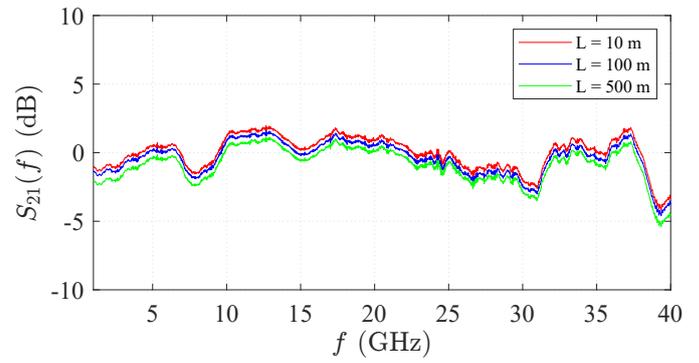


Fig. 2. Respuesta en frecuencia del enlace RoF para diferentes longitudes de fibra óptica.

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

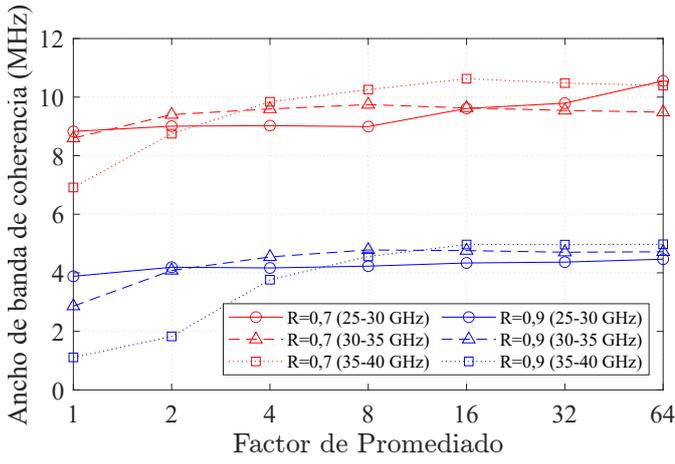


Fig. 3. Ancho de banda de coherencia en función del factor de promediado aplicado

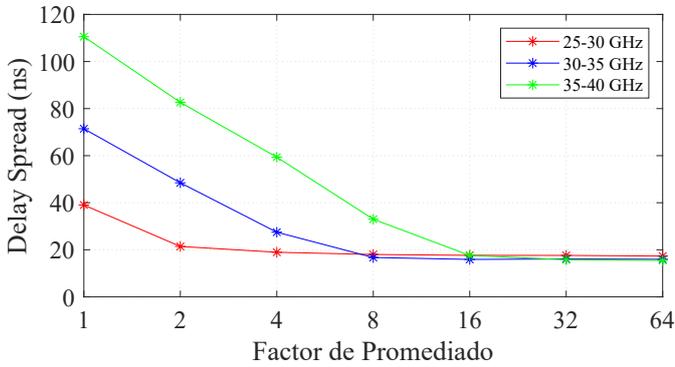


Fig. 4. Dispersión del retardo en función del factor de promediado aplicado

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 (≈ 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

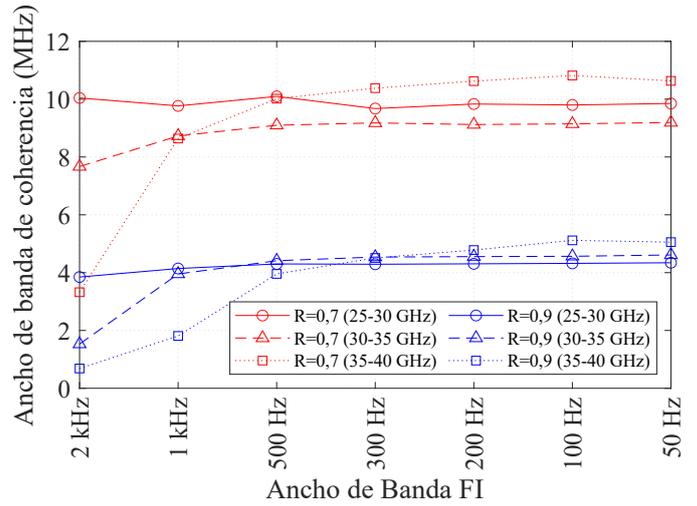


Fig. 5. Ancho de banda de coherencia en función del ancho de banda de FI aplicado

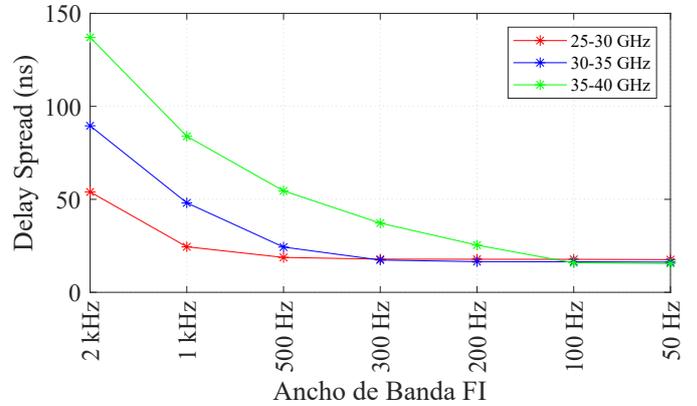


Fig. 6. Dispersión del retardo en función del ancho de banda de FI aplicado

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 τ_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 7×7 en

el URA y 10×1 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. I, 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.