

Modelado de las pérdidas de propagación en un escenario de oficinas en bandas de milimétricas

Lorenzo Rubio⁽¹⁾, Bernardo Bernardo⁽¹⁾, Vicent M. Rodrigo-Peñarrocha⁽¹⁾, Juan Reig⁽¹⁾, José-María Molina-García-Pardo⁽²⁾, Jesús R. Pérez⁽³⁾, Rafael P. Torres⁽³⁾, Herman Fernández⁽⁴⁾, Luis Valle⁽³⁾, José Basterrechea⁽³⁾ y Marta Domingo⁽³⁾

⁽¹⁾Instituto iTEAM, Universitat Politècnica de València, Valencia. España

⁽²⁾Dpto. Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena. Murcia. España

⁽³⁾Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria, Santander. España

⁽⁴⁾Escuela de Ingeniería Electrónica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso. Colombia.
E-mail: lrubio@ocom.upv.es

Resumen—In this conference contribution, we present millimeter-wave (mmWave) propagation measurements for an office environment from 25 to 40 GHz and investigate the path loss using the most common empirical models proposed in WINNER-II and adopted by the 3GPP: the single-frequency floating-intercept (FI) model, the single-frequency close-in (CI) free space reference distance model, the multi-frequency alpha-beta-gamma (ABG) model and the close-in free space reference distance with frequency path loss exponent (CIF). Both line-of-sight (LOS) and obstructed-LOS (OLOS) propagation conditions have been considered. The mean value of the model parameters, and their 95 % confidence intervals, have been derived using regression and optimization techniques.

I. INTRODUCCIÓN

Los primeros despliegues de redes 5G se realizarán en las bandas armonizadas por debajo de 1 GHz, en particular la banda de 700 MHz correspondiente al segundo dividendo digital, junto con la banda de 3,4-3,8 GHz [1]. Sin embargo, las elevadas tasas de transmisión que se contemplan en 5G solo se podrán alcanzar haciendo uso del espectro en frecuencias por encima de 24 GHz, donde es posible utilizar anchos de banda del orden de megahercios [2]. En la última Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR), celebrada a finales de 2019, se establecieron las bandas de milimétricas (mmWave) para el despliegue de las futuras redes móviles [3]. De ellas, las bandas de 26¹, 28, e incluso la de 38 GHz, son las que cuentan con mayor soporte e impulso internacional [4].

La estimación de las pérdidas básicas de propagación en términos de la frecuencia y distancia entre transmisor (Tx) y receptor (Rx) es importante para la evaluación y modelado de los futuros sistemas de comunicaciones móviles. A la hora de seleccionar un modelo de propagación para describir el comportamiento de las pérdidas puede recurrirse a modelos definidos a partir de idealizaciones y aproximaciones del entorno de propagación. En cualquier caso, es importante que los modelos utilizados tengan cierto fundamento físico relacionado con los mecanismos de propagación involucrados según el escenario y que, además, proporcionen cierta

repetitividad y estabilidad de los parámetros considerados a partir de diferentes campañas de medidas en escenarios similares. Partiendo de medidas experimentales, los modelos de propagación empíricos pueden contruirse siguiendo dos enfoques: (1) un enfoque físico, donde los modelos tienen en cuenta determinados mecanismos de propagación, y (2) un enfoque matemático basado en el ajuste de curvas a partir de los datos medidos. En esta comunicación se realiza una caracterización de las pérdidas de propagación en un escenario de oficinas a partir de medidas realizadas entre 25 y 40 GHz, estimando los parámetros de los modelos empíricos más utilizados propuestos en el proyecto europeo WINNER-II [5] y adoptados por el 3GPP [6].

Esta comunicación se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se describe brevemente la campaña de medidas realizada, indicando las principales características del entorno de propagación, el equipamiento y procedimiento de medida. En la Sección III se presentan los modelos de pérdidas considerados, para los que se estiman los parámetros que en ellos intervienen. Las principales conclusiones se indican en la Sección IV.

II. CAMPAÑA DE MEDIDAS

A. Entorno de propagación

Las medidas se han realizado en una sala típica de oficinas, cuyo mobiliario está constituido por armarios metálicos de archivo, sillas y mesas de trabajo con pantallas planas de ordenador y diverso material de escritorio, entre otros objetos. El edificio donde se encuentra ubicada la sala es de construcción moderna, con techos y suelos de hormigón armado, y paredes exteriores que combinan hormigón y grandes cristaleras. Las dimensiones en planta del entorno de propagación son 9,68×6,93 m². El techo está situado a una altura de 2,63 m.

B. Equipamiento y procedimiento de medida

La función de transferencia compleja del canal (CTF, *Channel Transfer Function*) se ha medido en el dominio de la frecuencia a través de una sonda basada en el analizador de redes vectorial (VNA, *Vector Network Analyzer*) Keysight

¹Aunque la banda de milimétricas corresponde estrictamente a las frecuencias entre 30 y 300 GHz, es frecuente en la literatura considerar también las frecuencias por encima de 10 GHz.

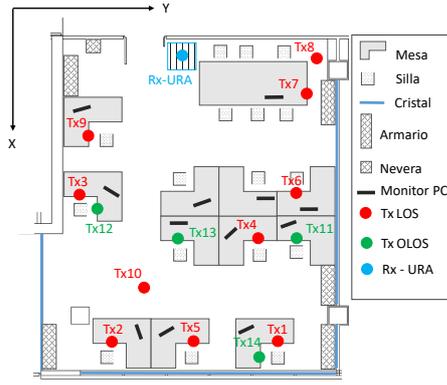


Fig. 1. Vista en planta del escenario de propagación. Se han indicado las posiciones del Rx (URA) y del Tx, distinguiendo entre LOS y OLOS.

N5227A. Se han utilizado las antenas QPAR QOM-SL-0.8-40-K-SG-L, omnidireccionales en el plano horizontal y con polarización vertical (lineal). El subsistema Tx se ha conectado al VNA a través de un enlace de radio sobre fibra (RoF, *Radio-over-Fiber*), modelo Optica OTS-2 de Emcore, evitando así las elevadas pérdidas que introducen los cables.

La antena Rx se ha ubicado sobre un sistema de posicionamiento XY, implementando un array rectangular uniforme (URA, *Uniform Rectangular Array*) de dimensiones 12×12 . La separación entre elementos del URA ha sido 3,04 mm, menor que $\lambda/2$ a 40 GHz ($\approx 3,7$ mm). Se ha medido el parámetro de *scattering* $s_{21}(f)$, equivalente a la CTF del canal radio, entre 25 y 40 GHz, con 8192 muestras en frecuencia. El ancho de banda del filtro de frecuencia intermedia fue de 100 Hz, como compromiso entre el tiempo de medida y el nivel de ruido. Previamente a la adquisición de las medidas se realizó un calibrado en respuesta de todos los elementos que forman el sistema de medida, excepto las antenas. Puesto que las antenas no pueden ser consideradas en el proceso de calibración, el parámetro $s_{21}(f)$ medido tiene en cuenta la respuesta conjunta del canal de propagación y las antenas utilizadas en Tx y Rx, en lo que se denomina canal radio [7].

En las medidas, la antena Tx se ha ubicado en diferentes posiciones a lo largo de la sala, emulando la posición de un equipo de usuario (UE, *User Equipment*). El subsistema Rx permaneció en la misma posición, cerca de una de las paredes, emulando la posición de un punto de acceso (AP, *Access Point*). La antena Rx se situó a una altura de 1,62 m, y la antena Tx a 0,90 m. En la Fig. 1 se muestra la vista en planta de la sala, junto con la ubicación de la antena Rx y las diferentes posiciones de la antena Tx. Las medidas se han realizado en condiciones de visión directa (LOS, *Line-of-Sight*) y obstrucción de la componente directa (OLOS, *Obstructed-LOS*), como consecuencia del bloqueo de la componente directa por los monitores de los ordenadores. Se ha medido en 10 posiciones con LOS y 4 en OLOS, siempre en condiciones de estacionariedad.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Pérdidas de propagación

Las pérdidas de propagación entre las antenas Tx y Rx para cada posición del URA pueden obtenerse promediando el parámetro de *scattering* $s_{21}(f)$ en frecuencia y teniendo

en cuenta la ganancia de las antenas en la dirección de la componente directa. Para cada posición de la antena Rx en el URA, las pérdidas de propagación en unidades logarítmicas, $PL(d)$, siendo d la separación Tx-Rx, se obtienen a partir de la siguiente expresión [8]:

$$PL(d) = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|s_{21}(f_n, d)|^2}{g_{Tx}(f_n)g_{Rx}(f_n)M(f_n)} \right), \quad (1)$$

donde $N = 1092$ es el número de muestras en frecuencia, equivalente a un ancho de banda de 2 GHz centrado sobre la banda de frecuencias a analizar; f_n es la muestra de frecuencia n -ésima; g_{Tx} y g_{Rx} indican la ganancia de las antenas Tx y Rx, respectivamente, en la dirección definida por la contribución directa; y $M(f_n)$ es un término que tiene en cuenta las pérdidas por desadaptación de las antenas. $M(f_n)$ se calcula mediante la siguiente expresión:

$$M(f_n) = (1 - |s_{11}^{Tx}(f_n)|^2)(1 - |s_{11}^{Rx}(f_n)|^2), \quad (2)$$

siendo $s_{11}^{Tx}(f_n)$ y $s_{11}^{Rx}(f_n)$ el parámetro de *scattering* $s_{11}(f)$ de las antenas Tx y Rx, respectivamente.

El modelo FI (*Floating-Intercept model*) ha sido muy utilizado para describir el comportamiento de las pérdidas de propagación con la distancia en la banda de microondas y más recientemente en mmWave [9], [10], siendo uno de los modelos propuestos en el proyecto WINNER-II y estandarizado por el 3GPP [5], [6]. El modelo FI establece una relación lineal entre las pérdidas de propagación en unidades logarítmicas y el logaritmo de la distancia, dadas por la siguiente expresión:

$$PL^{FI}(d) = \beta + 10\alpha \log_{10}(d) + \chi_{\sigma}^{FI}, \quad \text{donde } d \geq 1, \quad (3)$$

donde el término β es un parámetro de *offset*, α es el exponente de pérdidas y χ_{σ}^{FI} es una variable aleatoria gaussiana de media nula y desviación típica σ que modela la diferencia entre los valores de pérdidas medidos y los valores medios estimados por el modelo, describiendo así el efecto de variabilidad de la señal recibida sobre la distancia Tx-Rx. El modelo FI se define a partir de un enfoque matemático basado en el ajuste de curvas a los datos medidos. En la literatura también es frecuente modelar las pérdidas de propagación mediante el modelo CI (*Close-In free space reference distance model*), que expresa las pérdidas de propagación totales a partir de las pérdidas en espacio libre para una distancia Tx-Rx de referencia igual a 1 m, más un segundo término que tiene en cuenta la dependencia con la distancia. La expresión del modelo CI es la siguiente:

$$PL^{CI}(d) = FSPL(f, 1 \text{ m}) + 10n \log_{10}(d) + \chi_{\sigma}^{CI}, \quad \text{para } d \geq 1 \quad (4)$$

donde $FSPL(f, 1 \text{ m})$ son las pérdidas de propagación en espacio libre ($FSPL$, *Free Space Path Loss*) para una distancia Tx-Rx igual a 1 m a la frecuencia f , n es el exponente de pérdidas y χ_{σ}^{CI} es una variable aleatoria gaussiana de media nula y desviación típica σ , igual que en el modelo FI. Aunque el exponente de pérdidas se extrae a partir de técnicas de regresión o ajuste de curvas a los datos medidos, este modelo tiene sentido físico al considerar la dependencia con la distancia de forma intrínseca a través de las pérdidas de propagación en espacio libre dadas por la expresión de Friis. Este modelo tiene la ventaja de que solo se estima

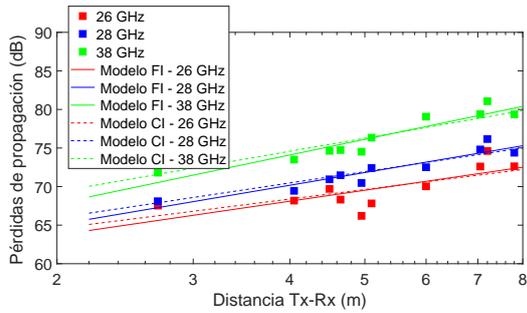


Fig. 2. Pérdidas de propagación en función de la distancia Tx-Rx. Valores medidos y estimación a través de los modelos FI y CI, en condiciones LOS.

TABLA I
VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO FI

Frecuencia	β ($\beta_{95\%}$)	α ($\alpha_{95\%}$)	σ (dB)
LOS			
26 GHz	59,29 (58,80-59,79)	1,464 (1,396-1,533)	1,73
28 GHz	59,93 (59,67-60,19)	1,701 (1,665-1,736)	0,90
38 GHz	61,49 (61,19-61,80)	2,094 (2,052-2,136)	1,06
OLOS			
26 GHz	60,01 (59,46-60,56)	1,880 (1,808-1,952)	0,92
28 GHz	65,56 (65,07-66,05)	1,415 (1,351-1,480)	0,82
38 GHz	71,24 (70,97-71,51)	1,135 (1,100-1,171)	0,45

un parámetro a partir de las medidas, resultando en un modelo sencillo y proporcionando una definición estándar del exponente de pérdidas, facilitando así la comparación entre medidas obtenidas en diferentes escenarios de propagación.

En la Fig. 2 se muestran las pérdidas de propagación medias obtenidas a partir de las medidas para las bandas de frecuencia de 26, 28 y 38 GHz en condiciones LOS, junto con las pérdidas estimadas por los modelos FI y CI. Indicar que ambos modelos producen resultados muy similares. En las Tablas I y II se resumen los parámetros de los modelos, junto con el intervalo de confianza al 95%. Comparando estos valores con los publicados en la literatura, comentar que en [11] los autores han obtenido exponentes de pérdidas del orden de 1,45 y 2,15 para condiciones LOS y Non-LOS (NLOS), respectivamente, en base a medidas realizadas a 28 GHz, utilizando el modelo CI; y del orden de 2,0 y 2,2 en LOS y NLOS, respectivamente, utilizando el modelo FI. En [10], también a 28 GHz, se han medido valores del exponente de pérdidas de 1,2 y 3,5 usando el modelo FI en LOS y NLOS, respectivamente. Aunque las diferencias son atribuibles al tipo de escenario de propagación, los valores obtenidos en situaciones LOS suelen ser inferiores a 2, indicando cierta ganancia con respecto a condiciones de espacio libre.

Los parámetros de los modelos obtenidos muestran una dependencia con la frecuencia, lo que da pie a definir modelos donde se establece una dependencia de las pérdidas de propagación con la distancia y la frecuencia de forma conjunta. Así, el modelo ABG (A-alpha, B-beta y G-gamma) establece una relación de las pérdidas de propagación con la distancia Tx-Rx y la frecuencia dada por (5) [9], donde α y γ son los coeficientes del modelo que establecen la dependencia de las pérdidas de propagación con la distancia y la frecuencia, respectivamente, β es un parámetro de *offset* y χ_{σ}^{ABG} es una variable aleatoria que describe las fluctuaciones a larga escala.

TABLA II
VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO CI

Frecuencia	FSPL (1 m)	n ($n_{95\%}$)	σ (dB)
LOS			
26 GHz	60,74 dB	1,269 (1,256-1,281)	1,75
28 GHz	61,38 dB	1,505 (1,498-1,511)	0,93
38 GHz	64,04 dB	1,749 (1,741-1,757)	1,15
OLOS			
26 GHz	60,74 dB	1,785 (1,775-1,795)	0,93
28 GHz	61,38 dB	1,960 (1,950-1,971)	1,00
38 GHz	64,04 dB	2,075 (2,489-2,522)	1,08

Los parámetros del modelo pueden obtenerse combinando técnicas de regresión y optimización encaminadas a disminuir la desviación típica de la variable χ_{σ}^{ABG} . En este trabajo se ha hecho uso de la aplicación de Matlab `cftool`. El modelo ABG es una extensión del modelo FI para múltiples frecuencias, de hecho, la expresión (5) se reduce a (3) para $\gamma = 0$ o 2 si solo se considera una única frecuencia.

En [9] se presenta un modelo simple de dos parámetros que permite analizar la dependencia de las pérdidas con la distancia y la frecuencia. Se trata del modelo CIF (*Close-In free space reference distance with Frequency path loss exponent*), que realmente es una extensión del modelo CI. En el modelo CIF las pérdidas de propagación vienen dadas por la expresión (6), donde n es el exponente de pérdidas que establece una dependencia con la distancia Tx-Rx, b es un parámetro de ajuste que trata de relacionar las variaciones del exponente de pérdidas con la frecuencia, ya que se ha observado que éste tiende a aumentar con la frecuencia como sugieren los resultados mostrados en la Tabla II. Notar que para $b = 0$, el modelo CIF tiende al modelo CI de frecuencia única. El parámetro f_0 es una frecuencia de referencia que se calcula a partir de las frecuencias en las que se han tomado las medidas que conforman el modelo, y sirve como punto de equilibrio en la dependencia del exponente de pérdidas con la frecuencia. El valor de f_0 puede estimarse mediante la expresión siguiente [9]:

$$f_0 = \frac{\sum_{k=1}^K f_k N_k}{N_k}, \quad (7)$$

donde K es el número de frecuencias consideradas, N_k es el número de medidas correspondientes a la frecuencia k -ésima. En nuestro caso, $f_0 = 32,5$ GHz. En (6), χ^{CIF} es una variable aleatoria gaussiana de media nula, cuya desviación típica describe la variabilidad de las pérdidas de propagación medias a gran escala.

En las Figs. 3 y 4 se muestra el ajuste del modelo ABG a las medidas en condiciones LOS y OLOS, respectivamente. Los parámetros estimados para los modelos ABG y CIF, junto con el intervalo de confianza al 95%, se resumen en las Tablas III y IV. Indicar que los valores de σ son menores en el modelo ABG, tanto en LOS como OLOS, y en situaciones OLOS para ambos modelos. En [12], en base a medidas realizadas a 28 y 73,5 GHz, los valores de los parámetros obtenidos para el modelo ABG han sido $\alpha = 0,9$, $\beta = 26,8$ y $\gamma = 2,6$ para LOS, mientras que en NLOS se han medido $\alpha = 3,1$, $\beta = 1,3$ y $\gamma = 3,8$. Del mismo modo, para el modelo CIF, en [12] se ha obtenido $n = 1,2$ y $b = 0,18$ para LOS, mientras que en NLOS se ha medido $n = 3$ y $b = 0,21$.

$$PL^{\text{ABG}}(f, d) = 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d}{1 \text{ m}} \right) + \beta + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{f}{1 \text{ GHz}} \right) + \chi_{\sigma}^{\text{ABG}}, \text{ donde } d \geq 1 \text{ y } f \geq 1 \text{ GHz}, \quad (5)$$

$$PL^{\text{CIF}}(f, d) = \text{FSPL}(f, 1 \text{ m}) + 10n \left(1 + b \left(\frac{f - f_0}{f_0} \right) \right) \log_{10}(d) + \chi_{\sigma}^{\text{CIF}}, \text{ donde } d \geq 1 \text{ y } f \geq 1 \text{ GHz}, \quad (6)$$

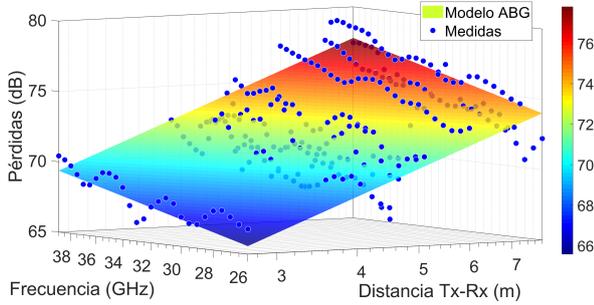


Fig. 3. Pérdidas de propagación en términos de la frecuencia y distancia Tx-Rx según el modelo ABG, en condiciones LOS.

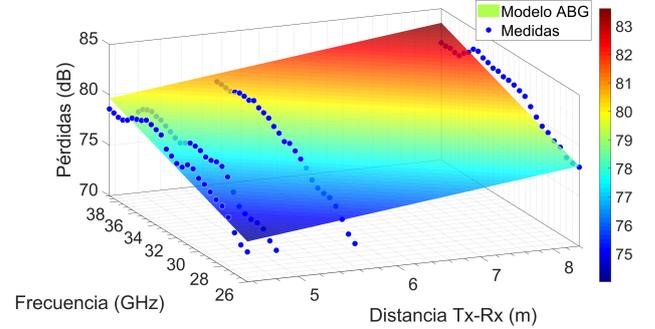


Fig. 4. Pérdidas de propagación en términos de la frecuencia y distancia Tx-Rx según el modelo ABG, en condiciones OLOS.

TABLA III
VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO ABG

	α ($\alpha_{95\%}$)	β ($\beta_{95\%}$)	γ ($\gamma_{95\%}$)	σ (dB)
LOS	1,829 (1,709-1,950)	27,22 (22,59-31,84)	2,153 (1,852-2,454)	1,32
OLOS	1,475 (1,289-1,660)	18,74 (13,01-24,48)	3,220 (2,851-3,588)	1,01

TABLA IV
VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO CIF

	b ($b_{95\%}$)	n ($n_{95\%}$)	σ (dB)
LOS	0,093 (-0,0427-0,2298)	1,434 (1,411-1,458)	1,41
OLOS	0,302 (0,1776-0,4263)	2,088 (2,057-2,119)	1,14

IV. CONCLUSIONES

En esta contribución se han analizado las pérdidas de propagación en la banda de 25 a 40 GHz en base a medidas experimentales. Las medidas han sido obtenidas en un escenario de oficina mediante una sonda de canal implementada en el dominio de la frecuencia. Se han utilizado los modelos FI, CI, ABG y CIF para modelar las pérdidas de propagación, estimando los valores medios de los parámetros que en ellos intervienen, así como sus intervalos de confianza al %95. Los resultados se han particularizado para las bandas de 26, 28 y 38 GHz por ser éstas las que cuentan con mayor soporte e impulso internacional para el despliegue de los futuros sistemas 5G en frecuencias milimétricas. Indicar que los resultados obtenidos permiten establecer comparaciones entre las diferentes bandas, puesto que han sido extraídos del mismo conjunto de medidas (25-40 GHz).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad a través de los proyectos TEC2016-78028-C3-2-P, TEC2017-86779-C2-1-R y TEC2017-86779-C2-2-R, a través de la Agencia Estatal

de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y por COLCIENCIAS en Colombia.

REFERENCIAS

- [1] Plan Nacional 5G 2018-2020. Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital.
- [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] Word 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] P. K. et al., "WINNER II channel models," *European Commission, IST-4-027756-WINNER, Tech. Rep. D1.1.2*, Sept. 2007.
- [6] 3GPP TR 25.996, "Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations," Sept. 2012.
- [7] R. Steele and L. Hanzo, *Mobile radio communications*, 2nd ed. Wiley, 1999.
- [8] L. Rubio, R. Torres, V. M. Rodrigo-Peñarrocha, J. Pérez, H. Fernández, J. Molina-García-Pardo, and J. Reig, "Contribution to the channel path loss and time-dispersion characterization in an office environment at 26 GHz," *Electronics*, vol. 8, no. 11, 2019.
- [9] G. R. MacCartney, T. S. Rappaport, S. Sun, and S. Deng, "Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 GHz and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks (invited paper)," *IEEE Access*, pp. 2388–2424, Dec. 2015.
- [10] S. Deng, M. K. Samimi, and T. S. Rappaport, "28 GHz and 73 GHz millimeter-wave indoor propagation measurements and path loss models," in *IEEE International Conference on Communications*, Jun. 2015, pp. 1244–1250.
- [11] P. Tang, J. Zhang, M. Shafi, P. A. Dmochowski, and P. J. Smith, "Millimeter wave channel measurements and modelling in an indoor hotspot scenario at 28 GHz," in *Proc. 88th Veh. Technol. Conf. (VTC)*, Aug. 2018, pp. 1–5.
- [12] S. Sun, G. R. MacCartney, and T. S. Rappaport, "Millimeter-wave distance-dependent large-scale propagation measurements and path loss models for outdoor and indoor 5G systems," in *Proc. 10th Euro Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Apr. 2016, pp. 1–5.