

Estudio teórico-experimental de la propagación en interiores en la banda FR3

Fabián Correa Quinchía⁽¹⁾, José María Molina García-Pardo⁽¹⁾, Juan Pascual García⁽¹⁾.
fabian.correa@edu.upct.es, josemaria.molina@upct.es, juan.pascual@upct.es.

⁽¹⁾Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena.

Resumen—In this paper we have compared the time domain delay spread parameters for the FR3 band using 1-40 GHz measured data with those obtained from simulations in the Wireless Insite software. Path loss models have been proposed and a difference of about 2.65 dB in the mean value of the measured and simulated received power has been obtained, the percentage error in the mean square value of the measured and simulated delay spread varies and is at best equal to 4.51 %. A convergence study shows that to decrease the percentage error in the root mean square delay spread between the measured and simulated results it is not necessary to simulate more than 4 reflections, while in the case of the relative received power it is necessary to consider at least 7 reflections.

I. INTRODUCCIÓN

La banda de ondas milimétricas denominada FR3 ha surgido como un fuerte candidato para resolver los problemas de cobertura que padecen los sistemas que operan a frecuencias altas debido a las características inherentes de la propagación radio, además la banda FR3 ofrece también altas tasas de transferencia de datos, baja latencia y soporte para conectividad masiva de IoT.

La Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones estableció las bandas de frecuencia 6G en la WRC'19 [1], y más recientemente en la WRC'23 [2]. Además, la primera fase de la iniciativa de asociación público-privada 5G Horizonte 2030 de la UE está investigando las frecuencias de 6-100 GHz, incluidas las frecuencias de ondas milimétricas, para la banda ancha móvil de velocidad de datos ultra-alta de 5G, entre otras aplicaciones. Aunque se dispone de estudios significativos de las características del canal en las bandas de 28 GHz, 38 GHz y 60 GHz para entornos interiores y exteriores sólo se han realizado unos pocos ensayos en otras bandas de ondas milimétricas y para entornos exteriores y exteriores-interiores, así como escenarios con movilidad. Sin embargo, debido a las frecuencias más altas y a los anchos de banda más amplios en comparación con los estándares existentes por debajo de 6 GHz como 4G “Long Term Evolution (LTE)” y “Wireless Local Area Network (WLAN)” las aplicaciones de ondas milimétricas requieren consideraciones específicas.

El objetivo principal de este trabajo es predecir la dispersión temporal en ambientes de interiores para la banda FR3, para lograr esto se han hecho dos cosas: primero, a partir de las mediciones y del análisis realizado en [3] estudiar los parámetros de dispersión temporal en la banda FR3 y proponer modelos de “path loss” para las distintas bandas que componen FR3 y hacer lo mismo a partir de simulaciones en el trazador de rayos comercial Wireless InSite, segundo, realizar un estudio de convergencia para comparar los resultados de las medidas con las simulaciones.

El documento se organiza de la siguiente manera: La sección.

II define los parámetros que describen la caracterización en pequeña escala del canal radio. La sección. III describe el diseño experimental y el análisis de resultados. La sección. IV muestra los resultados de la comparación entre las mediciones y las simulaciones. Por último, en la sección. V se exponen las conclusiones.

II. CARACTERIZACIÓN EN PEQUEÑA ESCALA DEL CANAL RADIO

La caracterización de un canal radio variable en el tiempo se puede realizar mediante la respuesta al impulso compleja $h(\tau)$ (τ es el retardo temporal). La densidad de potencia “Power delay profile (PDP)” se obtiene promediando espacialmente o temporalmente la respuesta al impulso del canal $h(\tau)$ en un área local, Ec. 1.

$$PDP = \overline{|h(\tau)|^2} \quad (1)$$

Para obtener la respuesta al impulso compleja $h(\tau)$, debemos hacer la transformada inversa de Fourier de la función de transferencia $H(f)$ respecto a la frecuencia f [4].

Experimentalmente la función de transferencia $H(f)$ se obtiene del analizador vectorial de redes. El exceso de retardo medio “mean excess delay,” se define como:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (2)$$

El valor cuadrático medio del ensanchamiento de retardo “rms delay spread”, nos da una medida del ensanchamiento del retardo en torno al exceso de retardo medio, es decir, de la cantidad y potencia de las réplicas del multicamino y se calcula como la raíz cuadrada del segundo momento del PDP, Ec. 3.

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} - \left(\frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \right)^2} \quad (3)$$

El “Path Loss (PL)” representa las pérdidas de propagación, se puede calcular integrando el “PDP” en el dominio del tiempo o promediando en frecuencia la función de transferencia en frecuencia, pero dado que las medidas incluyen los efectos de las ganancias de las antenas transmisora G_{tx} y receptora G_{rx} , se deben abstraer estos efectos en las medidas a la hora de calcular el “PL”, como puede apreciarse en la Ec. 4.

$$PL = -\langle |H(f)| \rangle_f + G_{rx} + G_{tx} = -\langle |p(\tau)| \rangle_\tau + G_{rx} + G_{tx} \quad (4)$$

En el “single-frequency floating-intercept FI Model”, las pérdidas de propagación se definen mediante la Ec. 5.

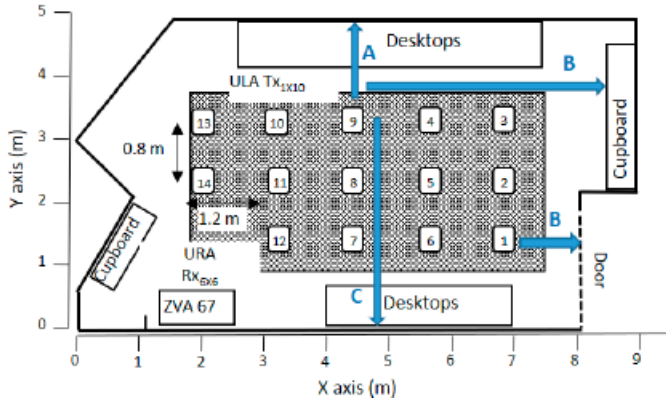


Figura 1: Mapa de las medidas [3].

$$L = L_0 + 10 \times n \log_{10} d + \chi_\sigma \quad (5)$$

En este caso L_0 se calculan a partir de las medidas, d (en metros) es la distancia entre T_x y R_x , n se denomina "Path loss exponent (PLE)," y caracteriza la dependencia de las pérdidas con la distancia, σ se conoce como "shadow factor (SF)", es la desviación estándar de la variable aleatoria con distribución Gaussiana de media cero que modela el desvanecimiento a gran escala del canal radio (en dB) [5].

III. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En [3], se describe detalladamente la campaña de mediciones realizadas, las características del laboratorio, sus componentes, la disposición del receptor y del transmisor se describen en la Fig. 1. Cabe destacar que para todas las posiciones de medida existe un camino directo "Line of Sight (LoS)". Los equipos utilizados para las mediciones se listan a continuación: Analizador de redes Vectoriales ("Vector Network Analyzer (VNA)") (Rhode and Schwarz ZVA 10 MHz-67 GHz), "RoF-link" (EMCORE, Optiva OTS-2, 40 GHz), Antenas omnidireccionales de banda ultra ancha (STEATITE Q-PAR ANTENNAS, 0.8-40 GHz).

III-A. Banda FR3

Comparando el análisis realizado en la banda FR3 con el análisis realizado en [3] para el "BW" 1-40 GHz, podemos notar que el valor de potencia del rayo directo en FR3 es mayor en 2.8 dB en comparación al "BW" 1-40 GHz. La Fig. 2 muestra las pérdidas de propagación en todas las posiciones medidas en la banda de frecuencias FR3. En la Tabla. I se muestran los valores de los parámetros del "1-slope (FI-model)" Ec. 5.

En "3GPP Release 16" se dividió La banda FR3 en sub-bandas [6]. En este trabajo estudiamos los intervalos: 7.125-8 GHz, 10.7-13.25 GHz, 14.3-15.35 GHz 21.1-23.6 GHz. En la Fig. 3, se muestra el "path loss" para la banda FR3. Los parámetros del modelo "1s-slope" se resumen en la Tabla. I. La Fig. 4, corresponde al valor de "RMS" para los distintos intervalos de la banda FR3. El modelo "1-slope" para el valor de "RMS" es el siguiente:

$$DS = DS_0 + 10n_{DS} \times \log_{10}(d) + X_\sigma(ns) \quad (6)$$

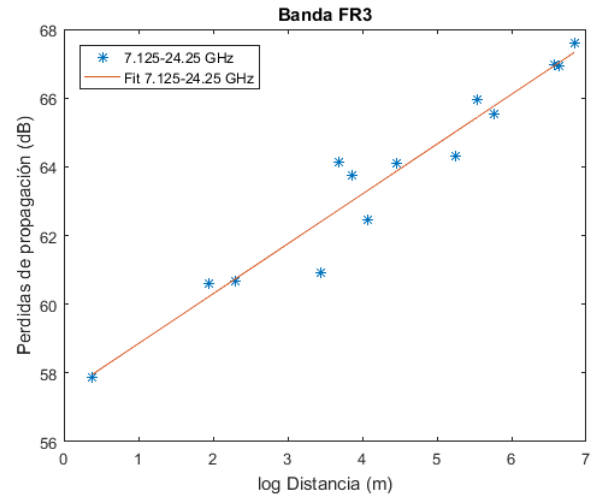


Figura 2: Pérdidas de propagación banda FR3

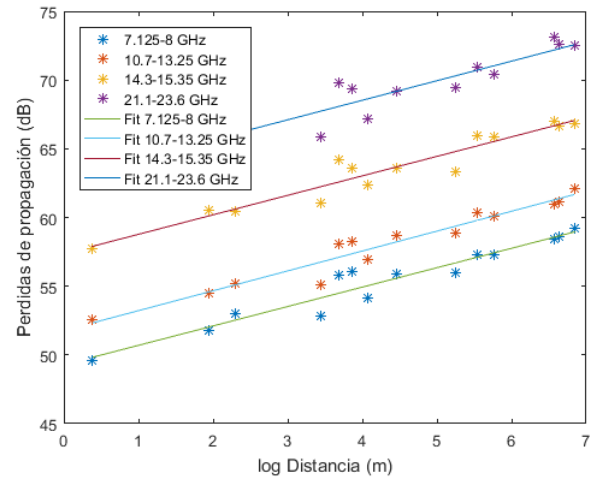


Figura 3: "Path Loss" para las sub-bandas de FR3.

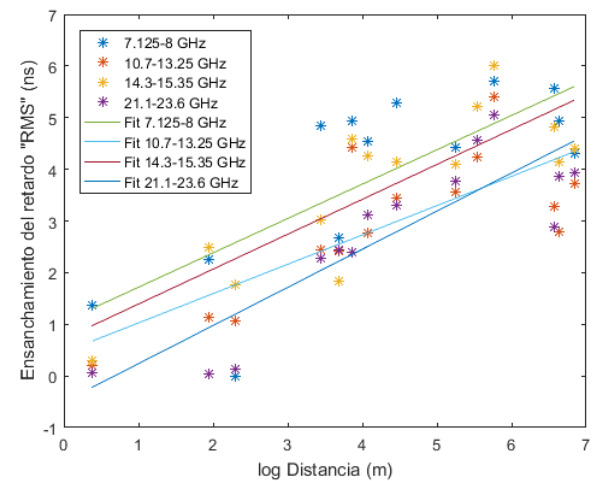


Figura 4: Valor cuadrático medio del ensanchamiento del retardo "RMS" para la banda FR3.

IV. COMPARACIÓN CON LAS SIMULACIONES EN WIRELESS INSITE

Wireless InSite es un trazador de rayos comercial que permite estudiar la propagación de las ondas electromagnéticas en

Banda (GHz)	n	$L_0(dB)$	χ_σ
7,125 – 24,25	1,4510	57,4	2,0882
7,125 – 8	1,4120	49,2	3,9386
10,7 – 13,25	1,4462	51,7	2,9216
14,3 – 15,35	1,4172	57,3	3,6480
21,1 – 23,6	1,4223	62,8	2,7030

Tabla I: Modelo “1-slope”.

entornos urbanos y en interiores [7]. En este trabajo utilizamos el modelo *Full-3D* dada sus capacidades para la modelación en 3 dimensiones. El valor de los parámetros que caracterizan la antena omnidireccional como la ganancia y el “E-plane half power bandwidth” a la frecuencia de trabajo que corresponde a la frecuencia central de la banda FR3 $f_c = 15,6875$ GHz se encuentran en el catálogo de la antena [8]. En las mediciones se han utilizado “arrays virtuales” para la configuración del transmisor y del receptor, de esta manera la “PDP” medida se calcula como el promedio de la respuesta al impulso de estos “arrays” para cada posición del transmisor. Por otro lado, en las simulaciones no se utilizan “arrays” sino una única antena para el transmisor/receptor, de esta manera del trazador de rayos obtenemos directamente la respuesta al impulso compleja “CIR”.

IV-A. Reflexiones

Variando el número de reflexiones desde 2 hasta 10 y realizando un análisis de convergencia para el valor de “RMS” como se muestra en la Fig. 5 y para la potencia recibida como se muestra en la Fig. 6, podemos ver como a partir de 4 reflexiones los valores de “RMS” y “PRR” medido y simulado convergen. Considerando solo 2 reflexiones ver Fig. 7, podemos apreciar las componentes multi-camino que llegan al receptor con una potencia menor en comparación a la potencia del “LoS”. Al aumentar a 4 reflexiones ver Fig. 8, podemos apreciar como surgen más componentes en retardos mayores, al aumentar el número de reflexiones, cada vez aparecen más componentes en retardos grandes pero con potencias poco significativas como podemos ver para el caso de 10 reflexiones Fig. 9. En la Fig. 10 se visualizan todos los rayos cuando el transmisor se encuentra en la posición 13. El valor de la potencia asociado a cada rayo en dB se indica en la barra de colores.

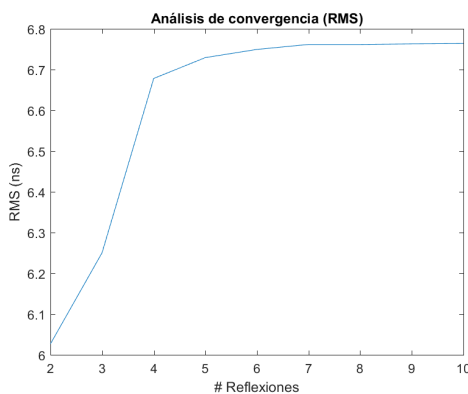


Figura 5: Análisis de convergencia RMS, para la posición 13 del transmisor.

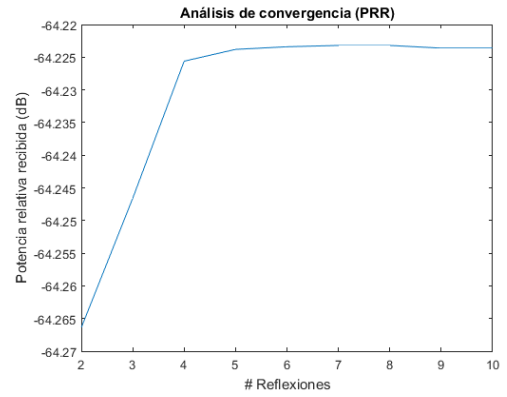


Figura 6: Análisis de convergencia PRR, para la posición 13 del transmisor.

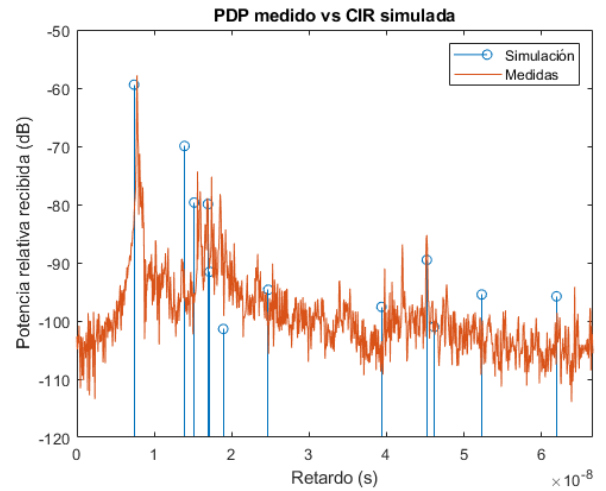


Figura 7: 2 reflexiones para la posición 13 del transmisor para la banda FR3.

IV-B. RMS y Potencia relativa recibida (PRR) en la banda FR3

Para comparar la potencia recibida medida con la potencia simulada, hacemos la suma de todas las componentes de la potencia recibida en el dominio del tiempo, los valores obtenidos así como su diferencia se muestran en la Tabla. II, en esta tabla también se muestran los valores de “RMS” medido, simulado y el error porcentual entre ellos para el caso de 7 reflexiones.

V. CONCLUSIONES

Se han comparado los parámetros de dispersión por retardo en el dominio del tiempo para la banda FR3 utilizando datos medidos en la banda de 1-40 GHz con los obtenidos a partir de simulaciones con el software Wireless Insite. Se han propuesto modelos de pérdidas de propagación y se ha obtenido una diferencia de 6,25 dB en el valor medio de la diferencia en la potencia recibida relativa (PRR) medida y simulada; el porcentaje de error en el valor cuadrático medio de la dispersión por retardo (RMS) medida y simulada varía y es, en el peor de los casos igual a 154.19 % y en el mejor de los casos, igual a 4.51 %. Un estudio de convergencia muestra que para la PRR no es necesario simular más de 4 reflexiones

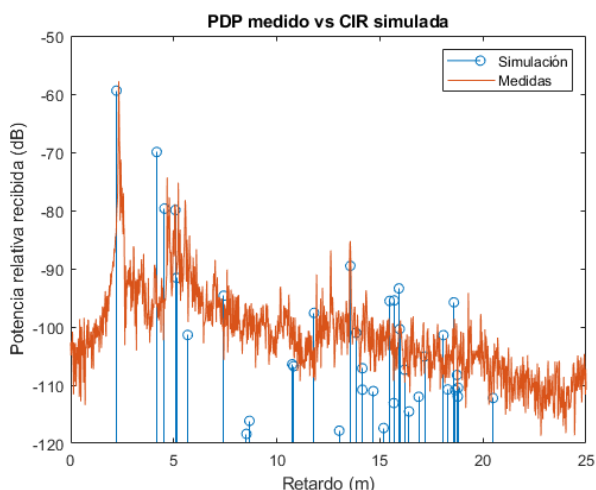


Figura 8: 4 reflexiones para la posición 13 del transmisor para la banda FR3.

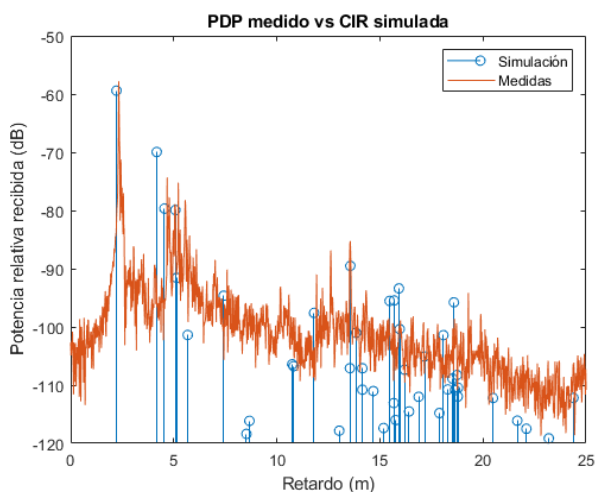


Figura 9: 10 reflexiones para la posición 13 del transmisor para la banda FR3.

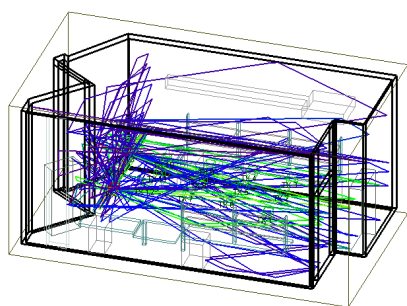


Figura 10: Visualización de todos los rayos para la posición 13 del transmisor.

mientras que para el RMS debemos considerar al menos 7 reflexiones.

Posición	RMS medida	RMS simulación	Error RMS (%) M=30 dB	PRR medida	PRR simulación	dif PRR
1	5,12	6,76	31,90	-57,4	-64,2	6,7
2	4,50	6,17	37,16	-57,4	-65,2	7,7
3	4,70	5,34	13,65	-58,0	-65,4	7,3
4	5,98	3,97	33,44	-56,0	-64,0	8,0
5	4,76	5,02	5,47	-56,4	-62,6	6,1
6	4,63	6,35	37,03	-54,7	-62,0	7,2
7	3,48	4,88	40,1	-51,4	-58,1	6,7
8	3,85	5,69	47,69	-52,9	-59,6	6,6
9	4,76	4,03	15,18	-54,5	-61,1	6,5
10	4,70	4,49	4,51	-54,2	-59,6	5,4
11	1,50	3,68	145,63	-51,1	-56,6	5,5
12	1,23	3,14	154,19	-48,3	-52,6	4,2
13	3,12	2,98	4,60	-54,6	-58,9	4,3
14	1,76	2,74	55,40	-51,0	-55,7	4,6
\bar{X}	3,86	4,66	36,46	-54,1	-60,4	6,25

Tabla II: Valor de “RMS” (medición) vs. “RMS” (simulación), “PRR” (medición) vs. “PRR” (simulación) para 7 reflexiones. El “RMS” se mide en ns y el “PRR” en dB.

Aplicando el análisis de las mediciones a la banda FR3 vemos que el factor de decaimiento n , es casi-constante y menor a 2 tanto para toda la banda FR3 como para cada una de las sub-bandas estudiadas lo que concuerda con las propiedades de ambientes de interiores [9].

En todos los casos al variar el número de reflexiones vemos que la potencia relativa recibida calculada con las simulaciones es menor a la potencia relativa recibida medida, o en términos de las pérdidas, las pérdidas de propagación son mayores en el caso de las simulaciones, esto se debe a que el efecto de la ganancia de las antenas se ha eliminado de las mediciones.

AGRADECIMIENTOS

Ayuda PID2022-136869NB-C32 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por “FEDER Una manera de hacer Europa”.

REFERENCIAS

- [1] Proceedings of the World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19), Sharm el-Sheikh, Egypt, 28 October–22 November 2019.
- [2] <https://www.bnamericas.com/es/noticias/conferencia-mundial-identificamas-espectro-para-segundo-movil>.
- [3] Pascual-García. Juan, Martínez-Ingles. M.-T, Gaillot. Davy, Juan-Llácer. Leandro, Molina-García-Pardo. Jose-Maria, (2020). *LoS Theoretical and Experimental MIMO Study from 1–40 GHz in Indoor Environments*, Electronics. 9. 1688. 10.3390/electronics9101688, 2020.
- [4] J. Pascual, J. Molina. J. M, L. J. Llácer, *Sistemas de Comunicaciones Móviles- Caracterización del Canal Móvil*, Universidad Politécnica de Cartagena, 2010.
- [5] Molina-García-Pardo. José-María, Rubio. L, Martínez-Ingles M.-T, Egea-López. E, Aroca. Antonio, Peñarrocha. Vicent, Reig. J, *Wireless Channel Characterization from 2 to 28 GHz in an Outdoor Parking Lot*, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. PP. 1-5. 10.1109/LAWP.2024.3363904, 2024.
- [6] 3GPP, “7-24 GHz frequency range,” Tech. Rep. (TR) 38.820, 2021, V16.1.0.Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3599
- [7] REMCOM, *Electromagnetic Simulation Software, 3D Wireless Communication and Propagation Prediction Software Reference Manual*, Version 3.4.4, 2022.
- [8] <https://www.steatite-antennas.co.uk/wp-content/uploads/2019/01/QOM-SL-0.8-40-K-SG-L.pdf>
- [9] Pimienta del Valle, Domingo and Sáenz, Sergio and Coronado, Pedro and Tomas, Luis and García-del-Pino, Pedro and Riera, Jose, *Indoor Path Loss Measurements at the 5G Millimeter-Wave Bands of 26 and 39 GHz* 2019.