



Modelos de canal de desvanecimiento para comunicaciones Millimeter-Wave

Fading channel models for Millimeter-Wave communications

José David Vega Sánchez

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

jose.vega01@epn.edu.ec

ORCID: 0000-0002-3305-1109

Luis Urquiza-Aguilar

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

luis.urquiza@epn.edu.ec

ORCID: 0000-0002-6405-2067

Martha Cecilia Paredes Paredes

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

cecilia.paredes@epn.edu.ec

ORCID: 0000-0001-5789-4568

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.09.17.003>

Recibido: Octubre 04, 2020

Aceptado: Enero 13, 2021

Resumen: Una evaluación de desempeño realista de cualquier sistema de comunicación inalámbrica requiere el uso de un modelo de canal de desvanecimiento que refleje sus características principales. Los modelos tradicionales Rayleigh y Nakagami-m han sido (y siguen siendo) la base de la mayor parte de investigación teórica sobre tecnologías inalámbricas en la actualidad, incluso para tecnologías emergentes, tal como las comunicaciones en ondas milimétricas. En este artículo, a través del uso del test estadístico error medio cuadrático, mostramos que los modelos FMR y κ - μ *shadowed* se ajustan de mejor manera a las medidas de campo en ambientes exteriores a 28 GHz que los modelos canal convencionales. Por lo que, estos modelos generalizados se presentan como alternativa físicamente factible que pueden ser utilizados como punto de partida al evaluar el desempeño de comunicaciones en escenarios de ondas milimétricas.

Palabras clave: *Canales Generalizados de Desvanecimiento, Ondas Milimétricas, κ - μ Shadowed, Modelo de Múltiples Rayos Fluctuantes.*

Abstract: A realistic performance assessment of any wireless communication system requires the use of a fading channel model that reflects its main characteristics. The traditional Rayleigh and Nakagami-m models have been (and still are) the basis of most theoretical research on wireless technologies today, even for emerging technologies, such as millimeter-wave communications (mm-Wave). In this article, through the use of the mean square error statistical test, we show that the FMR and κ - μ shadowed models fit better to field measurements in outdoor

environments at 28 GHz than the conventional channel models. Therefore, these generalized models are introduced as a physically feasible alternative that can be used as a benchmark when evaluating communications performance in mm-Wave scenarios.

Keywords: *Generalized Fading Channels, mm-Wave, κ - μ Shadowed, Fluctuating Multiple Rays Model.*

1. Introducción

La demanda de nuevas aplicaciones inalámbricas y el rápido crecimiento de usuarios conectados saturarán en los próximos años la capacidad de los sistemas actuales de comunicaciones móviles. Basado en estos antecedentes, investigadores y diseñadores de red buscan nuevas tecnologías emergentes para garantizar velocidades de datos ultra-altas, cobertura de radio ultra-amplias, gran cantidad de dispositivos conectados simultáneamente, latencias ultra-bajas y un consumo de energía eficiente en los dispositivos de la red [1] [2]. En este contexto, la quinta generación de redes inalámbricas (5G) surge con una solución para satisfacer estos estrictos requerimientos mediante el empleo de tecnologías inteligentes y amigables con el medio ambiente [3].

La clave para la operación exitosa de las comunicaciones 5G será la unificación de diferentes tecnologías conviviendo en un mismo entorno. Dentro de estas tecnologías habitantes de 5G destacan las siguientes: número masivo de antenas (*massive MIMO*, del inglés *multiple-input multiple-output*), redes heterogéneas (HetNet, del inglés *heterogeneous networks*), acceso múltiple no ortogonal (NOMA, del inglés *non-orthogonal multiple access*), transmisión/recepción full dúplex, formación de haz directos (BF, del inglés *Beamforming*) y comunicaciones de ondas milimétricas (mm-Wave, del inglés *millimeter-wave*) [4] [5]. En particular, mm-Wave ha abarcado un amplio interés en la academia e industria ya que permitirá superar la escasez del espectro electromagnético causado por: (i) la creciente demanda de ancho de banda por diversas aplicaciones (ii) el rápido aumento de usuarios y objetos inteligentes en las redes inalámbricas [6].

Debido al hecho de que las características de propagación del canal de radio mm-Wave son diferentes de las de bandas de frecuencia inferiores a 3 GHz, la mayoría de las medidas y modelos de características de canal existentes no son relevantes para las bandas de mm-Wave. Por lo que, el conocimiento fundamental de características de propagación del canal de onda milimétrica incluyendo modelos de canal de desvanecimiento precisos y fiables, es fundamental para el desarrollo de las comunicaciones móviles 5G [7]. Basado en estos antecedentes, en este artículo investigamos el desempeño de nuevos modelos de canal de desvanecimiento para comunicaciones mm-Wave, a saber, κ - μ shadowed [8], y Fluctuating Multiple Rays (FMR) [9][10]. Además, comparamos el desempeño de estos nuevos modelos generalizados de canal con aquellos modelos tradicionales normalmente utilizados en la literatura (por ejemplo, Rayleigh, Rice, Nakagami-m) para evaluar el comportamiento de sistemas de comunicaciones móviles. A través de los resultados presentados en este artículo, mostramos que los modelos de canal de desvanecimiento clásicos carecen de versatilidad para modelar las características de propagación en ambientes de ondas milimétricas. Opuesto a este resultado, los modelos de canal FMR y κ - μ shadowed presentan un buen ajuste a medidas de canal de un sistema de comunicaciones a 28 GHz. El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera. La Sección 2 aborda trabajos relacionados al modelamiento de canal para comunicaciones mm-Wave. En la Sección 3, la función densidad de probabilidad (FDP) y la función densidad acumulada (FDA) de los modelos κ - μ shadowed y FMR son revisadas. En la Sección 4, se ajusta los parámetros de los modelos κ - μ shadowed y FMR a la medidas empíricas de comunicaciones a 28 GHz dadas en [11] a través del uso de un algoritmo de optimización heurístico. La Sección 4 muestra resultados numéricos y discusiones. Finalmente, la Sección 5 presenta las conclusiones del trabajo.

Notación: $f_Z(\cdot)$ y $F_Z(\cdot)$ denotan la función densidad de probabilidad y la función densidad acumulada de la variable aleatoria Z , respectivamente. Además, $\Gamma(\cdot)$ es la función gamma [10], $\Upsilon(\cdot, \cdot)$ es la función gamma superior incompleta [10], ${}_1F_1(\cdot, \cdot; \cdot)$ es la función Hypergeometrica confluyente [10], $L_n(\cdot)$ denota el polinomio de Laguerre de n -th orden [10], $\Phi_2(\cdot, \cdot; \cdot, \cdot)$ es la función Hypergeometrica bivariada [12], y (\cdot) es el símbolo Pochhammer [10].

2. Estado del arte

En los últimos años, diversas investigaciones han sido enfocadas a las comunicaciones mm-Wave, en donde la toma de medidas empíricas del canal de propagación de sistemas de comunicación inalámbrica ha sido llevada a cabo por la industria y grupos de investigación [13][14] [15] [16]. Sin embargo, gran parte de las investigaciones en la literatura usan las distribuciones Rayleigh y Rician como modelos de canal en comunicaciones mm-Wave para capturar el desvanecimiento a pequeña escala en escenarios sin línea de vista (NLOS, del inglés *non line-of-sight*) y con línea de vista (LOS, del inglés *line-of-sight*), respectivamente [17]. Recientemente en [11], la función de distribución acumulada (FDA) de desvanecimiento a pequeña escala obtenida de una medición empírica en exteriores de 28 GHz demostró que el desvanecimiento de Rician era más adecuado que Rayleigh incluso para entornos NLOS. Sin embargo, un análisis más exhaustivo de los resultados de [11] muestran que los modelos de desvanecimiento tradicionales (Rayleigh, Rician, y Nakagami-m) en la literatura no logran capturar con exactitud las fluctuaciones aleatorias sufridas en las componentes dominantes de la señal recibida [18]. Con el fin de superar estas limitaciones en la caracterización del canal a pequeña escala en la banda de mm-Wave, nuevos modelos de canal de desvanecimiento han sido propuestos en los últimos años. Específicamente, en este trabajo nos centramos en aquellos modelos que han probado caracterizar de forma precisa las ondas milimétricas en escenarios 5G. Por lo que, podemos mencionar los siguientes: 1) κ - μ *shadowed* [8]: En este modelo de desvanecimiento, la señal de potencia recibida está estructurada por una suma finita de agrupaciones de múltiples trayectos. Cada agrupación está compuesta por una componente dominante y por ondas difusas dispersas. Todos los componentes especulares están sujetos a la fluctuación de sombra-miento causado por obstáculos o movimientos del cuerpo humano. 2) Múltiple rayos fluctuantes (FMR, del inglés *Fluctuating multiple rays*) [9][10]: En este modelo de canal, la señal recibida puede ser expresada como una superposición de N rayos dominantes, acompañados de ondas adicionales asociadas a la dispersión difusa. Además, la fluctuación en la amplitud de los rayos dominantes también es considerada. Este hecho se debe al bloqueo de la señal por parte de obstáculos o por diversas perturbaciones electromagnéticas.

3. Caracterización Estadística de los Modelos de Canal

3.1. Modelo de Múltiple Rayos Fluctuantes

De acuerdo a [9], la función densidad de probabilidad (FDP) y la FDA de la relación-signal-ruido (SNR, del inglés *signal-to-noise-ratio*) sobre desvanecimiento de canal tipo FMR, son dadas por:

$$f_Y(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \sum_{z=0}^{\infty} C_z L_z \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \right), \quad (1)$$

$$F_Y(\gamma) = \sum_{z=0}^{\infty} C_z \sum_{k=0}^z \frac{(-1)^k}{k!} \binom{z}{k} \Upsilon \left(k + 1, \frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \right), \quad (2)$$

donde $\bar{\gamma}$ denota la SNR media recibida dada por [9]

$$\bar{\gamma} = \gamma_0 (\sum_n^N V_n^2 + \Omega), \quad (3)$$

en que $\gamma_0 \triangleq P_T/N_0$, siendo P_T la potencia transmitida y N_0 la potencia media del ruido blanco aditivo gaussiano. Además, N es el número de componentes especulares dominantes, V_n es la amplitud de la n -th componente dominante, y Ω es potencia media de las componentes difusas dispersas. El coeficiente C_z puede ser calculado de manera recursiva por

$$C_z = \sum_{k=0}^z \frac{(-\epsilon)^k}{k!} \binom{z}{k} u_{N+1}^{(2k)}, \quad (4)$$

donde $\epsilon = (\sum_n^N V_n^2 + \Omega)^{-1}$, y

$$u_j^{(2k)} = \sum_{h=0}^k \binom{k}{h}^2 u_{j-1}^{(2h)} v_j^{(2k-2h)} \text{ para } j = 2, \dots, N+1, \quad (5)$$

donde el valor inicial es $u_1^{(2k)} v_1^{2k}$, y

$$u_j^{(2k)} = \begin{cases} V_j^{2k} \frac{(m_{FMR})_k}{m_{FMR}^k}, & \text{para } j = 1 \dots N, \\ (m_{FMR})_k \left(\frac{\Omega}{m_{FMR}} \right)^k, & \text{para } j = N + 1. \end{cases} \quad (6)$$

donde m_{FMR} indica la severidad de la fluctuación de la amplitud en los rayos dominantes debido a obstáculos y demás perturbaciones. Note que, valores arbitrarios de N , en (3)-(6) permite tomar en cuenta el efecto de tener múltiples ondas especulares y difiere ampliamente con los modelos de canal de desvanecimiento convencionales. Además, el modelo FMR para valores de $N = 0, 1, 2$, se reduce a los casos particulares de Rayleigh, Rician y Dos rayos fluctuantes (FTR, del inglés *Fluctuating Two Rays*) [10].

3.2. κ - μ shadowed

Basándose en [8], la FDP y FDA de la SNR sobre desvanecimiento de canal tipo κ - μ shadowed, son expresadas por:

$$f_Y(\gamma) = \frac{\mu^\mu m_{\kappa-\mu}^{m_{\kappa-\mu}(1+\kappa)\mu}}{\Gamma(\mu) \bar{\gamma}^{(\mu\kappa+m_{\kappa-\mu})m_{\kappa-\mu}}} \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \right)^{\mu-1} e^{-\frac{\mu(1+\kappa)\gamma}{\bar{\gamma}}} {}_1F_1 \left(m_{\kappa-\mu}, \mu; \frac{\mu^2(1+\kappa)\gamma}{(\mu\kappa+m_{\kappa-\mu})\bar{\gamma}} \right), \quad (7)$$

$$F_Y(\gamma) = \frac{\mu^{\mu-1} m_{\kappa-\mu}^{m_{\kappa-\mu}(1+\kappa)\mu}}{\Gamma(\mu) (\mu\kappa+m_{\kappa-\mu})^{m_{\kappa-\mu}}} \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \right)^\mu \Phi_2 \left(\mu - m_{\kappa-\mu}, m_{\kappa-\mu}, \mu + 1; -\frac{\mu(1+\kappa)\gamma}{\bar{\gamma}}, -\frac{\mu(1+\kappa)m_{\kappa-\mu}\gamma}{\bar{\gamma}(\mu\kappa+m_{\kappa-\mu})} \right), \quad (8)$$

donde $\bar{\gamma}$ es la SNR media recibida, μ , $m_{\kappa-\mu}$, y κ son los parámetros de desvanecimiento que representan el número de agrupaciones multitrayecto, la severidad del sombreado, y el radio entre la potencia total de los componentes dominantes y el total de potencia de las ondas difusas esparcidas. Los casos particulares del modelo κ - μ shadowed pueden ser encontrados en la Tabla 1 en [8].

4. Materiales y métodos

En la sección previa, hemos introducido las estadísticas (FDP y FDA) de los modelos de canal FMR y κ - μ shadowed. En esta sección detallaremos la metodología utilizada para validar los modelos de canal de desvanecimiento con la ayuda de mediciones empíricas de un sistema de comunicaciones a 28 GHz presentadas en [11]. Al igual que en trabajo de [11], usaremos la FDA de la envoltoria de la señal recibida para las comparaciones de desempeño entre los diferentes canales de desvanecimiento. En este sentido, el error medio cuadrático (EMC) ha sido empleado para definir el factor de error, ϵ , con el fin de cuantificar la bondad de ajuste entre la FDA empírica y la FDA teórica, denotadas por $\hat{F}_r(\cdot)$ y $F_r(\cdot)$, respectivamente. Por lo que, matemáticamente, ϵ , puede ser formulado a través de

$$\epsilon \triangleq \min_x |\hat{F}_r(x) - F_r(x)|, \quad (9)$$

donde $\hat{F}_r(\cdot)$ es importada de [17], y $F_r(\cdot)$ puede ser obtenida a partir de (2) u (8) través de una simple transformación de variables, es decir, $F_r(r) = F_Y(r^2)$. El factor de error en (9) lo usaremos para la validación de los siguientes modelos de canal: (i) Rayleigh, (ii) Nakagami-m, y (iii) κ - μ shadowed. En este contexto, para la validación del modelo FMR, se tomaron los datos teóricos dados en [17], en donde los autores usaron dos rayos dominantes, es decir $N=2$. Dicho modelo es conocido como dos rayos fluctuantes (FTR, del inglés *Fluctuating Two Rays*). Cabe mencionar que, los valores óptimos de los parámetros de desvanecimiento de la FDA del modelo FTR fueron calibrados a través de las mediciones empíricas de [11], haciendo uso de la herramienta estadística *Kolmogorov-Smirnov* (KS). Ahora, con el fin de encontrar los valores óptimos de los parámetros de desvanecimiento de la FDA teórica en (9) para los modelos Rayleigh, Nakagami-m y κ - μ shadowed, usaremos el algoritmo iterativo llamado *Particle Swarm Optimization* (PSO). PSO es un algoritmo de optimización heurístico

basado en una población candidata de soluciones [19]. En Algoritmo 1, colocamos el pseudocódigo del PSO para resolver el problema planteado en (9) para cada uno de los modelos de desvanecimiento. Específicamente, configuramos los siguientes parámetros: (i) Rayleigh: $\mu = 1$, $\kappa \rightarrow 0$, $m_{\kappa-\mu} \rightarrow \infty$, $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_{Rayleigh}$; (ii) Nakagami-m: $\mu = m_{naka}$, $\kappa \rightarrow 0$, $m_{\kappa-\mu} \rightarrow \infty$, $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_{naka}$. Por conveniencia de notación denotamos los vectores y matrices con negrita y letras minúsculas y mayúsculas, respectivamente. A continuación, una breve explicación del algoritmo utilizado. La función PSO devuelve los siguientes resultados: 1) *fobest*: mínimo valor de la función costo, es decir ϵ , en (9); 2) *xgbest*: valores óptimos de los parámetros de desvanecimiento (por ejemplo, μ , κ , $m_{\kappa-\mu}$, $\bar{\gamma}$) de la FDA teórica que minimizan (9). Note, que si emplea el Algoritmo 1 para el caso Nakagami-m, el número de valores óptimos devueltos en *xgbest* serían dos, a saber, m_{naka} y $\bar{\gamma}_{naka}$.

Algoritmo 1. Método de optimización PSO.

Algoritmo 1 : PSO

```

1: function FCOSTO(X)
2:   db  $\leftarrow$  -18 : 3 : 5 ▷ Vector del nivel de la señal en dB
3:   xm  $\leftarrow$  10db/10
4:   ym  $\leftarrow$   $\hat{F}_r(\cdot)$  ▷ Medición empírica [17, Fig. 6] de igual tamaño de db
5:    $F_r(r; \mu, \kappa, \bar{\gamma}, m_{\kappa-\mu}) \leftarrow$  Eq. 8 ▷ Eq. 8 reemplazando  $F_r(r) = F_\gamma(r^2)$ 
6:   aux = length(X(:, 1))
7:   for jj  $\leftarrow$  1 to aux do
8:     YP(jj, :)  $\leftarrow$   $F_r(\mathbf{db}; \mathbf{X}(jj, 1), \mathbf{X}(jj, 2), \mathbf{X}(jj, 3), \mathbf{X}(jj, 4))$ 
9:   end for
10:  Y  $\leftarrow$  1/aux * |sum((ym - YP)2)| ▷ Función costo,  $\epsilon$ , dada en Eq. 9
11:  return Y
12: end function
13: function PSO
14:   iter  $\leftarrow$  50 ▷ número de iteraciones
15:   p  $\leftarrow$  150 ▷ Tamaño de la población
16:   c1  $\leftarrow$  1 ▷ Coeficiente para la mejor posición personal
17:   c2  $\leftarrow$  1 ▷ Coeficiente para la mejor posición global
18:   w  $\leftarrow$  2 ▷ Coeficiente peso de inercia
19:   n  $\leftarrow$  4 ▷ número de variables
20:   varmin  $\leftarrow$  [ $\mu_{\min}$   $\kappa_{\min}$   $\bar{\gamma}_{\min}$   $m_{\kappa-\mu_{\min}}$ ] ▷ Fijar valores mínimos
21:   varmax  $\leftarrow$  [ $\mu_{\max}$   $\kappa_{\max}$   $\bar{\gamma}_{\max}$   $m_{\kappa-\mu_{\max}}$ ] ▷ Fijar valores máximos
22:   for i  $\leftarrow$  1 to n do ▷ Posición inicial de las partículas
23:     X(:, i)  $\leftarrow$  (varmax(i) - varmin(i)) * rand(p, 1) + varmin(i)
24:   end for
25:   fitness  $\leftarrow$  FCOSTO(X) ▷ Evaluación de la función costo (fc)
26:   [fobest, idxbest]  $\leftarrow$  min(fitness) ▷ fobest: menor valor de fc; idxbest: índice de la menor fc
27:   xgbest  $\leftarrow$  X(idxbest, :) ▷ mejores parámetros que minimizan la fc
28:   fpbest  $\leftarrow$  fitness
29:   XPBEST  $\leftarrow$  X
30:   V  $\leftarrow$  zeros(p, n) ▷ Velocidad inicial de las partículas
31:   for i  $\leftarrow$  1 to iter do
32:     V  $\leftarrow$  w * V + c1 * rand(p, n) * (XPBEST - X) + c2 * rand(p, n) * (XPBEST - X) ▷ Nueva velocidad inicial de las partículas
33:     X  $\leftarrow$  X + V ▷ Nueva posición de las partículas
34:     fitness  $\leftarrow$  FCOSTO(X) ▷ Nueva evaluación de la función costo (fc)
35:     ▷ MEMORIA
36:     XPBEST(find(fitness < fpbest), :)  $\leftarrow$  X(find(fitness < fpbest), :)
37:     fpbest(find(fitness < fpbest), :)  $\leftarrow$  fitness(find(fitness < fpbest), :)
38:     ▷ COOPERACION
39:     [fobest, idxbest]  $\leftarrow$  min(fitness)
40:     xgbest  $\leftarrow$  X(idxbest, :)
41:     ▷ Función decrecimiento de inercia
42:     w  $\leftarrow$  w * 0.7
43:   end for
44:   return fobest, xgbest
45: end function

```

5. Resultados y discusiones

Es esta sección, a través del EMC, definiremos cuál de las FDAs teóricas descritas a lo largo del artículo se ajusta mejor a los datos prácticos de la FDA empírica obtenida en [11]. Para el análisis en cuestión, cada uno de los parámetros de desvanecimiento de los modelos de canal (es decir, Rayleigh, Nakagami-m y κ - μ shadowed) han sido estimados en la sección anterior (algoritmo PSO).

En las Figuras 1 y 2, comparamos las FDAs teóricas con los datos de la FDA empírica correspondientes a los escenarios LOS y NLOS obtenidos de [11]. Como se puede observar, el modelo kappa es el de que mejor se ajusta a los datos medidos, ofreciendo valores más cercanos a la FDA real. Este desempeño se debe a que dicho modelo de canal ofrece más grados de libertad de ajuste (μ , κ , $m_{\kappa-\mu}$, $\bar{\gamma}$) que los demás modelos presentados. Además, note que el valor de κ para el caso LOS ($\kappa = 8.45$) es mayor que para el NLOS ($\kappa = 2.95$), como era de esperarse. De este resultado, podemos inferir que el pobre ajuste de los modelos Rayleigh y Nakagami-m es debido a que en dichos modelos $\kappa \rightarrow 0$. Para el escenario LOS presentado en la Figura 1, tenemos un resultado muy interesante, donde se puede observar que el ajuste realizado por el κ - μ shadowed hace un ligero cambio de concavidad (ver, rango de -10 dB a 0 dB) para seguir la tendencia de la curva empírica. Esta flexibilidad de ajuste de dicho modelo se debe a los parámetros μ , $m_{\kappa-\mu}$.

Ahora, con respecto al desempeño del modelo FTR, se puede observar que esta distribución ofrece un mejor ajuste a los datos experimentales que los modelos Rayleigh y Nakagami-m. Note que al igual que en la distribución κ - μ shadowed, el modelo FTR también es capaz de modificar a través del parámetro m_{FTR} la concavidad y convexidad de la curva teórica con el fin de conseguir un mejor ajuste a los datos medidos. Finalmente, a partir de los resultados discutidos, es posible concluir que los modelos generalizados de canal proporcionan un mejor ajuste que los modelos tradicionales. Vale la pena mencionar que un mejor desempeño de ajuste viene acompañado de un incremento en la complejidad matemática. Sin embargo, este inconveniente se ve recompensado con una ganancia significativa en la calidad de ajuste.

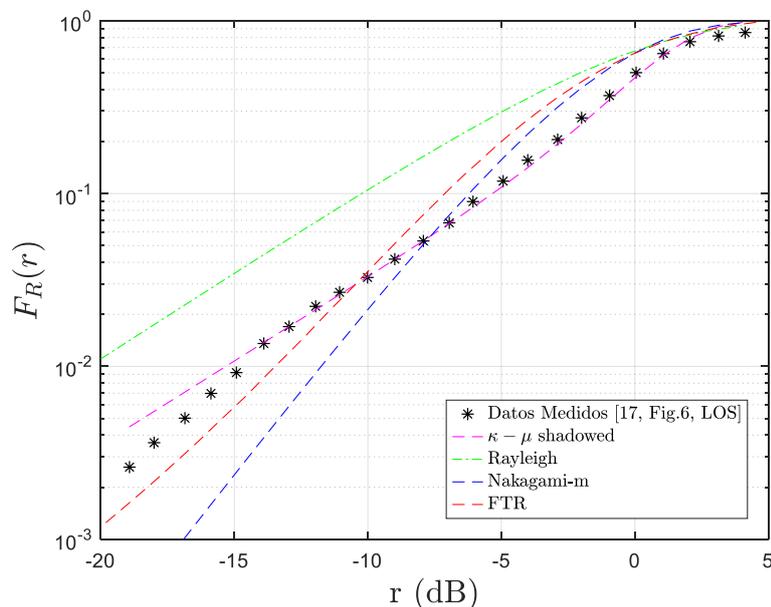


Figura 1. Curvas teóricas vs. empírica de la FDA de la señal de amplitud recibida para un escenario LOS a 28 GHz. Los parámetros de desvanecimientos para cada caso son: $K_{FTR} = 80$, $\Delta = 0.5873$, $m_{FTR} = 2$ [16]; $\kappa = 8.45$, $\mu = 0.48$, $m_{\kappa-\mu} = 1.25$, $\bar{\gamma} = 1.6$; $\bar{\gamma}_{Rayleigh} = 0.9$; $\bar{\gamma}_{naka} = 0.9$, $m_{naka} = 2$.

La Tabla 1 resume los parámetros estimados y los valores del EMC para los modelos estadísticos de canal bajo estudio. A partir de los resultados tabulados, se puede inferir estadísticamente que en que todos los escenarios mostrados, la mejor bondad de ajuste (resaltado en negritas) entre la FDA empírica y la teórica ha sido alcanzada

por el modelo generalizado κ - μ shadowed. Finalmente, es bueno resaltar que en la literatura actual diversas investigaciones están siendo desarrolladas bajo la premisa del uso de los modelos κ - μ shadowed y FMR. Por ejemplo, podemos citar los siguientes trabajos: 1) redes heterogéneas en 5G sobre canales κ - μ shadowed [20]; 2) Seguridad en capa física sobre canales κ - μ shadowed [21] y FMR [22]; 3) Comunicaciones cooperativas sobre canales FTR [23]; 4) comunicaciones móviles futuras sobre canales FTR [24], entre otros.

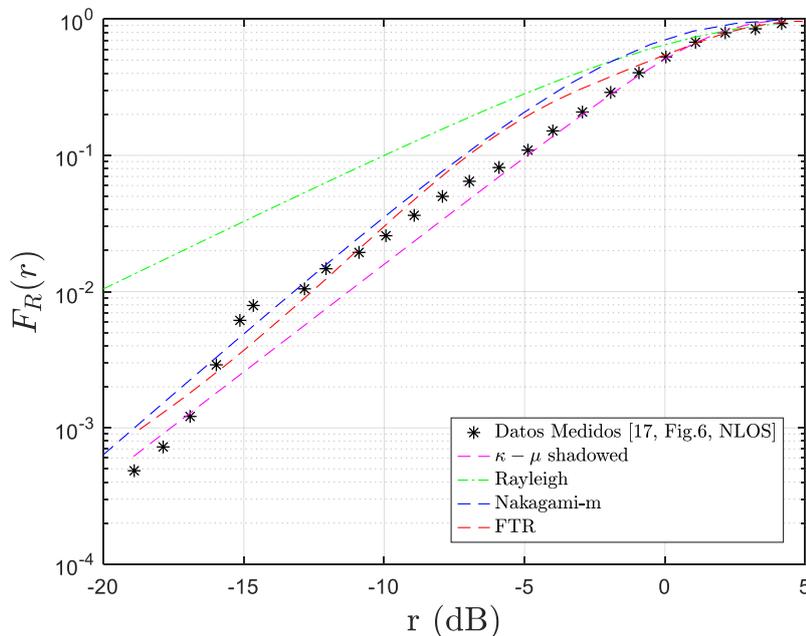


Figura 2. Curvas teóricas vs. empírica de la FDA de la señal de amplitud recibida para un escenario NLOS a 28 GHz. Los parámetros de desvanecimientos para cada caso son: $K_{FTR} = 32.7$, $\Delta = 0.8331$, $m_{FTR} = 10$ [16]; $\kappa = 2.95$, $\mu = 0.79$, $m_{\kappa-\mu} = 0.91$, $\bar{\gamma} = 1.5$; $\bar{\gamma}_{Rayleigh} = 0.95$; $\bar{\gamma}_{naka} = 0.8$, $m_{naka} = 1.8$.

Tabla 1. EMC entre FDAs teórica y empírica para escenarios LOS y NLOS.

Distribución	EMC	Escenario
Rayleigh	0.1819	LOS
Nakagami-m	0.0893	LOS
FTR	0.0665	LOS
κ-μ shadowed	0.0013	LOS
Rayleigh	0.0114	NLOS
Nakagami-m	0.0101	NLOS
FTR	0.0021	NLOS
κ-μ shadowed	5.3×10^{-4}	NLOS

Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones

La escasez de información sobre el modelado de canales de desvanecimiento en la banda de frecuencias milimétricas ha motivado a investigadores a realizar campañas de medición para comprender de mejor manera el comportamiento del canal. Este artículo ha contribuido en esta dirección, investigando la bondad de ajuste entre la FDA teórica de canales tradicionales/generalizados y datos empíricos de la FDA correspondientes a escenarios LOS y NLOS. Además, se mostró con base del test estadístico EMC, que los modelos de canal κ - μ shadowed y FTR se ajustaron de mejor manera a los datos medidos que aquellos ajustes provistos por los modelos clásicos de desvanecimiento (Rayleigh, y Nakagami-m). Finalmente, se verificó que los modelos κ - μ shadowed y FTR son

candidatos prometedores para modelar el desvanecimiento a pequeña escala en el contexto de las comunicaciones mm-Wave.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por la Escuela Politécnica Nacional para el desarrollo del proyecto de investigación PIGR-19-06-"Seguridad en comunicaciones móviles cooperativas de 5G usando tecnologías de capa física". José David Vega Sánchez es destinatario de una beca de ayudante en enseñanza por la Escuela Politécnica Nacional.

7. Referencias

- [1] Vega Sánchez, J. D., Urquiza-Aguiar, L., Paredes Paredes, M. C., Moya Osorio, D. P. (2020). Survey on physical layer security for 5G wireless networks. *Annals of Telecommunications*, 1-20. doi: <https://doi.org/10.1007/s12243-020-00799-8>
- [2] Vega Sánchez, J. D., Urquiza-Aguiar, L., Paredes Paredes, M. C. (2019). Physical Layer Security for 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. Trabajo presentado en *3rd Cyber Security in Networking Conference (CSNet)*, Quito, Ecuador.
- [3] Liu, D., Hong, W., Rappaport, T. S., Luxey, C., Hong, W. (2017). What will 5G Antennas and Propagation Be? *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 65 (12), 6205–6212. doi: <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2774707>
- [4] Wu, Y., Khisti, A., Xiao, C., Caire, G., Wong, K. K., Gao, X. (2018). A Survey of Physical Layer Security Techniques for 5G Wireless Networks and Challenges Ahead. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36 (4), 679-695. doi: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2825560>
- [5] Moya Osorio, D. P., Vega Sánchez, J. D., Alves, H. (2019). Physical-Layer Security for 5G and Beyond. En R. Tafazolli, C.-L. Wang, P. Chatzimisios (Eds.), *Wiley 5G Ref: The Essential 5G Reference Online*. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119471509.w5GRef152>
- [6] Yang, N., Wang, L., Geraci, G., Elkashlan, M., Yuan, J., Di Renzo, M. (2015). Safeguarding 5G Wireless Communication Networks Using Physical Layer Security. *IEEE Communications Magazine*, 53 (4), 20-27. doi: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7081071>
- [7] Lin, Z., Du, X., Chen, H. H., Ai, B., Chen, Z., Wu, D. (2019). Millimeter-Wave Propagation Modeling and Measurements for 5G Mobile Networks. *IEEE Wireless Communications*, 26 (1), 72–77. doi: <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800035>
- [8] Paris, J. F. (2014). Statistical Characterization of κ - μ Shadowed Fading. *IEEE Transactions Vehicular Technology*, 63 (2), 518–526. doi: <https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2281213>
- [9] Chun, Y. J. (2018). *A Generalized Fading Model with Multiple Specular Components*. arXiv. doi: <https://arxiv.org/abs/1810.05258>
- [10] Romero-Jerez, J. M., Lopez-Martinez, F. J., Paris, J. F., Goldsmith, A. J. (2017). The Fluctuating Two-Ray Fading Model: Statistical Characterization and Performance Analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16 (7), 4420-4432. doi: <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2698445>
- [11] Samimi, M. K., Maccartney, G. R., Sun, S., Rappaport, T. S. (2016). 28 GHz millimeter-wave ultrawideband small-scale fading models in wireless channels. Trabajo presentado en *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Nanjing, China. doi: <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7503970>
- [12] Abramowitz, M., Stegun, I. A. (1972). *Handbook of Mathematical Functions* (10th Ed.). New York, NY, USA: Dover Publications.
- [13] Brychkov, Y. A., Saad, N. (2011). Some formulas for the Appell function $F_1(a, b, b'; c; w, z)$. *Integral Transforms Special Functions*, 23 (11), 793–802. doi: <https://doi.org/10.1080/10652469.2011.636651>
- [14] Koymen, O. H., Partyka, A., Subramanian, S., Li, J. (2015). Indoor mm-Wave Channel Measurements: Comparative Study of 2.9 GHz and 29 GHz. Trabajo presentado en *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, CA, USA. doi: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2015.7417720>

- [15] Wang, C. X., Ghazal, A., Ai, B., Liu, Y., Fan, P. (2016). Channel Measurements and Models for High-Speed Train Communication Systems: A Survey. *IEEE Communications Survey & Tutorials*, 18 (2), 974-987. doi: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2508442>
- [16] Hur, S., Baek, S., Kim, B., Chang, Y., Molisch, A. F., Rappaport, T. S., Haneda, K., Park, J. (2016). Proposal on Millimeter-Wave Channel Modeling for 5G Cellular System. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 10 (3), 454-469. doi: <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2527364>
- [17] Romero-Jerez, J. M., Lopez-Martinez, F. J., Paris, J. F., Goldsmith, A. J. (2016). The Fluctuating Two-Ray Fading Model for mmWave Communications. Trabajo presentado en *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Washington, DC, USA. doi: <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2016.7849062>
- [18] Mavridis, T., Petrillo, L., Sarrazin, J., Benlarbi-Delai, A., De Doncker, P. (2015). Near-Body Shadowing Analysis at 60 GHz. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63 (10), 4505-4511. doi: <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2456984>
- [19] Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. Trabajo presentado en *International Conference on Neural Networks (ICNN)*, Perth, WA, Australia. doi: <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- [20] Chun, Y. J., Cotton, S. L., Dhillon, H. S., Lopez-Martinez, F. J., Paris, J. F., Yoo, S. K. (2017). A comprehensive analysis of 5G heterogeneous cellular systems operating over κ - μ shadowed fading channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16 (11), 6995-7010. doi: <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2734080>
- [21] Vega Sánchez, J. D., Moya Osorio, D. P., López-Martínez, F. J., Paredes Paredes, M. C., Urquiza-Aguiar, L. (2020). *Information-Theoretic Security of MIMO Networks under κ - μ Shadowed Fading Channels*. arXiv. doi: <https://arxiv.org/abs/2005.02441>
- [22] Vega Sánchez, J. D., Moya Osorio, D. P., López-Martínez, F. J., Paredes Paredes, M. C., Urquiza-Aguiar, L. (2020). On the Secrecy Performance Over N-Wave with Diffuse Power Fading Channel. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. doi: <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3035544>
- [23] Hashemi, H., Haghighat, J., Eslami, M., Navaie, K. (2020). Amplify-and-Forward Relaying with Maximal Ratio Combining over Fluctuating Two-Ray Channel: Non-Asymptotic and Asymptotic Performance Analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 68 (12), 7446-7459. doi: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3024579>
- [24] Shi, B., Pallotta, L., Giunta, G., Hao, C., Orlando, D. (2020). Parameter Estimation of Fluctuating Two-Ray Model for Next Generation Mobile Communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69 (8), 8684-8697. doi: <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2999549>