

MODELO DE CANAL DE RADIO MULTITRAYECTO PARA COMUNICACIONES INALÁMBRICAS DE BANDA ANCHA

Alexey García Padilla¹, Maher Dawod Alhammadi², José Manuel Díaz Hernández³.

¹e-mail: alexey@upr.edu.cu

²e-mail: alhammadimaher7@gmail.com

³e-mail: jman@upr.edu.cu

^{1,2,3} Universidad de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca, Departamento de Telecomunicaciones. Telef: +53 48 779362, Calle Martí Final No. 270, Pinar del Río, Cuba, C.P 20100

RESUMEN

Esa investigación hace énfasis en los simuladores de canal inalámbrico en sistemas de comunicaciones inalámbricas de banda ancha para sistemas MIMO. El modelo emplea una fuente de ruido gaussiana filtrada e interpolada para simular el ensanchamiento Doppler, en la cual se han simulado dos efectos: la selectividad en tiempo del canal debido el movimiento y la selectividad en frecuencia debida a componentes multitraysectos discretas, finitas y separables empleando un modelo Tap Delay Line (TDL). Resulta una aplicación en MATLAB® que caracteriza la radio propagación para canales de banda ancha empleando las funciones de Bello: Función de respuesta impulsiva variable con el tiempo, Función de transferencia variable con el tiempo, Función desplazamiento Doppler-retardo y Función de transferencia frecuencia-desplazamiento Doppler.

PALABRAS CLAVE: TDL, selectividad en tiempo, selectividad en frecuencia.

ABSTRACT

This research emphasizes wireless channel simulators in wireless broadband communications systems for MIMO systems. The model employs an interpolated filtered Gaussian noise source to simulate Doppler broadening, in which two effects have been simulated: channel time selectivity due to motion and frequency selectivity due to discrete, finite and separable multipath components using a model Tap Delay Line (TDL). It is an application in MATLAB® that characterizes radio propagation for broadband channels using the functions of Bello: Time variable impulse response function, Time variable transfer function, Doppler-delay shift function and Doppler shift-frequency transfer function.

KEYWORDS: TDL, selectivity in time, selectivity in frequency.

INTRODUCCIÓN

La industria y la comunidad académica están progresando constantemente hacia la definición y especificación de los sistemas de redes móviles de quinta generación (5G). Los sistemas de Múltiples entradas múltiples salidas (MIMO) constituyen la tecnología candidata para el desarrollo del sistema móvil celular 5G para satisfacer la demanda de datos de alta tasa de transferencia. Con la escasez de espectro en las bandas celulares convencionales, las bandas milimétricas podrían ayudar a cumplir con las demandas anticipadas del tráfico móvil en la futura red 5G. El rendimiento de los sistemas MIMO masivos depende en gran medida de las características del canal, lo que está determinado por selectividad espacial y temporal [1].

Aumentar y mejorar el rendimiento del sistema son desafíos importantes para los sistemas de comunicación inalámbrica de alta velocidad. Para superar estos problemas, las técnicas de múltiples salidas de entrada múltiple (MIMO) son ampliamente utilizadas, tales como sistemas basados en LTE (Long Term Evolution), el estándar IEEE 802.11n e Interoperabilidad Mundial para Acceso a Microondas WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [2]. El entorno de propagación radiomóvil impone una limitación fundamental en el rendimiento de los sistemas de comunicación por radio. Las señales llegan al receptor a través de múltiples vías de propagación (multitrayecto) con retardos de tiempo y amplitudes diferentes. Estas atenuaciones y fases variables en el tiempo, junto a la movilidad del sistema, da lugar a la variación de la envolvente compleja variable en el tiempo en el extremo receptor. Una característica principal del canal inalámbrico es el efecto de desvanecimiento por trayectos múltiples, lo que puede provocar una distorsión de señal e interferencia entre símbolos (ISI) significativa. Por esta razón, el modelado y la simulación de los canales de desvanecimiento por trayectos múltiples inalámbricos son importantes para diseñar el sistema de comunicaciones de última generación [3].

METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN EN MATLAB®

Modelo de canal multitrayecto discreto

El canal inalámbrico podría modelarse por su respuesta impulsiva. Las contribuciones de múltiples rayos y clústeres, que se superponen en el tiempo, se modelan como etapas. El enfoque típico para especificar un canal de desvanecimiento multitrayecto es la estructura TDL conforme al perfil de retardo de potencia (PDP), que define la potencia media recibida y el tiempo de llegada [4].

Un simulador de canal multitrayecto discreto es apropiado para simular un conjunto de componentes multitrayecto discretos separables [5]. El modelo más popular para un canal multitrayecto discreto es el modelo de canal Tapped-Delay-Line (TDL) [6] [7]. En el modelo TDL, la respuesta impulsiva paso bajo del canal es modelada como:

$$\tilde{c}(\tau, t) = \sum_{k=1}^{K(t)} \tilde{a}_k(\tau_k, t) \delta(\tau - \tau_k(t)) \quad (1)$$

Donde $K(t)$ es el número de multitrayectos variante en el tiempo, $\tilde{a}_k(\tau_k, t) = a_k(t)e^{-j\omega\tau_k(t)}$ representa los coeficientes complejos del canal (incluyendo los efectos de amplitud y fase), $\tau_k(t)$ denota los retardos variables en el tiempo. Si $\tilde{s}(t)$ es la entrada paso-bajo al modelo TDL, entonces la salida pasobajo $\tilde{y}(t)$ es obtenida como la convolución entre $\tilde{s}(t)$ y $\tilde{c}(\tau, t)$ Primero, se determina la envolvente

compleja de la señal recibida. Suponiendo que la señal de envío es una señal modulada. La señal de salida se puede modelar como [8]:

$$\tilde{y}(t) = \tilde{s}(t) * \tilde{c}(\tau, t) = \sum_{k=1}^K \tilde{\alpha}_k(t) \tilde{s}(\tau - \tau_k) \quad (2)$$

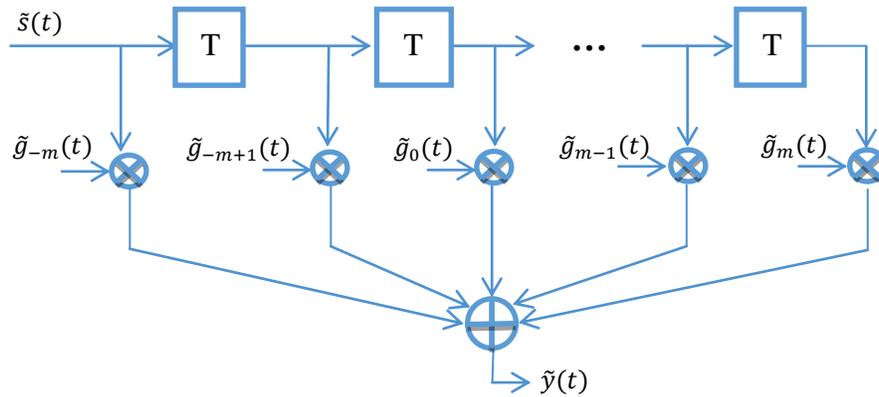


Figura 1: Un modelo de canal multitrayecto discreto TDL [5].

Simulación de la dispersión temporal

La manera más eficiente de modelar un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia con retardos variables es mediante el uso de un modelo TDL uniformemente espaciado. En este modelo se asume que la entrada paso-bajo $\tilde{s}(t)$ del canal está limitada en banda. Luego $\tilde{s}(t)$ puede ser expresado en términos de sus muestras (utilizando una razón muestreo $B = 1/T_s = R_s$ muestras por segundo).

$$\tilde{s}(t - \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{s}(t - nT_s) \text{sinc}(B(\tau - nT_s)) \quad (3)$$

Luego, la señal paso-bajo a la salida del canal es:

$$\tilde{y}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{s}(t - nT_s) \tilde{g}_n(t) \quad (4)$$

donde:

$$\tilde{g}_n(t) = \sum_{k=1}^K \tilde{\alpha}_k(t) \alpha(k, n) \quad (5)$$

$$\alpha(k, n) = \text{sinc}\left(\tau_k/T_s - n\right), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

Simulación de la dispersión Doppler

Para un canal con desvanecimiento Rayleigh, cada proceso de desvanecimiento $\tilde{a}_k(t)$ es complejo gaussiano, con un espectro de potencia Doppler $S_k(f)$. Una metodología para simular un canal con desvanecimiento Rayleigh consiste en darle forma a una fuente de ruido Gaussiano complejo por el espectro de potencia Doppler apropiado. El proceso resultante es entonces interpolado a la razón de muestreo de la señal de entrada [9].

Inicialización

El canal es modelado utilizando un grupo de cuatro componentes multitrayectos con desvanecimiento Rayleigh, además considerando que no existe una línea de visibilidad directa entre el transmisor y el receptor. El extremo móvil se encuentra en movimiento, teniendo en cuenta que el máximo desplazamiento Doppler de las componentes difusas es igual a 200 Hz [10]. El máximo desplazamiento Doppler f_d se puede calcular teniendo en cuenta la velocidad del móvil y la frecuencia de la portadora como: $v \cdot f/c$.

Donde, v es la velocidad del móvil, f es la frecuencia de la portadora y c , es la velocidad de la luz. Por ejemplo, un máximo efecto Doppler de 200 Hz corresponde a una velocidad del móvil de 65mph (30m/s) a la frecuencia de portadora de 2 GHz [11].

Por convención el retardo del primer trayecto se suele fijar a cero. Para los demás trayectos que llegan, un retardo de 1 microsegundo corresponde a una diferencia de 300 m de longitud de trayecto. En algunos entornos multitrayectos exteriores, el trayecto reflejado pudiera ser unos kilómetros más largo que los trayectos más cortos. Con los trayectos retardados especificado anteriormente, el último trayecto es de 3.6 km más largo que el trayecto más corto, por lo tanto, llega 12 microsegundos más tarde [12].

El vector de retardo discreto: $\text{delayVector} = 1.0e - 06 * [0 \ 4 \ 8 \ 12]$;

Típicamente, las ganancias de trayecto promedio decaen exponencialmente con el retardo (los valores en dB decaen linealmente), pero el perfil de retardo específico depende del entorno de propagación. El perfil de retardo especificado se asume con un decrecimiento de 3dB por cada 4 microsegundos de retardo de trayecto.

Ganancia promedio del trayecto (dB): $\text{gainVector} = [0 \ -3 \ -6 \ -9]$;

- **Fuente de Transmisión**

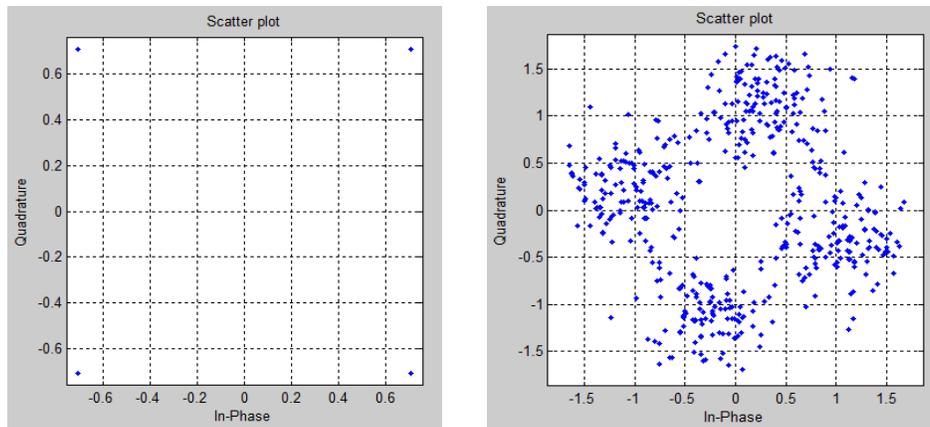
La fuente de datos es un generador de números binarios aleatorios [0 1]. La razón de transmisión de la fuente de datos va a ser igual a 500 kb/s entrando 250 ksym/s al canal, y empleando un modulador QPSK, esto significa que para transmitir un símbolo se necesitan dos bits a la entrada del modulador [13]. El tiempo de muestreo de la señal de entrada va a ser igual al inverso de la razón de transmisión:

$$T_{\text{sym}} = \frac{1}{250000} = 4 \mu\text{s} \quad (7)$$

La cantidad de muestras por trama de los datos de información se toman igual a 1000 bits, transmitiéndose entonces 500 símbolos por trama analizada. Teniendo en consideración para el análisis 100 tramas.

- **Modelación y Filtrado del Canal**

Para la modelación se crea un objeto sistema modulador QPSK para modular los datos del canal, que se han generado usando la función RANDI. A continuación, se muestra un análisis de la constelación de la señal recibida en el extremo móvil mostrado en la Figura 2.



a) Constelación de la señal transmitida

b) Constelación de la señal recibida

Figura 2: Constelación de la señal.

Una señal con ancho de banda de hasta 500 kb/s (250 kHz), Se percibe a partir de la Figura 2 b) que existe una gran distorsión en la constelación de la señal a la salida del canal. Esta distorsión es resultante del efecto ISI que se genera de la distorsión en tiempo de la señal limitada en banda.

VALIDACIÓN DEL MODELO DE CANAL A TRAVÉS DE LAS FUNCIONES DE BELLO.

Se puede visualizar la variación del canal en el dominio del tiempo y de la frecuencia cuando se ejecuta el modelo, la visualización del canal por defecto es la respuesta al impulso limitada en banda.

Función de Respuesta Impulsiva Variable en el Tiempo.

La siguiente figura se muestra la respuesta impulsiva del canal Rayleigh limitada en banda (curva verde), también ilustra los retardos y las magnitudes de las ganancias de trayecto con desvanecimiento (rojo/rosado/violeta/azul). Debido que el retardo máximo de las componentes multitrayecto que arriban al canal (12 microsegundos) es mayor que período de símbolo (4 microsegundos), entonces la respuesta impulsiva limitada en banda resultante no se asemeja a un pulso sinc [14]. Es importante notar que las ganancias no son igual al promedio de ganancias de trayecto debido que el efecto Doppler hace que las ganancias fluctúen alrededor de su valor promedio. La variación de la respuesta impulsiva en el tiempo se puede observar en la Figura 3, donde el sistema se comporta como LTV (Lineal Time Variant).

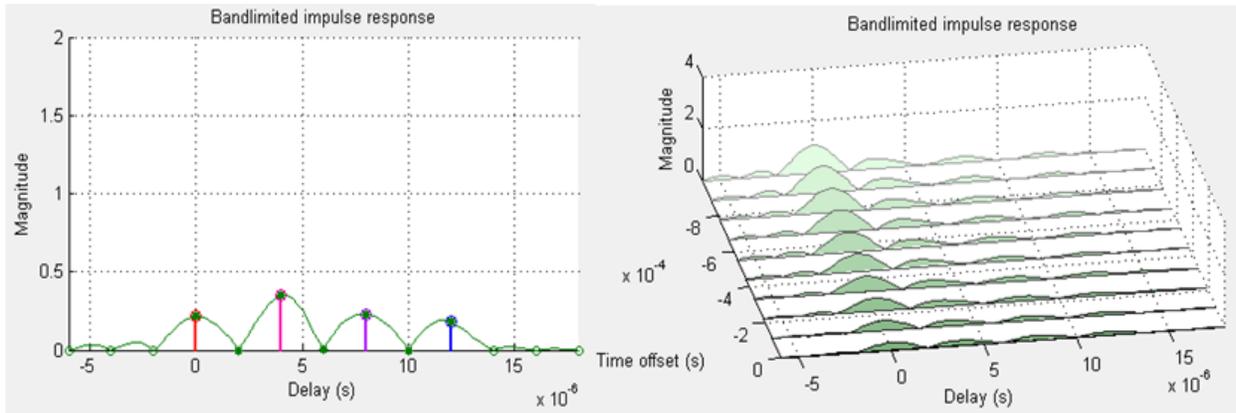


Figura 3: Respuesta Impulsiva variable en el tiempo

Función de Transferencia Variable en el Tiempo

Debido a la movilidad del extremo móvil y del entorno (ya que se mueven los autos y otras estructuras), los trayectos de propagación son dependientes del tiempo. Lo cual provoca que en el receptor fluctúen las potencias de estos rayos, al igual que los intervalos de llegada a este, lo cual conlleva a que la respuesta de transferencia varíe en el tiempo [15]. Para un análisis del comportamiento de la respuesta en frecuencia variable en el tiempo del canal en cuanto a selectividad en frecuencia se toman en consideración el tiempo de símbolo de la señal que arriba $T_{sym} = 4 \mu s$ y el retardo máximos de los trayectos $T_m = 12 \mu s$.

El canal introduce distorsión selectiva en frecuencia debido a la condición de que los componentes multitrayectos se extienden más allá de la duración del símbolo $T_m > T_{sym}$. Esto causa interferencia intersímbolo (ISI), o sea distorsión en la señal en el dominio del tiempo.

Otra forma de enfocar el análisis de la respuesta de frecuencia del canal, puede ser expresada en términos del ancho de banda de coherencia del canal B_{coh} , y el ancho de banda de la señal transmitida B_{sx} por las expresiones:

$$B_{coh} = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{12 \mu s} = 83,3 \text{ kHz} \quad (8)$$

$$B_{sx} = \frac{1}{T_{sym}} = \frac{1}{4 \mu s} = 250 \text{ kHz} \quad (9)$$

Teniendo en cuenta el cálculo anterior se puede observar que $B_{coh} < B_{sx}$, el ancho de banda de coherencia del canal es mucho menor que el ancho de banda de la señal. En este caso el canal actúa como un filtro que introduce desvanecimiento selectivo en frecuencia, como se ilustra en la Figura 4.

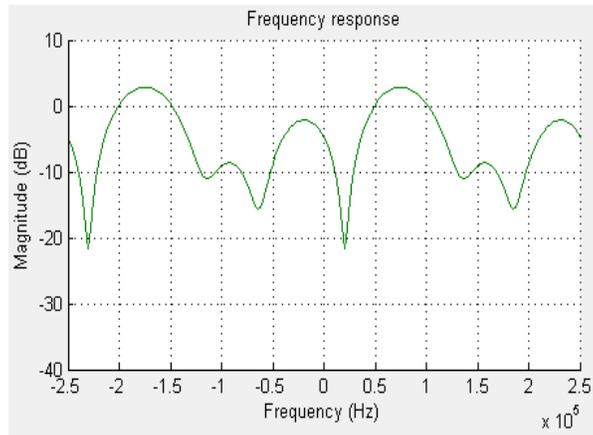


Figura 4: Respuesta de frecuencia del canal Rayleigh.

A continuación, se ilustran en la Tabla 1 los valores obtenidos del ancho de banda de coherencia para distintos entornos de propagación, en función de la dispersión del retardo. Los resultados obtenidos por nuestro modelo TDL se validan en correspondencia con los resultados experimentales obtenidos en el modelo de Bello [15], donde se obtienen resultados con buena precisión con respecto al modelo de referencia de Bello.

Tabla1: Valores de B_{coh} para distintos entornos de propagación [16].

Tipo de entorno	Dispersión de retardo $D(\mu s)$ Modelo teórico de Bello	Dispersión de retardo $D(\mu s)$ Modelo TDL	Ancho de banda de Coherencia $B_{coh}(MHz)$ Modelo teórico de Bello	Ancho de banda de Coherencia $B_{coh}(MHz)$ Modelo TDL
Rural	0.2	0.2	5	5.03
Suburbano	0.5	0.5	2	2.02
Urbano reducido	3	3	0.33	0.35
Urbano	12	12	0.083	0.084

Función Desplazamiento Doppler-Retardo (Función de Dispersión)

La Función de Dispersión es una de las más importantes mediciones estadísticas del canal multitrayecto aleatorio. Esta es función del retardo τ y el dominio de la frecuencia ν , se nota que esta función captura la rapidez con el cual el canal cambia en sí.

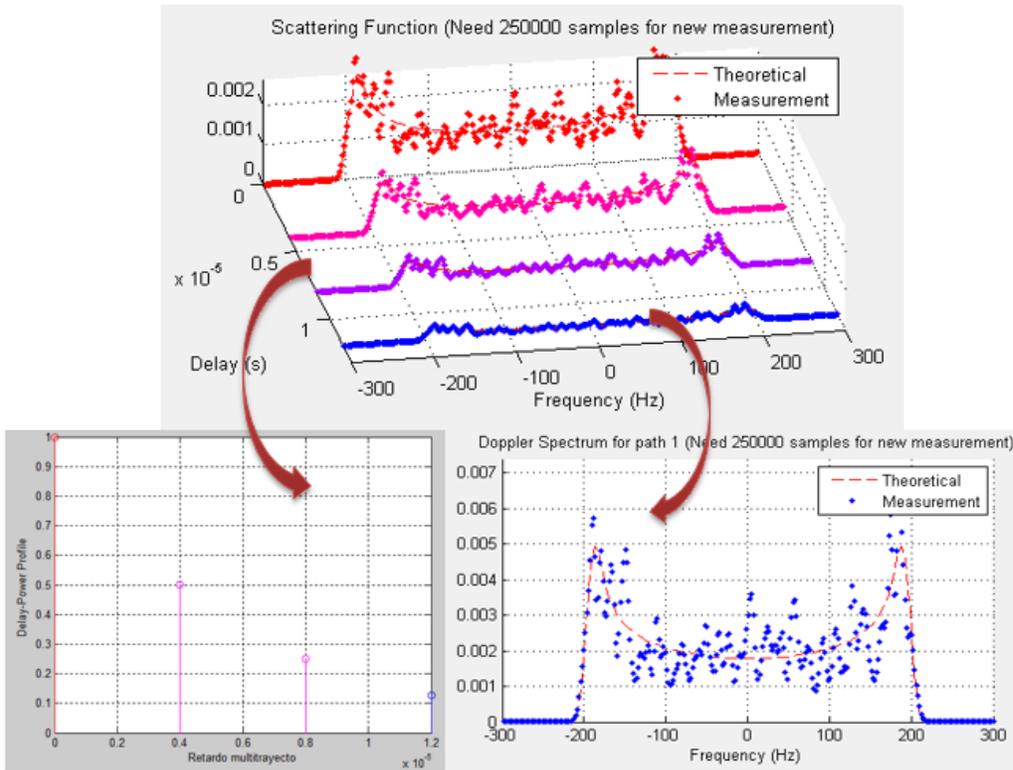


Figura 5: Función de Dispersión (*Scattering*)

- **Perfil de potencia-retardo**

El Perfil de potencia-retardo $p(\tau)$ nos brinda una medida de la respuesta de potencia recibida promedio en función del retardo τ , como se ilustra en la Figura 6a). Es importante destacar que este perfil específico depende del entorno de propagación, donde en este entorno de simulación se asume con un decrecimiento de 3dB por cada 4 microsegundos de retardo de trayecto.

- **Función de correlación espacio-frecuencia**

Una completa caracterización análoga de la dispersión de la señal puede ser hecha en el dominio de la frecuencia por la función $P(\Delta f)$ a través de la transformada de Fourier del Perfil potencia-retardo $p(\tau)$. Este permite caracterizar el canal según la selectividad en frecuencia, con ayuda del ancho de banda de coherencia, $P(\Delta f)$ representa la correlación entre la respuesta del canal a dos señales de banda estrecha con las frecuencias f_1 y f_2 como función de su diferencia $\Delta f = f_2 - f_1$. El ancho de banda de coherencia f_0 es definido como el rango de frecuencias donde todas las amplitudes de las componentes de frecuencia se encuentran correlacionadas. Se puede obtener que f_0 y T_m están relacionadas recíprocamente. Para nuestro caso se obtiene que $f_0 \approx \frac{1}{T_m} = 83,3\text{KHz}$ como se ilustra en la Figura 6 b).

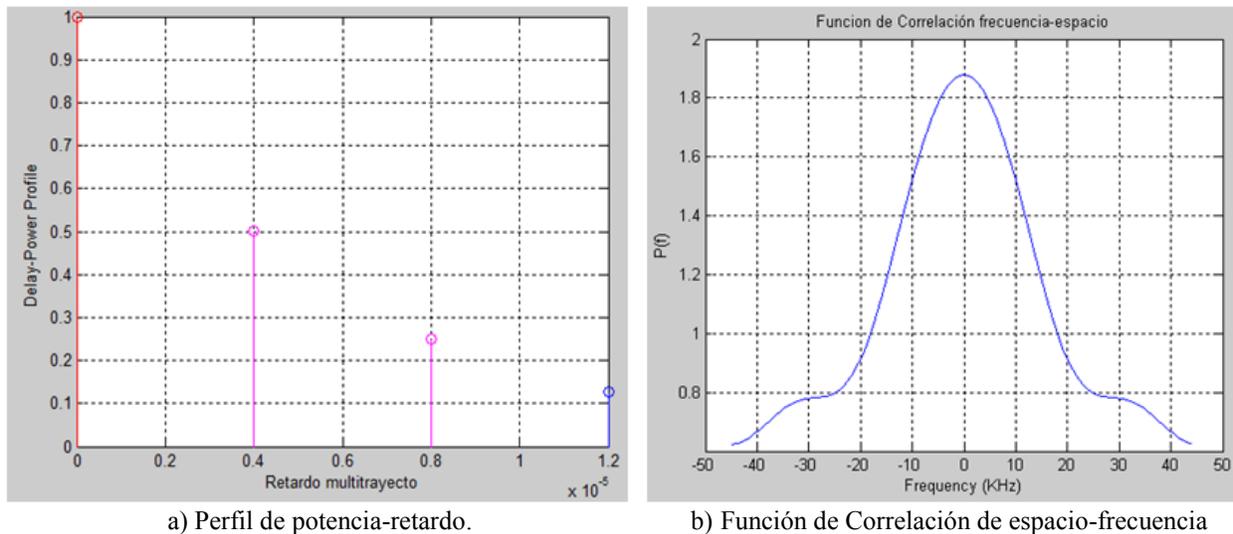


Figura 6: Caracterización espacial del canal.

En este caso el $B_{sx} = 250\text{KHz}$ y el ancho de banda de coherencia simulado obtenido por la Función de Correlación es de $f_{0_sim} \approx 84\text{KHz}$. Por último, como $f_{0_sim} < B_{sx}$ (el ancho de banda de coherencia del canal es mucho menor que el ancho de banda de la señal) el canal actúa como un filtro selectivo en frecuencia donde ocurre desvanecimiento selectivo en frecuencia.

- **Espectro de potencia Doppler**

El espectro de potencia Doppler del canal brinda conocimiento sobre el ensanchamiento espectral de una señal limitada en banda (impulso en frecuencia) en el dominio de frecuencia Doppler producto del movimiento del extremo móvil. La Figura 7 a) muestra la forma del espectro de potencia Doppler Jakes simulado, donde se puede observar que se encuentra centrada en cero, debido a que en la simulación se emplea una representación paso-bajo equivalente del canal multitrayecto, donde no se tiene en cuenta la frecuencia de la portadora f_c . Se ilustran los datos filtrados por el filtro Doppler cuyo espectro de potencia teórica tiene la forma del filtro Jakes representada por la línea de trazos discontinuos roja y los correspondientes puntos azules los valores obtenidos en la simulación donde se ilustra acercamiento a la forma del espectro teórico

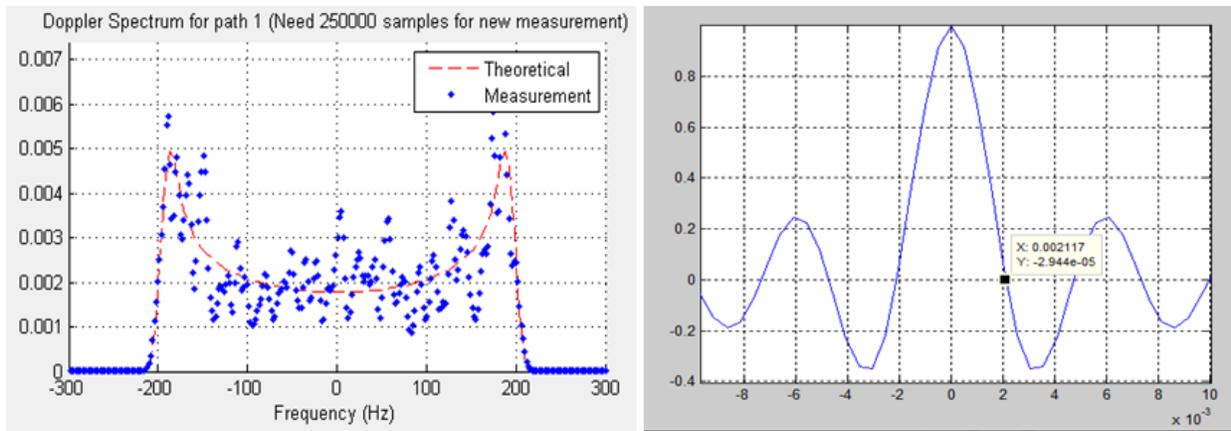
Para nuestro caso específico se puede notar que este espectro se encuentra limitado por la frecuencia Doppler máxima $f_d = 200\text{ Hz}$.

- **Función de correlación espacio-tiempo.**

La función de correlación espacio-tiempo puede ser obtenida aplicando la transformada inversa de Fourier al Doppler Power Spectrum. Esta función de correlación tiene una gran importancia a la hora de caracterizar el canal teniendo en cuenta la selectividad en tiempo, ilustrándose en la Figura 7 b).

El comportamiento variable en el tiempo se puede caracterizar en desvanecimiento rápido o lento. Para ello es de vital importancia realizar un análisis comparativo del tiempo de coherencia del canal con respecto al período de símbolo de la señal transmitida. El tiempo de coherencia se puede determinar aproximadamente teniendo en cuenta la velocidad del extremo móvil, para nuestro caso el tiempo de coherencia teórico es:

$$T_0 \approx 1/f_d = 1/200 \text{ Hz} \approx 5\text{ms} \quad (10)$$



a) Espectro Doppler Jakes simulado

b) Función de autocorrelación espacio-tiempo.

Figura 7: Caracterización del canal

Teniendo en cuenta el valor del punto donde corta el lóbulo principal de la función de autocorrelación al eje del tiempo, que es aproximadamente igual a 2.12 ms , que teniendo en cuenta la simetría se multiplica por dos y se obtiene aproximadamente como tiempo de coherencia en la práctica $T_{coh} = 4.24 \text{ ms}$.

Al ser el tiempo de coherencia del canal aproximadamente 4.24 ms mayor que el período del símbolo $T_{sym} = 4 \mu\text{s}$, $T_{coh} > T_{sym}$ nos encontramos entonces en un sistema que varía lentamente (slow fading) [17] en el tiempo. Una ilustración de la variación lenta en el tiempo de la respuesta impulsiva se puede observar en la Figura 3. Si contamos con el período de símbolo $T_{sym} = 4 \mu\text{s}$ y el tiempo de coherencia $T_{coh} = 4.24 \text{ ms}$ podemos realizar el cálculo para saber cuántos símbolos se transmiten, en el tiempo de coherencia del canal, o sea: $\frac{(4.24\text{ms})}{4\mu\text{s}} \approx 1000 \text{ símbolos}$.

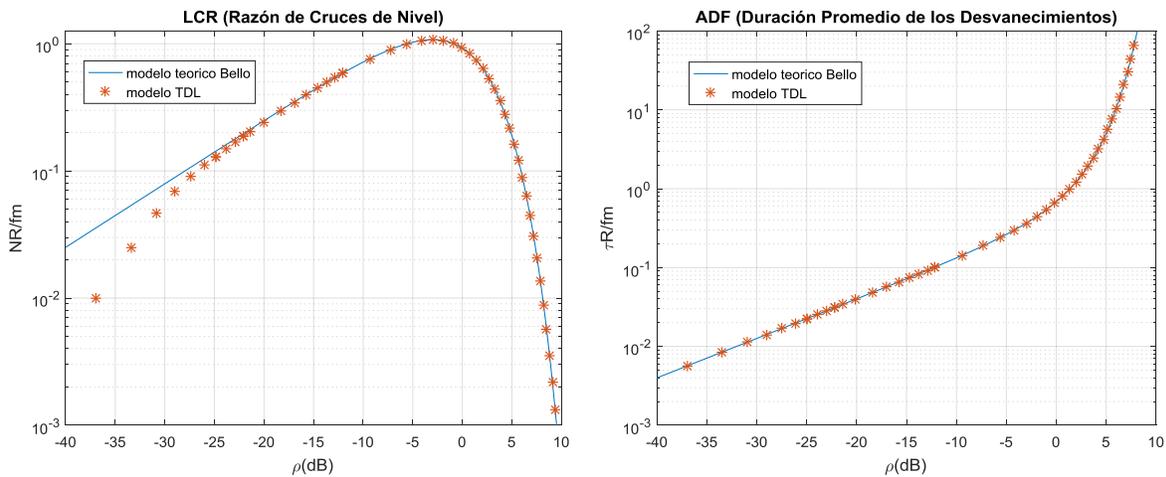
La Tabla 2 nos brinda la validación del modelo TDL comparando los valores obtenidos en las simulaciones con los resultados teórico experimentales obtenidos por el modelo de Bello. [15]. Se exponen diferentes valores del tiempo de coherencia para distintas velocidades del móvil, obteniéndose resultados cercanos al modelo de referencia de Bello.

Velocidad (Km/h)	Desplazamiento Doppler fd (Hz)	Desplazamiento Doppler fd (Hz)	Tiempo de coherencia T_c (ms)	Tiempo de coherencia T_c (ms)
	Modelo teórico de Bello	Modelo TDL	Modelo teórico de Bello	Modelo TDL
10	18.5	17.9	54.1	53.6
60	111.1	110.5	9	8.75
110	203	200	5	4.24

Tabla 2: Valores de T_c a 2 GHz para distintas velocidades del móvil.

Razón de cruces de nivel LCR y duración promedio del desvanecimiento AFD

La tasa de cruces de nivel (LCR) en algún nivel especificado es definida como la tasa esperada a la cual la envolvente cruza ese nivel en una dirección positiva hacia arriba (o negativa hacia abajo). Para nuestro entorno de propagación se ha obtenido el número de cruces de nivel por longitud de onda, el cual se ilustra en la Figura 8 a). Se puede observar que hay pocos cruces en altos y bajos niveles; la máxima tasa ocurre cuando $R = \sigma$, ejemplo: a un nivel 3dB por debajo del nivel RMS.



a) LCR por longitud de onda

b) AFD por longitud de onda

Figura 8: Razón de cruces de nivel y duración promedio del desvanecimiento.

La duración promedio del desvanecimiento (AFD) es el periodo promedio del desvanecimiento por debajo de un nivel especificado. En nuestra simulación la duración promedio en longitudes de onda es ilustrada en la Fig. 8 b).

La Tabla 3 nos brinda la AFD y LCR promedio para varias profundidades de desvanecimiento con respecto al nivel mediano. Los resultados de simulación del modelo TDL se han validado comparando los resultados con los resultados del modelo de referencia de Bello, obteniéndose una buena correspondencia entre los dos modelos.

Tabla 3: AFD y LCR por desvanecimiento medidos con respecto al valor mediano.

Profundidad del desvanecimiento	Longitud del desvanecimiento promedio (λ)	Tasa de cruces promedio (λ^{-1})
0	0.479	1.043
-10	0.108	0.615
-20	0.033	0.207
-30	0.010	0.066

CONCLUSIONES

Esta investigación propone un modelo de canal de radio móvil para sistemas inalámbricos de banda ancha MIMO empleando el software MATLAB®. El modelo simula los dos efectos principales en la radio propagación: la selectividad en tiempo del canal y la selectividad en frecuencia. Se emplean canales que se caracterizan por una distribución Rayleigh y un espectro Doppler Jakes. Este modelo caracteriza la propagación empleando las funciones de sistema: Función de respuesta impulsiva variable con el tiempo, Función de transferencia variable con el tiempo, Función desplazamiento Doppler-retardo y Función de transferencia frecuencia-desplazamiento Doppler, de vital importancia para la caracterización del canal de radio en sistemas móviles de última generación MIMO.

REFERENCIAS

- [1] N Zhang, G Yang, and J Zhai, "A Low Complexity Emulation Scheme for 5g Millimeter-Wave Massive MIMO Channel", *Microwave and Optical Technology Letters* / vol. 59, no. 6, pp1300-1301, June 2017.
- [2] K Yamaguchi, T Yamaguchi, N Ginoza, K Abe, H Matsue, K Uekado, T Namera and S Nanamatsu, "Analysis of Computer Simulated and Field Experimental Results in Multiuser MIMO System Considering Errors of CSI Feedback Under Multipath Fading Environment", pp. 216, 2017 International Conference on Information Networking (ICOIN).
- [3] J Liu, "Wireless Multipath Fading Channels Modeling and Simulation Based on Sum-of-Sinusoids," First IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet. pp. 165–166, 2016.
- [4] TSANG, G. M. a. W. W. "The Ziggurat Method for Generating Random Variables", *Journal of Statistical Software* (Vol. 5).2000.
- [5] M. C. Jeruchim, P. Balaban, and K. S. Shanmugan. *Simulation of Communication Systems - Modeling, Methodology, and Techniques*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2nd edition, 2000.
- [6] G. L. Turin et al. "A statistical model of urban multipath propagation", *IEEE Trans.Veh. Technol*, vol. VT-21, no.1, pp. 1–9, Feb. 1972
- [7] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 4th edition, 2001.
- [8] Ma Dong Lin, Lai Fansheng, Sun Jie "Simulation on multi-path fading in wireless channel" International Conference on Computer Science and Electronics Engineering, pp.427, 2012.
- [9] COST 207. "Digital land mobile radio communications", Office for Official Publications of the European Communities, Final report, Luxembourg, 1989.
- [10] M. E. Khan, "Study of MIMO Capacity in a Rayleigh fading channel", 2013.
- [11] M. Patzold, "Mobile Fading Channels", Wiley, 2002.

- [12] Y. Li and X. Huang, "The simulation of independent Rayleigh faders", IEEE Trans. Commun., vol. 50, no. 9, Sept. 2002.
- [13] M. Pätzold, "Frequency-Selective Channel Models", Mobile Radio Channels, pp. 335-415: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [14] Li, J., & Zhao, Y. "Radio Environment Map-based Cognitive Doppler Spread Compensation Algorithms for High-Speed Rail Broadband Mobile Communications". EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, (2012).
- [15] P. A. Bello, "Characterization of Randomly Time-variant Linear Channels", IEEE Trans. Commun. Syst., vol. CS-11, no. 4, pp. 360–393, Dec. 2001.
- [16] J. M. H. Rábanos "Comunicaciones Móviles", 2da edición, pág. 147, 2004.
- [17] P. Dent, G. Bottomley, and T. Croft, "Jakes Fading Model Revisited", IEEE Electronics Letters, vol. 29, no.3, pp. 1162–1163, June 24th 1993.