

Modelado de canal inalámbrico empleando técnicas de trazado de rayos: Una revisión sistemática

Modeling wireless channel employing ray tracing techniques: A systematic review

Andrés Navarro Cadavid, Ph.D.

anavarro@icesi.edu.co
Universidad Icesi, Cali, Colombia

Dinael Guevara Ibarra, Ph.D.

dinaelgi@ufps.edu.co
Universidad Francisco de Paula Santander,
Cúcuta, Colombia

Jorge Gómez Rojas, MSc.

jgomez@unimagdalena.edu.co
Universidad del Magdalena, Santa Marta,
Colombia

.....
Fecha de recepción: Agosto 20 de 2014

Fecha de aceptación: Septiembre 23 de 2014

Palabras clave

Canal inalámbrico; trazado de rayos; modelado de canal

Keywords

Wireless channel; ray tracing; channel modeling

Resumen

Este trabajo presenta un análisis de las investigaciones realizadas por la comunidad científica que reportan características similares en su evaluación. Predicciones basadas en el uso de herramientas computacionales que mejoran cada vez los tiempos de respuesta con precisiones aceptables. Estos cálculos han sido corroborados a través de extensas campañas de medición en sitios específicos con el fin de evidenciar las hipótesis. Finalmente se exponen los resultados para cada situación analizada.

Abstract

This paper presents an analysis of the research conducted by the scientific community who report similar characteristics in their evaluation. Predictions based on the use of computational tools that improve response times with acceptable accuracy. These calculations are corroborated by extensive measurement campaigns at specific sites in order to demonstrate the hypothesis. Finally the results were analyzed for each situation presented.

Colciencias **3**
tipo

I. Introducción

La tendencia hacia el uso del canal inalámbrico – y su crecimiento global – presentan un comportamiento exponencial (UIT, 2013). Incluso hasta la energía, que míticamente se consideró limitada a los canales guiados, hoy día explota el recurso inalámbrico (Ho, Wang, Fu, & Sun, 2011). Nuevos conceptos, como el de «Internet de las cosas» [IoT, Internet of Things], y las comunicaciones inalámbricas de actual y próxima generación, requieren altas velocidades de datos. Lo anterior implica estrategias innovadoras para permitir que aumente significativamente la eficiencia espectral. Las últimas soluciones tecnológicas, tales como 3G, LTE, LTE Advanced y 802.11ac están ávidas de investigaciones que permitan atender y ofrecer los requerimientos multimedia. Para ello es imperativo el conocimiento del entorno por el cual se transmitirá la información, esto es, modelar el canal.

Se ha intentado predecir el comportamiento de las ondas electromagnéticas en diferentes escenarios, según su aplicación, obteniendo resultados satisfactorios (Lutz, 2013; Montenegro-Villacieros, Oestges, Vanhoenacker-Janvier, Prieto-Cerdeira, & Martellucci, 2010; Pontes & Silva-Mello, 2010; Talha & Patzold, 2011; Yang, Zong, Gao, & Cao, 2010). La caracterización del canal de radio utiliza modelos de estimación determinista o una extensa campaña de mediciones. Los modelos deterministas son adecuados en los diferentes ambientes con dispersores de tamaño considerable; sus predicciones, por ser exactas y verificables, son preferibles (Soni & Bhattacharya, 2012).

La elección y aplicación del modelo de propagación determinista está basada en la frecuencia de la portadora y en dos criterios de alta importancia: la precisión y el recurso computacional que demandan dichos modelos. Estos factores son directamente proporcionales, por lo que es deseable obtener un equilibrio, es decir, un error bajo, con un tiempo de respuesta aceptable (Son, Hae-Won, Myung, 1999). Para el modelamiento del canal es relevante la caracterización del entorno en el que ocurre la propagación, la cantidad y los tipos de dispersores existentes, la frecuencia empleada en el canal de comunicación y la distancia entre el transmisor y el receptor (Pajusco, 2006). Para aumentar la precisión en la predicción, es necesario incrementar el uso de algunas variables, especialmente las involucradas en los fenómenos de reflexión, difracción y dispersión (Rautiainen, Wolfle, & Hoppe, 2002; Zhu, Takada, Araki, & Kobayashi, 2001). Esto resulta en un aumento de los recursos computacionales y en el tiempo de respuesta. La caracterización de los dispersores (i.e., edificaciones, árboles, vehículos, etc.), mediante sus coeficientes de permitividad y conductividad, mejoran la precisión de los resultados, pero también exigen un procesamiento más arduo.

A. Modelos de propagación

Inicialmente eran empleados los modelos de propagación empíricos y semi-empíricos para la planificación de canales de radiocomunicaciones (Kurner, Cichon, & Wiesbeck,

1993). La Figura 1 presenta una síntesis de los modelos de propagación. Un modelo teórico y básico muy utilizado en sistemas de comunicaciones, es el canal con ruido blanco aditivo Gaussiano [AWGN, *Additive White Gaussian Noise*] (Kostov, 2003). Este modelo es impreciso al no tomar en cuenta el fenómeno de desvanecimiento por dispersores existente en canales reales. En UHF/VHF los resultados de aplicar modelos son fuertemente dependientes de la topografía del terreno; además, dependiendo de la distancia de los dispersores al receptor, estos pueden ser contributivos o destructivos (Kurner et al., 1993; Lee, 1985; Schaubach, Kurt, & Davis, 1994). Para altas tasas de transmisión el control de efectos multicamino es de gran impacto sobre la precisión con la cual se desea obtener la predicción. En situaciones de terreno plano, un modelado de dos dimensiones suele ser suficiente pero para escenarios en terrenos montañosos y ciudades edificadas es necesario un modelo tridimensional (Kurner et al., 1993; Sharma, 2012). Además, estos últimos escenarios exigen que sean conocidas las características electromagnéticas y geométricas de todas las edificaciones.

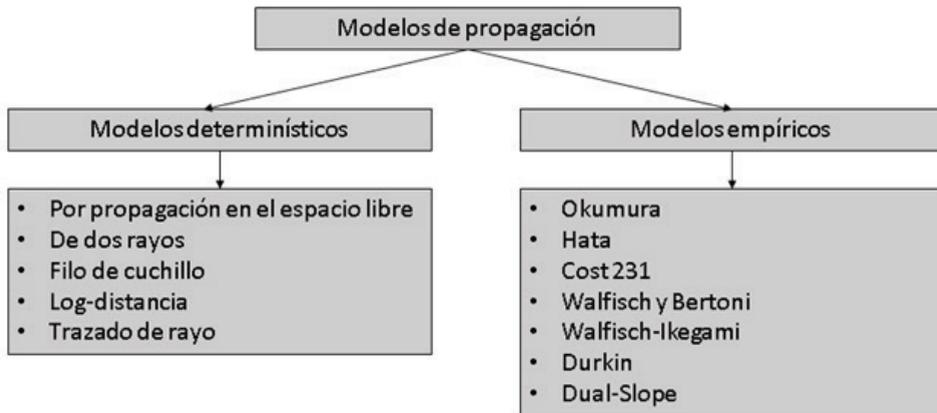


Figura 1. Síntesis de algunos de los modelos de propagación (Tranter, Shanmugan, Rappaport, & Kosbar, 2003; Sarkar, Ji, Kim, Medouri, & Salazar-Palma, 2003)

B. Modelo del trazado de rayos (Ray Tracing)

En las aplicaciones de comunicaciones móviles se utiliza el modelo de Trazado de Rayos Espectral [SRT, *Spectral Ray Tracing*] (Ros, Martinez, & Ruiz, 2014). Las técnicas desarrolladas para aplicar este método datan de 1962, con los trabajos de Murty y los aportes de Chen et al. (citados por Feng & Li, 2013). Este modelo se basa en la descomposición del campo eléctrico en el plano de la fuente de onda plana espectral [PWS, *Plane Wave Spectral*] (Doicu & Wriedt, 1997), satisfaciendo la ecuación de onda y así, validando su aproximación. El trazado de rayos mejora la precisión de los modelos empíricos tradicionales, permitiendo estimar por completo, en espacio y tiempo, la respuesta a un impulso en un punto receptor específico.

Las técnicas empleadas en trazado de rayos son el método de imágenes [IT, *Image*

Theory] y el Método de Fuerza Bruta [SBR, *Shoot-and-Bouncing-Ray*] (Navarro & Guevara, 2010a; Guevara, 2011; Athanaileas, Athanasiadou, Tsoulos, & Kaklamani, 2010; Liang & Bertoni, 1997). El método IT emplea reflexiones en geometrías simples, mientras que el método de fuerza bruta es más empleado en escenarios complejos y densos, donde se toma en cuenta la reflexión y la difracción por efecto de edificaciones y volúmenes existentes. SBR toma en cuenta las fuentes secundarias producidas por el principio de Huygens – Fresnel, aumentando el número de rayos a analizar, producto de difracciones de segundo orden y de nuevas reflexiones; consigo, aumenta el recurso computacional requerido para la estimación. Cavalcante, de Sousa, Sales-Jr, Costa, Cavalcante, & Frances (2005), recomiendan que existan rayos con un mínimo de separación entre sí, de al menos 0.6 grados, para aumentar la precisión.

En un escenario donde las características de las edificaciones son bastante irregulares, de mediana a densamente poblados, es necesario implementar un modelo de propagación de sitio específico basado en la teoría óptica de rayos, la teoría universal de difracción [UTD, *Universal Theory of Diffraction*) y el coeficiente de difracción de Fresnel (Balanis, 1998; Liang & Bertoni, 1997; Rautiainen et al., 2002). Las multitrayectorias con línea de vista [LOS, *Line of Sight*] y en zona de sombra [NLOS, *Line of Sight*], causadas por los bordes de los edificios y cuerpos similares, son la fuente de mayor consumo computacional.

Los rayos con incidencia directa en un punto y los reflejados son calculados mediante la geometría óptica, mientras que los difractados se estiman con la UTD. La forma general de la ecuación es mostrada en la Ecuación e ilustrada en la Figura 2.

$$E(s) = E(0) \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + 1)(\rho_2 + 1)}} e^{-j\beta s} \quad (1)$$

Donde $E(0)$ el campo eléctrico en el punto de interés, β la constante de fase y ρ_1 y ρ_2 son los radios de curvatura del rayo con respecto al punto de interés.

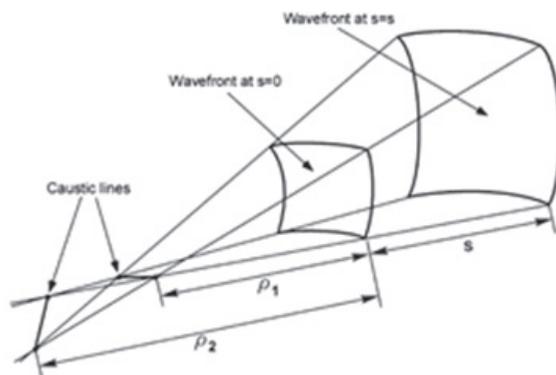


Figura 2. Cálculo del campo eléctrico en un punto mediante el método de rayo astigmático (Corucci, Usai, Monorchio, & Manara, 2014).

Las herramientas de software que utilizan estas técnicas pueden tomar un tiempo de cálculo considerablemente alto en el análisis de las condiciones de propagación en un entorno determinado (Agelet, 2000). Con el fin de reducirlo, las técnicas de trazado de rayos se deben aplicar sólo en aquellas áreas en las que puedan existir rayos. Un algoritmo importante fue desarrollado por Navarro y Guevara (2010), en el cual se varía el tamaño de la esfera de impacto de los posibles rayos, permitiendo que sean pre-procesados los rayos exitosos, aumentando así la eficiencia computacional.

La técnica del Trazado de rayos está proyectada por los expertos como una estrategia muy prometedora, aplicable a la evaluación teórica de las nuevas tecnologías de comunicación inalámbrica (Degli-Esposti, 2014; Navarro Guevara, & Cardona, 2014).

II. Metodología

El procedimiento sistemático se divide en las etapas de: planificación, realización y documentación de la revisión, según criterios metodológicos propuestos por Brereton, Kitchenham, Budgen, Turner, & Khalil (2007). Estas etapas, a su vez, están conformadas por tareas sencillas sin descriptores.

Se indaga acerca de los trabajos realizados desde 1997 donde se explota el recurso computacional para confrontar predicciones con mediciones, con el fin de establecer un punto de partida. Son analizados los trabajos para predecir el comportamiento de las ondas electromagnéticas en un entorno complejo en exteriores, los software y métodos usados. Además, se revisan las técnicas utilizadas para mejorar la precisión y los tiempos de respuesta. Son mencionados los trabajos realizados con la técnica del trazado de rayo, empleando la estrategia de modelado de sitio específico bajo entornos reales.

Las fuentes primarias son las bases de datos más representativas del sector: IEEE® Explore, Science Direct® y ACM®.

III. Resultados

A continuación se describen los rasgos destacados en los tópicos del modelado de canal inalámbrico y las técnicas que se emplean para su predicción, análisis y simulación.

Erceg, Fortune, Ling, Rustako, y Valenzuela (1997) emplearon el Software Wireless System Engineering [WiSE], desarrollado por ellos con el apoyo de AT&T Bell Laboratories. Los sitios bajo estudio fueron las ciudades de Manhattan (NY) y Boston (MA), en las frecuencias de 900 MHz y 2 GHz. Los parámetros de permitividad y permeabilidad empleados fueron 15 y 0.005, respectivamente. Se emplearon mapas en dos dimensiones, tomando en cuenta la onda incidente, las reflexiones –hasta un número de veinte– y las difracciones por bordes de edificaciones, en cuatro; el ángulo de separación inicial de los rayos fue de 2°; las difracciones por techos no fueron trabajadas, obteniendo un error medio entre 5.3 dB y una desviación estándar que osciló entre 3.4 y 5.7 dB. El software propietario empleado permite definir el número

máximo de reflexiones y difracciones a considerar. Los resultados de este trabajo exponen la integración de herramientas computacionales con métodos determinísticos en la caracterización del canal, con un nivel de precisión aceptable.

Un trabajo contemporáneo es descrito Tameh, Doufexi, Hunukumbure, y Nix (2007). Las características destacadas en él son: la generación de un árbol de difracciones en pre-procesado y el procesamiento en paralelo para aumentar la eficiencia. Adicionalmente se presentan técnicas para implementar el trazo de rayos en sistemas de antenas de múltiples entradas–múltiples salidas [MIMO, *Multiple Input - Multiple-Output*), donde trabajaron en frecuencias de 1.97 GHz, obteniendo una diferencia, entre los valores medidos y los calculados, que varía entre 1 y 4 dB. Es destacado el aporte realizado al dividir tareas independientes del algoritmo de fuerza bruta, eficientemente, en nodos de una grilla computacional, usando un sistema operativo GNU/Linux.

La evaluación realizada por Kanatas, Kountouris, Kostaras, y Constantinou (1997) a una frecuencia de 1.8 GHz demuestra la importancia de la UTD en la situación de transmisores de poca altura con respecto a la altura de las edificaciones. Para este caso de estudio, se infiere que la difracción simple es dominante. Las mediciones fueron realizadas en el centro de la ciudad de Atenas (Grecia) en un entorno de 440x440 metros. La configuración del sitio bajo prueba es representada por geometrías regulares en dos planos perfectamente alineados, con permitividad de quince y conductividad de siete para el plano tierra. Por otra parte la permitividad de las paredes es de tres y la conductividad de 0.005. Los resultados evidencian una desviación media de 6 dB, y muestran que los cambios en cuanto a los parámetros de permitividad y conductividad aportan cambios significativos.

Cavalcante, de Sousa, Costa, Frances, & Cavalcante (2007) desarrollan un caso de estudio en la ciudad de Ottawa (Canadá) bajo un área de 1000x600 metros, usando un modelo bidimensional, el algoritmo de fuerza bruta y la UTD. En su trabajo, consideraron hasta la cuarta reflexión y dos difracciones, evitando, en esta última situación, los cálculos por difracción en techos de edificaciones. Se asume que los pisos son completamente planos, es decir, que no hay curvas de nivel en los terrenos. El parámetro pertinente a permitividad en paredes es de seis, en conductividad de 0.5S/m. Para el plano tierra los parámetros fueron de quince para la permitividad y una conductividad de 0.005 S/m.

El software para el desarrollo fue implementado en programación orientada a objetos C++ y se empleó una estrategia de grilla computacional paralela de cuatro nodos. Se usaron 655362 rayos con una separación inicial de 0.27° aproximadamente, usando un modelo tridimensional. La evaluación se realizó midiendo el tiempo de procesamiento por *clusters* y la eficiencia, demostrando que es posible incrementar el número de elementos en el mapa de sitio específico, obteniendo el rendimiento computacional esperado. También se presenta la Figura 3, la cual evidencia una aproximación significativa en las pérdidas de trayectoria; sin embargo, no se estima el error ni la desviación estándar.

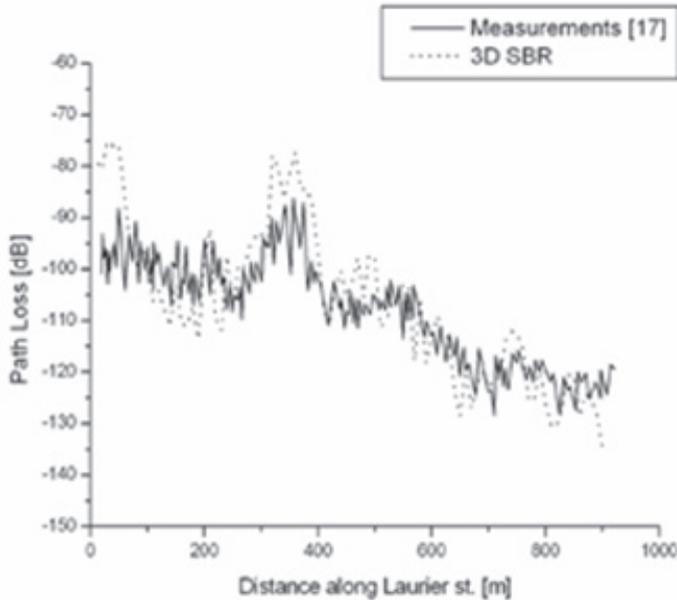


Figura 3. Cálculo de las pérdidas por trayectoria (Cavalcante et al., 2007)

En la ciudad de Karlsruhe (Alemania), empleando el algoritmo RiMAX (Fügen, Knörzer, Landmann, Thomä, & Wiesbeck, 2007) desarrollan un trabajo que emplea la técnica del trazado de rayos en 3D para predecir el comportamiento en macrocelda de señales en 5.2 GHz, verificando con mediciones los parámetros de máxima verosimilitud. Los resultados muestran un alto desempeño de correlación en los niveles de retardo de propagación y azimut.

Zhou et al. (2009) usan la banda de frecuencias del estándar 802.11, simulando en *Network Simulation2* [NS-2]. El entorno de comprobación es el campus de la Universidad de Nebraska-Lincoln (Omaha, NE). Adicional a la técnica de trazado de rayo, se emplean módulos de propagación de pequeña escala y log-normal provistos por el simulador y ajustados. Además, un módulo de desvanecimiento Rice se utiliza para la pequeña escala, mientras que el modelo de espacio libre se usa en el desvanecimiento de gran escala. Los efectos de los dispersores reales, como la permitividad y la conductividad, no son tomados en cuenta; para suplirlos, incluyen algunos factores de corrección basados en mediciones. La evaluación emplea el cálculo del factor K y la atenuación para cuatro sectores del campus con características de entorno diferentes. Los resultados de este trabajo muestran un pre-procesamiento en la información de sitio específico como factores de corrección basados en medida y agregados al NS-2. Sin embargo no calculan medidas estadísticas de error.

El algoritmo de lanzamiento inteligente de rayos [IRLA, *Intelligent Ray Launching Algorithm*] es propuesto por Lai, Bessis, de la Roche, Song, Zhang, & Clapworthy (2009). Este algoritmo se basa en la elaboración de cubos discretos que interpretan las edificaciones en forma *Booleana*. El algoritmo puede agrupar cubos con línea de

vista, con difracción o con refracción, considerando todas las edificaciones en concreto. Emplea el modelo de pérdidas por propagación en el espacio libre y usa calibración basada en medida. La medida de precisión es obtenida a través del error medio cuadrado. Sus resultados incluyen la rapidez computacional aplicando la técnica de *multithreading*. En ésta, un único conjunto de instrucciones (código) es usado por varios procesadores, en diferentes etapas de ejecución. El escenario de comparación es COST-Munich y obtiene un error medio entre 0.001 y 0.006.

El uso de motores de juego para desarrollar técnicas de trazado de rayos aplicada a entornos bien definidos en tres dimensiones es presentada en Navarro y Guevara (2010c), quienes usando el motor de juegos JMonkey versión 2.0 y la técnica de fuerza bruta obtienen una alta precisión y rapidez computacional. El trabajo implementa digitalmente la ciudad de Cali (Colombia), usa la frecuencia de 900 MHz con lanzamiento de 393.593 rayos con separación de 0.27° ; realiza una técnica de pre-procesamiento de rayos que reduce substancialmente el tiempo de cómputo al calcular solo los rayos que impactan al receptor tomando en cuenta la sensibilidad del mismo. Se destaca la caracterización de la permitividad como un valor complejo. En este trabajo se obtuvo un error medio de 5.49 dB y una desviación estándar de 4.21 con respecto de las mediciones. El mayor aporte de este trabajo es la reducción del tiempo computacional, al utilizar avances en las tarjetas gráficas, software libre y alta precisión. Adicionalmente, las características del entorno evaluado fueron tomadas con herramientas de información geográfica, lo cual asegura la simulación real del escenario.

Schneider, Narandzic, Kaske, Sommerkorn, & Thoma, (2010) muestran los resultados obtenidos al implementar un sistema MIMO en la ciudad de Ilmenau (Alemania). Emplearon una frecuencia de 2.53 GHz en un área cuadrada de mil metros y contrastada con los resultados del documento IST-4-027756 WINNER II empleando RIMAX. El trabajo muestra una alta correlación para el análisis a gran escala, especialmente aplicable a LTE y LTE-A.

Para la situación donde las edificaciones del sitio a evaluar poseen una altura mayor que la altura en la que se encuentra el conjunto transmisor-receptor, es válido aproximar a dos dimensiones el análisis del trazado de rayos. Soni y Bhattacharya (2012) presentan un modelo eficiente para microceldas que asume la situación mencionada; el modelo está basado en el algoritmo de fuerza bruta y en una estrategia de árbol de reflexiones/difracciones, para estimar los rayos de interés. Esta aplicación se evaluó sobre la ciudad de Ottawa (Canadá), en la frecuencia de 910 MHz (Whitteker, 1988). Se empleó una permitividad de siete y una conductividad de 0.001. Otros escenarios validados fueron la ciudad de Bern (Suiza) a una frecuencia de 1.89 GHz con una permitividad de cinco y una conductividad de 0.001, y Fribourg (Francia), usando una frecuencia de 1.8 GHz con la misma permitividad y conductividad de 0.0001 S/m. Este trabajo aporta un algoritmo eficiente para aproximar a dos dimensiones la técnica del trazado de rayo, calculando las pérdidas por propagación del espacio libre y el retardo de propagación. El tiempo computacional es mejorado con respecto a los propuestos en una aplicación

convencional no mencionada, y se comprueba el incremento del recurso de cómputo al incrementar el número de dispersores.

Liu, Shi, Gao, y Wang (2011) proponen un nuevo método para el tratamiento del terreno, usado para la evaluación del software licenciado Wireless InSite. La estrategia propone y evalúa, solo mediante simulación, que el terreno puede descomponerse en una malla de triángulos de tamaño variable. El algoritmo busca inicialmente una sección rectangular que contenga el conjunto transmisor-receptor, y divide este segmento del terreno en triángulos (expansivamente aumentan el tamaño de los triángulos que conforman la grilla), tratados en tres dimensiones del mismo terreno con variación del tamaño de superficie. Los resultados muestran la eficiencia computacional para las situaciones de dimensiones en las que el área del triángulo del conjunto transmisor-receptor es pequeña con respecto de todo el terreno. Para la situación opuesta, los tiempos obtenidos no ofrecen mejora.

Se requiere de nuevas estrategias para la siguiente generación de comunicaciones inalámbricas. El 5G propone desarrollar tecnologías que permitan aumentar la eficiencia espectral (Gohil, Modi, & Patel, 2013), como *massive* MIMO y Antenas inteligentes ajustables. Azar et al., (2013) aplican ondas milimétricas en un entorno urbano, donde el receptor, retroalimentando información del canal, hace posible ajustar el haz de transmisión, haciéndolo más directivo, resultando así en una menor dispersión, permitiendo mejorar la tasa de transmisión. El estudio se realizó en la ciudad de Nueva York (NY) a una frecuencia de 38 GHz.

De un modo similar, un estudio para la siguiente generación de Wifi realizó medidas en 5GHz para ambientes interiores-exteriores (El-Sallabi, Abdallah, & Qaraqe, 2013). En él, a través del ajuste del ángulo de recepción, se reduce el *delay spread*. Nuevamente la información del *delay spread* permite que sea reorientada la antena, mejorando los parámetros dispersivos, a través del aumento del tiempo de coherencia.

Un trabajo reciente para UWB fue realizado con mediciones en los rangos frecuencias de 3.1 GHz a 5.3GHz (Zahedi, Ngah, Chude-Okonkwo, Nunoo, & Mokayef, 2014). La singularidad de este trabajo está en que se modela un canal variable en tiempo. Mediante un vehículo, se mantiene una velocidad constante hacia el trasmisor que está ubicado a 10 metros de separación. El *delay spread* es verificado y caracterizado, y así el rendimiento del canal.

En un enlace satelital de bajada sobre la ciudad de Atenas (Grecia) se aplica la técnica de predicción a través del trazado de rayo y su comparación con mediciones (Moraitis, Panagopoulos, & Popescu, 2014). La simulación emplea el software *Advanced Topographic Development & Images* [ICSTelecom]. Los parámetros dispersivos son evaluados en tiempo para una técnica SIMO; la media del *excess delay* se da entre 174 y 576 ns para la componente LOS, mientras para la NLOS varía entre 411 to 487 ns. El *delay spread*, por su parte decreció en una media de 61 ns al tratarse de múltiples antenas en recepción, mejorando así, respeto de un enlace SISO.

Lu, Bertoni, Remley, Young, y Ladbury (2014) toman en cuenta, para áreas chicas, la potencia recibida, la cual es afectada por los peatones y el sentido del tráfico en vías. Es de notar que la ubicación del conjunto transmisor-receptor de radio enlaces de banda angosta se encuentra por debajo del nivel de los techos de las edificaciones. Se trata particularmente los servicios y la banda angosta que operan a nivel de las vías. Las frecuencias tomadas en cuenta van desde 430 MHz a 4.86 GHz en las ciudades de Denver (CO) y New York (NY), usando una aproximación en dos dimensiones. El objetivo alcanzado fue modelar los rayos contributivos en línea de vista o zona de sombra para áreas menores únicamente. Se destaca la permitividad utilizada que es tratada en forma compleja.

Conclusiones

Una diversidad de desarrollos validan las aproximaciones realizadas desde la simulación al emplear las múltiples formas del método del trazado de rayo, evidenciando que es una alternativa a los modelos empíricos.

Factores como la altura del transmisor y el receptor con respecto a la altura de las edificaciones, la permitividad y conductividad y otros dispersores no considerados, pueden modificar los resultados en magnitudes considerables. Parámetros de dispersión temporal como el *delay spread* permiten un análisis del canal, destacando el aumento del mismo con respecto al aumento de las frecuencias utilizadas.

El aumento en el detalle de los dispersores del entorno simulado consume recursos computacionales, pero aumenta la precisión. Una posibilidad para trabajos futuros es la generación de un algoritmo eficiente que permita el equilibrio entre la mayor cantidad de efectos posibles por la presencia de dispersores reales no tomados en cuenta, tales como árboles, la diversidad de materiales del entorno, la inclinación de los techos, las superficies rugosas, etc. La técnica a desarrollar debe realizarse con la técnica del trazado de rayos y un entorno de programación que sea ágil y eficiente en términos de tiempo de respuesta. ^{SR}

Referencias bibliográficas

- Agelet, F. (2000). Efficient ray-tracing acceleration techniques for radio propagation modeling. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 49(6), 2089-2104.
- Athanaileas, T. E., Athanasiadou, G. E., Tsoulos, G. V., & Kaklamani, D. I. (2010). Parallel radio-wave propagation modeling with image-based ray tracing techniques. *Parallel Computing*, 36(12), 679-695.
- Azar, Y., Wong, G. N., Wang, K., Mayzus, R., Schulz, J. K., Zhao, H., ... Rappaport, T. (2013). 28 GHz propagation measurements for outdoor cellular communications using steerable

- beam antennas in New York City. *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, (pp. 5143-5147). doi:10.1109/ICC.2013.6655399
- Balanis, C. (1998). *Antenna theory*. Hoboken, NJ: Wiley
- Brereton, P., Kitchenham, B.A., Budgen, D., Turner, M., & Khalil, M. (2007). Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of Systems and Software*, 80(4), 571-583. doi:10.1016/j.jss.2006.07.009
- Cavalcante, A., de Sousa, M., Costa, J.C., Frances, C.R. & Cavalcante, G. (2007). A parallel approach for 3d ray-tracing techniques in the radio propagation prediction. *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, 6(1), 207-219.
- Cavalcante, A., de Sousa, M., Sales-Jr, C., Costa, J.C., Cavalcante, G., & Frances, C.R. (2005). *Computational parallelization strategy applied in full 3D ray-tracing wireless channel modeling* [draft paper for IMOC 2005]. Recuperado de http://www.lea.ufpa.br/producaocientifica/seminarios/imoc2005_andre.pdf
- Corucci, A., Usai, P., Monorchio, A., & Manara, G. (2014). Wireless propagation modeling by using ray-tracing. En R. Mittra [Ed.]. *Computational electromagnetics: recent advances and engineering applications*, New York, NY: Springer
- Degli-Esposti, V. (2014, April). Ray Tracing propagation modelling: Future prospects. In *2014 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, (pp. 2232-2232). IEEE.
- Doicu, A., & Wriedt, T. (1997). Plane wave spectrum of electromagnetic beams. *Optics Communications*, 136(2), 114-124
- El-Sallabi, H., Abdallah, M., Qaraqe, K. (2013). Impact of Reconfiguring Inclination Angle of Client's Antenna on Radio Channel Characteristics of IEEE802.11ac System. 2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation (ISAP), (pp.430-433). IEEE
- Erceg, V., Fortune, S.J., Ling, J., Rustako, A.J., Valenzuela, R.A. (1997). Comparisons of a computer-based propagation prediction tool with experimental data collected in urban microcellular environments. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 15(4), 677-684.
- Feng, S., & Li, D. (2013). A research on novel direct vector method for ray tracing. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 124(23), 6377-6381. doi:10.1016/j.ijleo.2013.05.021
- Fügen, T., Knörzer, S., Landmann, M., Thomä, R., & Wiesbeck, W. (2007, November). A 3-D ray tracing model for macrocell urban environments and its verification with measurements. In *Second European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, (p.401). Stevenage, UK: IET
- Gohil, A., Modi, H., & Patel, S. K. (2013, March). 5G technology of mobile communication: A survey. In *Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP), 2013 International Conference on* (pp. 288-292). IEEE.
- Ho, S. L., Wang, J., Fu, W. N., & Sun, M.

- (2011). A comparative study between novel witrlicity and traditional inductive magnetic coupling in wireless charging. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(5), 1522-1525.
- Kanatas, A. G., Kountouris, I. D., Kostaras, G. B., & Constantinou, P. (1997). A UTD propagation model in urban microcellular environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 46(1), 185-193.
- Kostov, N. (2003). Mobile radio channels modeling in MATLAB. *Radioengineering -Prague-*, 12(4), 12-17.
- Kurner, T., Cichon, D. J., & Wiesbeck, W. (1993). Concepts and results for 3D digital terrain-based wave propagation models: An overview. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 11(7), 1002-1012.
- Lai, Z., Bessis, N., de la Roche, G., Song, H., Zhang, J., & Clapworthy, G. (2009). An intelligent ray launching for urban prediction. In *3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009*. (pp. 2867-2871). IEEE.
- Lee, W. C. (1985). Estimate of local average power of a mobile radio signal. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 34(1), 22-27.
- Liang, G., & Bertoni, H. L. (1997). Review of ray modeling techniques for site specific propagation prediction. In *Wireless Communications* (pp. 323-343). New York, NY: Springer.
- Liu, Y., Shi, D., Gao, Y., & Wang J. (2011). A new method for reducing simulation time based on ray-tracing algorithm. *2012 Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM)*, (pp. 163-166). Piscataway, NJ: IEEE
- Lu, J., Bertoni, H., Remley, K., Young, W., & Ladbury, J. (2014). Site-Specific Models of the Received Power for Radio Communication in Urban Street Canyons. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(4), 2192-2200
- Lutz, E. (2013, September). Modelling of the land mobile satellite communications channel. In *2013 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, (pp. 199-202). IEEE.
- Montenegro-Villacieros, B., Oestges, C., Vanhoenacker-Janvier, D., Prieto-Cerdeira, R., & Martellucci, A. (2010). Review and update of mobile data processing for the Land Mobile Satellite channel modelling. In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
- Moraitis, N., Panagopoulos, A.D., & Popescu, I. (2014). Propagation study of a wideband SIMO land mobile satellite system in a dense urban environment. In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2014 8th European Conference on* (pp. 1269-1273). IEEE.
- Navarro, A. & Guevara, D. (2010c). Using game engines in ray tracing physics. In *2010 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, (pp. 1-5). IEEE.
- Navarro, A., & Guevara, D. (2010a). Applicability of game engine for ray Tracing Techniques in a Complex Urban Environment. In *2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference*

- Fall (VTC 2010-Fall)*, (pp. 1-5). IEEE.
- Navarro, A., & Guevara, D. (2010b). Using game engines for wideband channel estimation parameters in Andean cities. In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- Navarro, A., Guevara, D., & Cardona, N. (2014). Using game engines and graphic technologies for ray-tracing in future wireless. In *2014 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, (pp. 1780-1784). IEEE.
- Pajusco, P. (2006). Propagation channel models for mobile communication. *Comptes Rendus Physique*, 7(7), 703-714.
- Pontes, M.S. & Silva-Mello, L.A.R. (2010). Review on terrestrial propagation channel modelling. In *Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
- Rautiainen, T., Wolfle, G., & Hoppe, R. (2002). Verifying path loss and delay spread predictions of a 3D ray tracing propagation model in urban environment. In *IEEE 56th Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall*. (Vol. 4, pp. 2470-2474). IEEE.
- Ros, F. J., Martinez, J. A., & Ruiz, P. M. (2014). A survey on modeling and simulation of vehicular networks: Communications, mobility, and tools. *Computer Communications*, 43, 1-15.
- Sarkar, T.K., Ji, Z., Kim, K., Medouri, A., & Salazar-Palma, M. (2003). A survey of various propagation models for mobile communication. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45(3), 51-82.
- Schaubach, K. R., & Davis IV, N. J. (1994). Microcellular radio-channel propagation prediction. *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, 36(4), 25-34.
- Schneider, C., Narandzic, M., Kaske, M., Sommerkorn, G., & Thoma, R. S. (2010). Large scale parameter for the WINNER II channel model at 2.53 GHz in urban macro cell. In *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st* (pp. 1-5). IEEE.
- Sharma, S. K. (2012). Characterization and modeling of MIMO wireless channels based on correlation tensor. *Computers & Mathematics with Applications*, 64(2), 89-101.
- Son, H-W., & Myung, N-H. (1999). A new approach to 3-d ray tracing for a microcellular propagation prediction model. *Microwave and Optical Technology Letters*, 23(3), 159-163.
- Soni, S., & Bhattacharya, A. (2012). An efficient two-dimensional ray-tracing algorithm for modeling of urban microcellular environments. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 66(6), 439-447.
- Talha, B., & Patzold, M. (2011). Channel models for mobile-to-mobile cooperative communication systems: A state of the art review. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 6(2), 33-43.
- Tameh, Doufexi, Hunukumbure, & Nix (2007). Efficient multielement ray tracing with site-specific comparisons using measured MIMO channel data. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(3), 1019-1032.

- Tranter, W., Shanmugan, K., Rappaport, T., & Kosbar, K. (2003). Principles of communication systems simulation with wireless applications. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall
- Unión Internacional de Telecomunicaciones [UIT]. (2013). *Key ICT indicators for developed and developing countries and the world (totals and penetration rates)* [on line]. Retrieved from http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/statistics/2013/ITU_Key_2005-2013_ICT_data.xls
- Whittaker, J. H. (1988). Measurements of path loss at 910 MHz for proposed microcell urban mobile systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 37(3), 125-129.
- Yang, Y., Zong, R., Gao, X., & Cao, J. (2010, December). Channel modeling for High-Altitude platform: A review. In *Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), 2010 International Symposium on* (pp. 1-4). IEEE.
- Zhou, T., Sharif, H., Hempel, M., Mahasukhon, P., Wang, W., & Ci, S. (2009, June). A novel ray tracing based multipath modeling approach for site-specific WLAN simulations. In *Communications, 2009. ICC'09. IEEE International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- Zhu, H., Takada, J.I., Araki, K., & Kobayashi, T. (2001). Verification of a two-dimensional/three-dimensional hybrid ray-tracing method for spatiotemporal channel modeling. *Radio Science*, 36(1), 53-66.
- Guevara, D. (2011). *Estimación de parámetros de canal en entornos 3D* [tesis]. Medellín, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Zahedi, Y., Ngah, R., Chude-Okonkwo, U., Nunoo, S., & Mokayef, M. (2014). Modeling the RMS delay spread in time-varying UWB communication channels. *2014 5th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*, (pp.1-5). IEEE

Currículum vitae

Andrés Navarro Cadavid

Profesor titular y Director del Grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones (i2T) de la Universidad Icesi de Cali. Es Ingeniero Electrónico (1993) y Magister en Gestión de la Tecnología (1999) de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín y Doctor Ingeniero en Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia, España (2003).

Dianel Guevara

Ingeniero electricista de la Universidad Industrial de Santander (Colombia), especialista en Teleinformática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia), Maestría en Ingeniería Electrónica con énfasis en Telecomunicaciones de la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (Venezuela) y Doctor en Ingeniería área de Telecomunicaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín (Colombia). Actualmente labora como docente asociado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Francisco de Paula Santander en el programa de Ingeniería Electrónica y es el Director del Grupo de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones [GIDT]. Su área de interés son los modelos de canal inalámbrico.

Jorge Gómez Rojas

Estudiante de doctorado en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana [UPB] de Medellín; Magister en Ingeniería Electrónica, de la Universidad Nacional Experimental del Táchira; Especialista en Teleinformática e Ingeniero Electrónico de la UPB. Docente investigador de la Universidad de Magdalena (Santa Marta, Colombia).