

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES



Universidad  
Carlos III de Madrid

PROYECTO FIN DE CARRERA:

**INVESTIGATION ON MOBILE RADIO  
PROPAGATION CHANNEL MODEL BASED  
ON MEASUREMENT DATA**

Autor: José Ángel León Calvo

Realizado en:  
RWTH Aachen University

---

Fecha: 3 de Junio de 2014

Supervisado por:  
Univ.-Prof. Dr. Rudolf Mathar

Autor: José Ángel León Calvo

Institución: RWTH Aachen University

Director: Univ.-Prof. Dr. Rudolf Mathar

Supervisores: M.Sc.EE Xiang Xu y Dipl.-Inform. Florian Schröder

Fecha de lectura: 3 de Junio 2014

Coordinador Académico ERASMUS: Daniel Cuesta García

Cotutor en UC3M: Víctor Pedro Gil Jiménez

Calificación obtenida: 10

## Abstract

Los canales de comunicación inalámbricos en comunicaciones móviles cambian la señal transmitida y por lo tanto, estos deben ser modelados apropiadamente. Si un sistema multiple-input multiple-output (MIMO) es considerado, el proceso de modelado se vuelve más desafiante debido a las componentes multicanal de este. Por una parte, las propiedades estadísticas del canal MIMO son modeladas usando un modelo estocástico basado en geometría, como es el modelo WINNER II. Por otra parte, los fenómenos físicos que se producen durante la propagación de las ondas radio puede ser descritos usando modelos determinísticos, como PIROPA (Parallel Implemented Ray Optical Propagation Algorithm). Además, un modelo semi-estocástico puede ser derivado combinando los modelos estocásticos y físicos. En este estudio, un modelo semi-estocástico de canal es implementado y comparado sus resultados con datos obtenidos en un escenario real. Los resultados muestran que el modelo semi-estocástico tiene ventajas en precisión del modelado y tiempo de ejecución respecto al modelo WINNER II, el cual es ampliamente utilizado en la actualidad.

## Introducción

El principal objetivo de este estudio es crear un modelo de canal semi-estocástico, el cual recrea las condiciones de un canal de comunicaciones y comparar los resultados de éste, con muestras tomadas en un escenario real. Estas muestras se han obtenido tras realizar un post-procesado de los datos en crudo. Una vez realizado este post-procesado, las muestras tienen un formato óptimo para realizar la comparación con nuestros resultados. Para este objetivo, el modelo de canal semi-estocástico ha sido creado usando las propiedades de los modelos determinísticos, junto con los modelos estocásticos, esto es, aquellos con propiedades aleatorias.

El segundo objetivo de este estudio es validar los resultados obtenidos por el modelo de canal semi-estocástico, extrayendo las propiedades del canal junto con las características de la señal. Debido a que se está usando un canal MIMO, esto causará que componentes multicanal repercutan en la señal y por lo tanto, será de gran importancia realizar un correcto modelado de estas componentes. Además, un nuevo método de clustering conocido como *Spectral Clustering* es usado para clasificar los datos en términos de potencia recibida.

La contribución más significativa de este estudio al campo del modelado de canal es juntar dos diferentes vertientes dentro del modelado, esto es, modelos determinísticos y modelos aleatorios, para obtener un modelo semi-estocástico que a tenor de los resultados obtenidos ha demostrado ser válido.

## Canal MIMO

Hoy en día, con la gran penetración de la tecnología móvil en nuestra vida diaria y el incremento en el número de usuarios, la necesidad de tener un sistema que nos

aporte un gran flujo de datos y además sea seguro es primordial. Es por esto, que se han creado sistemas con múltiples antenas a ambos lados del enlace. Los sistemas MIMO están definidos como sistemas punto a punto, esto es, sistemas que crean un enlace de comunicación entre nodos.

Teniendo múltiples antenas a ambos extremos del canal, se mejora el comportamiento del sistema, comparado con sistemas que tienen una única antena. Además, los sistemas MIMO son capaces de producir un aumento de la capacidad de forma lineal siendo este aumento proporcional al número de usuarios activos en el sistema.

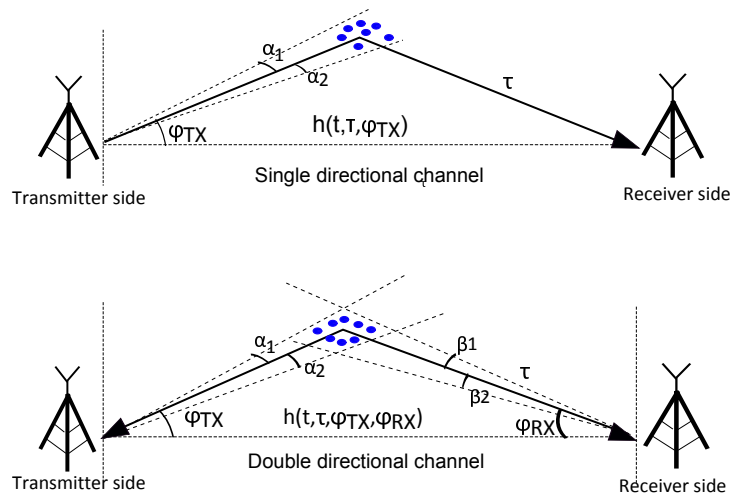
El canal MIMO está representado por el siguiente sistema, definido de forma discreta:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_M \end{bmatrix}.$$

Usando una forma compacta se puede definir como  $\vec{y} = \mathbf{H}\vec{x} + \vec{n}$  donde  $\mathbf{H}$  representa la matriz del canal,  $\vec{x}$  representa la señal transmitida y  $\vec{n}$  representa el ruido gaussiano en el canal.

## Double Directional Radio Channel

Hasta ahora, el canal radio se ha descrito únicamente en uno de los extremos del enlace. Sin embargo, usando el double directional radio channel, ambos extremos deben tratarse de forma independiente. Usando este radio canal, se tiene en cuenta tanto el ángulo de salida en el transmisor como el ángulo de llegada al receptor.



El double directional radio channel está formado por los siguientes bloques:

1) Antena transmisora: la antena distribuye la energía de la señal en las direcciones deseadas.

2) Double directional channel: incluye todos los componentes multicanal entre transmisor y receptor.

3) Antena receptora: la antena receptora recibe todos los componentes de la señal transmitida.

Cada uno de los ángulos de salida están relacionados con los ángulos de llegada, por lo que estos están pareados. Debido a esta propiedad, se puede realizar un rastreo partiendo del ángulo de llegada en el receptor, hasta obtener el ángulo de salida.

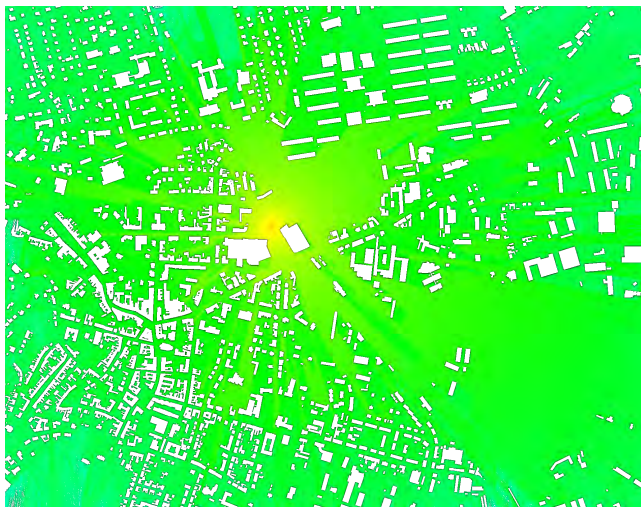
El double directional radio channel está definido de la siguiente forma:

$$h(\tau, \varphi_{\text{Rx}}, \varphi_{\text{Tx}}) = \sum_{i=1}^N H_i e^{j\phi_i} \delta(\tau - \tau_i) \delta(\varphi_{\text{Rx}} - \varphi_{\text{Rx},i}) \delta(\varphi_{\text{Tx}} - \varphi_{\text{Tx},i}).$$

## Algoritmo PIROPA

PIROPA (Parallel Implemented Ray Optical Propagation Algorithm) es un algoritmo de predicción del campo electromagnético. Debido a que es un modelo determinístico de canal, los resultados serán siempre los mismos, mientras se tengan los mismos parámetros de entrada.

PIROPA calcula el camino de propagación siguiendo los rayos lanzados por la antena en el transmisor, basándose en los efectos físicos dados por el escenario. PIROPA está diseñado basándose en una arquitectura hardware en paralelo, por lo que el rendimiento del algoritmo será superior.



PIROPA está diseñado siguiendo un modelo que considera los efectos de los rayos ópticos, los cuales son los siguientes:

- Reflexiones en paredes
- Difracción horizontal
- Difracción vertical

Una vez que se ha ejecutado PIROPA, los resultados que después se introducirán en el modelo de canal semi-estocástico son los siguientes:

- Ángulo de salida y llegada
- Retardo
- Distancia entre transmisor y receptor
- Pérdidas de propagación

## Modelo de canal WINNER II

El modelo de canal WINNER II es un modelo estocástico basado en geometría. Usando las propiedades de este modelo, los parámetros de propagación y las antenas a ambos lados del enlace pueden ser tratados de forma independiente. Los parámetros del canal son generados estocásticamente a partir de distribuciones estadísticas extraídas de una serie de medidas en canales análogos.

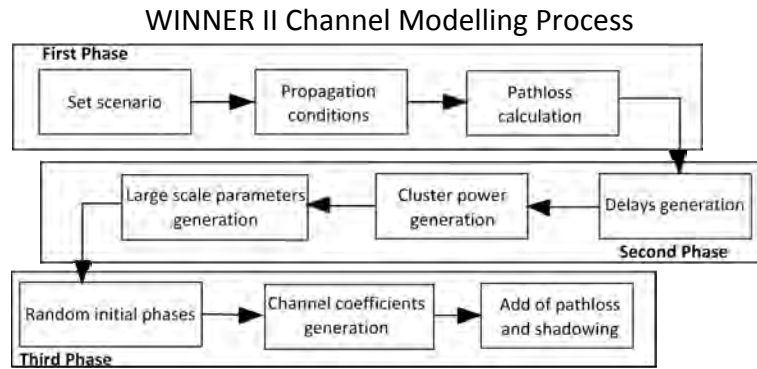
Las realizaciones del canal son creadas añadiendo a las ondas electromagnéticas planas, la contribución de los parámetros de pequeña escala como son: el retardo, la potencia y los ángulos de llegada y salida. Los rayos en el modelo WINNER II están agrupados en clusters que están definidos como un camino de propagación donde los rayos se agrupan en base a un similar retardo y dominio angular.

La matriz de canal MIMO en el modelo WINNER II está definida de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 H_{u,s,n}(t; \tau) = & \sum_{m=1}^M \begin{bmatrix} F_{Rx,u,V}(\varphi_{n,m}) \\ F_{Rx,u,H}(\varphi_{n,m}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \alpha_{n,m,VV} & \alpha_{n,m,VH} \\ \alpha_{n,m,HV} & \alpha_{n,m,HH} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Tx,s,V}(\phi_{n,m}) \\ F_{Tx,s,H}(\phi_{n,m}) \end{bmatrix} \\
 & \times \exp(j2\pi\lambda_o^{-1}(\vec{\varphi}_{n,m} \cdot \vec{r}_{Rx,u})) \exp(j2\pi\lambda_o^{-1}(\vec{\phi}_{n,m} \cdot \vec{r}_{Tx,u})) \\
 & \times \exp(j2\pi\nu_{n,m}t) \delta(\tau - \tau_{n,m}).
 \end{aligned}$$

El proceso de modelado de WINNER II está dividido en tres fases:

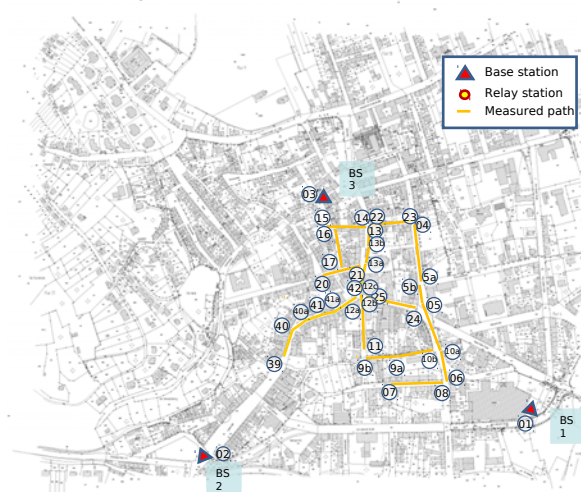
- Primera fase: es la definición del escenario, donde se realiza la selección de las propiedades del entorno.



- Segunda fase: consiste en el análisis de datos y generación de parámetros usando el escenario obtenido en la primera fase.
- Tercera fase: consiste en la simulación, donde se crea la matriz de transferencia MIMO.

## Medidas

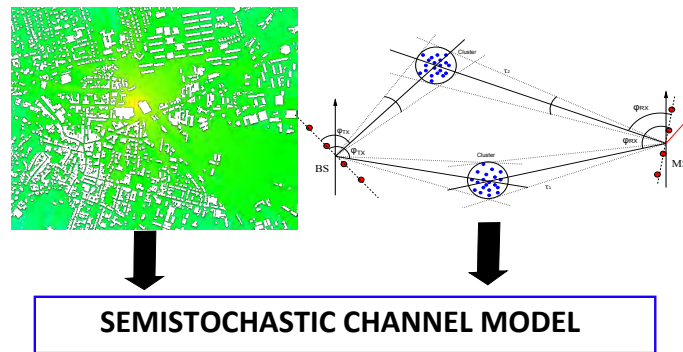
La campaña de medida fue realizada con el objetivo de obtener datos de un canal realista en un entorno urbano usando una banda de frecuencia entre 2-3 GHz, donde el 3GPP Long Term Evolution Band (LTE) funciona. Usando estas medidas, una evaluación del modelado de canal puede realizarse bajo condiciones realistas y las propiedades multicanal del medio pueden demostrarse. La campaña de medida fue realizada por la Ilmenau University. La zona de medida fue el centro de la ciudad de Ilmenau con un área aproximada de 10 kilómetros cuadrados. La zona de medida fue dividida en 22 caminos diferentes con una longitud media de 250 metros cada uno.



Los caminos medidos fueron seleccionados de tal forma, que el mayor número de fenómenos multicanal distintos se dieran lugar. La zona de medida está localizada en una zona urbana y la velocidad de los receptores es de 5-10 kilómetros por hora, emulando la velocidad de un transeúnte. Las tres antenas emisoras están colocadas conformando un triángulo, con la totalidad de los caminos medidos dentro de éste.

## Modelo de canal semi-estocástico

El modelo de canal semi-estocástico es una combinación de un algoritmo determinista, PIROPA, con un modelo estocástico basado en geometría, WINNER II, como se muestra en la figura.



Usando un modelo ray-launcher determinista, cada difracción o reflexión desde el transmisor al receptor es determinada. Sin embargo, en áreas al aire libre, no se puede lograr el mismo nivel de detalle que en las zonas indoor, debido a los requisitos en cuanto a datos. Sin embargo, para exteriores, con un bajo nivel de detalle, es suficiente para obtener un modelo de canal preciso. Los modelos estocásticos basados en geometría son adecuados para representar las propiedades de propagación del medio, y la aleatoriedad inherente de estos modelos es una característica perfecta para crear un enfoque preciso para modelos de sistemas inalámbricos. Por lo tanto, la combinación de las ventajas de los modelos deterministas y la capacidad para recrear el ambiente de propagación de radio de los modelos estocásticos basados en geometría, confieren al modelo utilizado en este estudio de las mejores propiedades de ambos mundos.

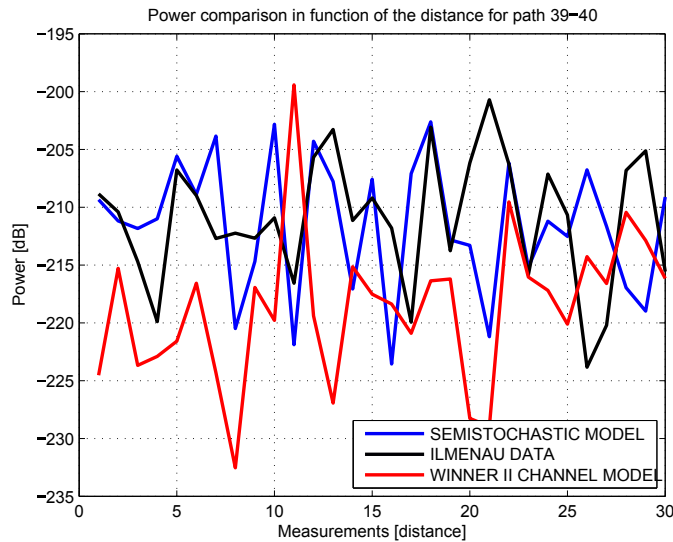
## Potencia recibida

La potencia recibida es definida como, la potencia resultante que llega al receptor siguiendo la siguiente fórmula:

$$PathPower_i = Power_{Tx} - PathLoss_i + Gain_{Tx} + Gain_{Rx} - X_i.$$



Siendo  $X_i$  un parámetro que incluye los fenómenos multicanal para cada una de las realizaciones. Como se muestra en la figura, la potencia recibida en el receptor pre-

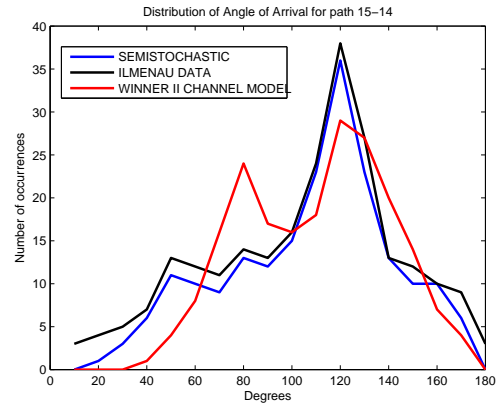
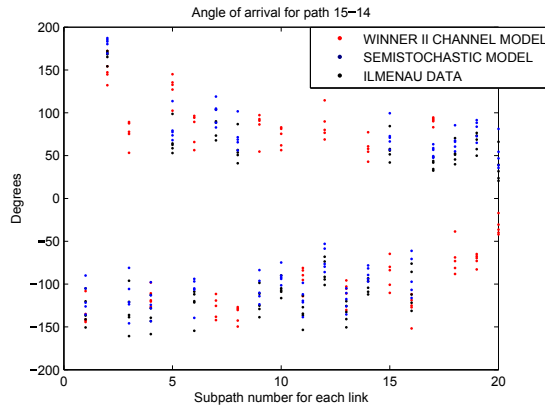


senta diferentes picos de potencia debido a la presencia de componentes multicanal. La potencia recibida en el modelo de canal semi-estocástico es más cercana a los datos obtenidos en el escenario real que los obtenidos por el modelo WINNER II, ya que en nuestro modelo semi-estocástico, el escenario de propagaciones es conocido.

## Ángulo de llegada

El ángulo de llegada al receptor es bastante difícil de obtener en el enlace radio, debido a las múltiples componentes multicanal del medio y a la situación NLoS del camino de propagación. La importancia de conocer estos ángulos es crítica, ya que las antenas receptoras pueden ser diseñadas para tener el lóbulo principal apuntando hacia la dirección más probable por la que llegará la señal, obteniendo de esta forma una sustancial ganancia en términos de potencia. En nuestra simulación, el diagrama de radiación de la antena receptora es omnidireccional, para poder recibir la señal en todas direcciones. Además, debido a que es un array circular existe una ambigüedad en la medida de los ángulos de llegada de 180 grados.

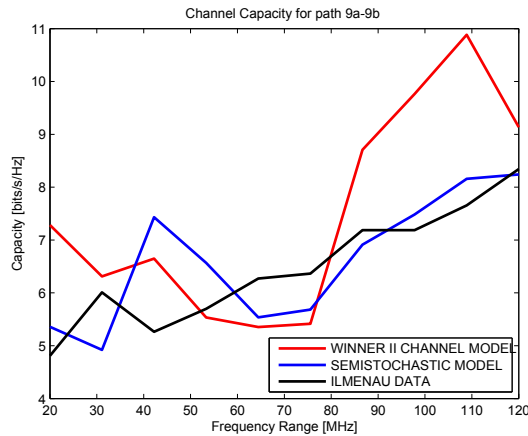
Como se muestra en la figura, la medida de los ángulos obtenida usando el modelo de canal semi-estocástico concuerda casi perfectamente con la medida obtenida de las muestras en un escenario real. Con este parámetro se demuestra que el algoritmo determinista que hemos usado como parámetro de entrada, describiendo el entorno tiene un comportamiento muy cercano a la realidad.



## Capacidad

En esta sección, se analizará la ganancia que ofrece en términos de capacidad el uso de sistemas MIMO y su comparación con los datos obtenidos en un escenario real. En un canal con desvanecimiento, la matriz de canal  $\mathbf{H}$  está asociada con la capacidad y se calcula con la siguiente ecuación:

$$C = \mathcal{E} \left\{ \max_{trC=M} \log_{10} \det \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{M} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right\}.$$



Como se ha mostrado en la figura anterior, la capacidad medida en el camino de propagación sigue una línea prácticamente lineal que se incrementa con el rango de frecuencias. Para el modelo de canal semi-estocástico, la curva es similar, pero se pueden apreciar diferentes fluctuaciones en ella. Sin embargo, para el modelo de canal WINNER II, se puede apreciar que la curva tiene un comportamiento distinto y totalmente alejado de los otros dos modelos.

## Conclusiones y trabajo futuro

En este estudio se ha implementado un modelo de canal semi-estocástico usando MATLAB. La implementación de este modelo se ha basado en un canal MIMO, ya que se han usado múltiples antenas a ambos extremos del canal de comunicaciones.

El modelo de canal semi-estocástico ha demostrado tener un mejor comportamiento que los modelos conocidos anteriormente, debido a la combinación de las ventajas de los modelos determinísticos y los modelos estocásticos. Los resultados obtenidos en nuestro modelo de canal, comparados con las medidas obtenidas en un escenario real, han demostrado ser precisas. Por lo tanto este modelo puede ser usado como base para futuras aplicaciones comerciales.

Sin embargo, el modelo de canal semi-estocástico necesita incorporar algunas nuevas funcionalidades para poder ser utilizado con fines comerciales y ser mas preciso en sus resultados. Además, debido a la dualidad de este modelo, uno de los principales componentes de este es el escenario de medida, y este puede ser complicado de obtener con la resolución y parámetros necesarios.

El trabajo futuro a partir de este estudio, es crear una capa superior sobre el modelo de canal semi-estocástico, basada en LTE que explote las características de este. Además, otro de los elementos a mejorar es la rapidez del sistema, ya que si se consiguen latencias menores, se podrá utilizar para realizar medidas en tiempo real.