

Derivación analítica del tiempo de llegada en modelos de canal basados en geometría para sistemas inalámbricos

M.R. Arias

Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional (IPN)
C. P. 07738, México D.F., México
E-mail: marvin.arias@uni.edu.ni

(recibido/received: 31-Mayo-2007; aceptado/accepted: 22-Oct-2007)

RESUMEN

Este artículo presenta una propuesta analítica para derivar la función de densidad de probabilidad de potencia (PDF, por sus siglas en inglés) del tiempo de llegada (TOA, por sus siglas en inglés) y su aplicación en los modelos de canal estadísticos basados en geometría para ambientes urbanos. En éste artículo proponemos un modelo de canal utilizando el método por agrupamiento, y lo empleamos para derivar la PDF del tiempo de llegada de la señal de multitrayectorias. Para evaluar la PDF teórica propuesta por agrupamiento en el dominio del tiempo, hacemos simulaciones por computadora del modelo de canal basado en geometría propuesto y lo comparamos con los resultados experimentales publicados en la literatura. La comparación con los resultados experimentales revelan una buena aproximación. La PDF por agrupamiento derivada se puede utilizar para simular la dispersión temporal de la señal de multitrayectorias agrupadas para una variedad de condiciones de propagación en ambientes urbanos para cuantificar parámetros estadísticos de segundo orden, es decir, la difusión de retardo para una forma elíptica específica dada por el grupo de señales de multitrayectorias.

Palabras claves: componentes de multitrayectoria; dirección de llegada; grupos; modelo de canal; perfiles del espectro de potencia promedio recibido

ABSTRACT

This paper presents an analytical approach to derivate the time of arrival (TOA) power density function (PDF) and its application in geometry-based statistical channel models for urban environments. We propose a clustering approach channel model, and employ it to derive the PDF of TOA of the multipath signal. To evaluate the theoretical clusters PDF in time domain proposed, we make computer simulations for the geometry-based channel model proposed and compared it with experimental results published in the open literature. The comparison with experimental results showed good agreement. The cluster PDF derived can be used to simulate temporal dispersion of the multipath signal grouped in clusters in a variety of urban propagation conditions to quantify second order statistics, i.e. delay spread for a given elliptical shape of the cluster.

Keywords: channel model; clusters; direction of arrival; multipath components; power delay angle profiles

INTRODUCCIÓN

En un sistema de radiocomunicación móvil, las ondas electromagnéticas emitidas viajan del transmisor al receptor sobre múltiples trayectorias reflexivas debido a obstáculos (e.g. edificios, montañas, árboles, señales de tránsito), que bloquean la componente de trayectoria directa, conocida como línea de vista (LOS, por sus siglas en inglés) (Zhao *et al.*, 2002). Este fenómeno es conocido como propagación por múltiples trayectorias (*multipath propagation*), que pueden causar fluctuaciones en la amplitud, fase y ángulo de llegada de la señal recibida, obteniéndose como resultado el fenómeno conocido como desvanecimiento por múltiples trayectorias (*multipath fading*). La distorsión conocida como interferencia intersimbólica (ISI, por sus siglas en inglés), causada por la propagación de multitrayectorias es de característica lineal y debe de ser compensada en el lado receptor, por ejemplo por un ecualizador (Pedersen *et al.*, 2000). En la Fig. 1 se ilustra un ejemplo de un escenario típico en ambientes urbanos de radiocomunicación móvil.

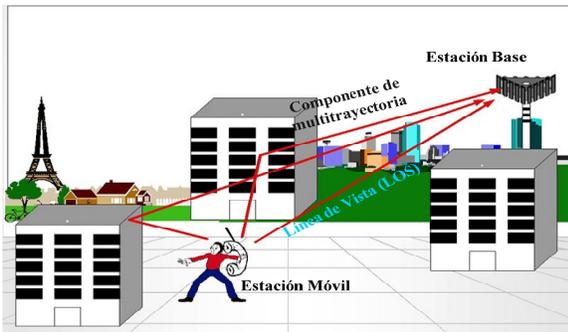


Fig. 1 Escenario típico de radiocomunicaciones móviles ilustrando la propagación sobre múltiples trayectorias reflexivas.

Para el diseño y simulación de muchos sistemas prácticos de radiocomunicación móvil, por ejemplo los sistemas de tercera generación de banda ancha de CDMA (W-CDMA por sus siglas en inglés), se requiere de modelos de canal prácticos que provean la información necesaria en el dominio del espacio-tiempo para el estudio y análisis de dichos sistemas. Además, estos modelos deben ser de fácil implementación y cumplir con requerimientos prácticos

importantes de diseño tales como simplicidad y capacidad de ser adaptables.

Los parámetros estadísticos empleados en dichos modelos son usualmente estimados por múltiples mediciones de campo, o bien inferidos por las asunciones geométricas. Trabajos clásicos publicados en este campo han demostrado que los modelos de canal deben tomar en cuenta la geometría física de los objetos (*scatters*) que están ubicados en las proximidades de las antenas de interés, es decir la estación base y la estación móvil (Pedersen *et al.*, 2000; Fuhl *et al.*, 1998).

Varias mediciones de campo realizadas y reportadas en la literatura para diferentes tipos de ambientes urbanos (interiores y exteriores), por ejemplo las presentadas en Toeltsch *et al.* (2002), Kermoal *et al.* (2002), Chong *et al.* (2003) y Yu *et al.* (2005), sugieren que en los perfiles del espectro de potencia promedio recibido (PDAPs por sus siglas en inglés) los componentes de multitrayectoria se agrupan en *clusters*. Los distintos *clusters* corresponden a objetos ubicados en los alrededores del ambiente, y cada *cluster* consta de un grupo de componentes de multitrayectorias que presentan similares ángulos de salida (AOD, por sus siglas en inglés), ángulos de llegada (AOA, por sus siglas en inglés) y tiempos de llegada (TOA, por sus siglas en inglés) que corresponden a una trayectoria dominante hacia el receptor (Rx) (Arias y Mandersson, 2006; Molish, 2004).

En este artículo el objetivo principal es presentar una propuesta analítica para derivar la función de densidad de probabilidad de potencia (PDF, por sus siglas en inglés) del TOA, y su aplicación en los modelos de canal estadísticos basados en geometría para ambientes urbanos. Adicionalmente, presentamos los resultados de la simulación y la comparación con mediciones de campo publicadas en la literatura de un escenario típico de ambiente urbano para condiciones exteriores.

TEORÍA

Esta sección introduce brevemente la descripción del modelo de canal propuesto

usando el método por agrupamiento (*clustering*) que utilizamos para derivar la PDF del TOA, considerando una función de densidad de dispersión uniforme. Iniciamos asumiendo que la estación móvil (Rx) está en condiciones estacionarias o bien que se desplaza a muy baja velocidad y por lo tanto no consideramos el efecto Doppler para el análisis. Dado que el método propuesto tiene también una base geométrica (como se ilustra en la Fig. 2), los resultados estadísticos de la señal dependen de la posición de la estación base (para este caso usado como transmisor Tx), la posición de la estación móvil (para este caso usado como receptor Rx), y la distribución geométrica de los *clusters*.

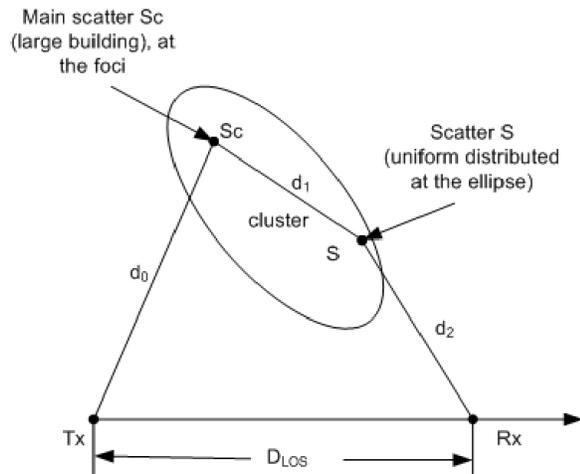


Fig. 2 Descripción del método por agrupamiento basado en geometría en el dominio del tiempo.

Para el análisis asumimos también que cada *cluster* (el cual contiene un número de *scatterers*), se considera estacionario en el campo lejano. De lo anterior, entonces definimos la respuesta al impulso del canal por cada *cluster* en función del ángulo de llegada (AOA) y el tiempo de retardo (*time delay*) de la siguiente forma (Arias y Mandersson, 2006):

$$h_{(\text{cluster})j}(\tau, \phi) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=0}^{L_j} \alpha_{ij} \delta(\phi - \phi_{ij}) \delta(\tau - \tau_0 - \tau_{ij}) \quad (1)$$

donde, para cada *cluster*: $|\alpha_{ij}|$ es la magnitud de la j^{th} componente de multitrayectoria, ϕ_{ij} es el AOA de la i^{th} componente de multitrayectoria, τ_0

representa el retraso extra debido al efecto de doble rebote y τ_{ij} es el retardo asociado con esa componente de multitrayectoria en la j^{th} fuente. El parámetro L_j es el número total de componentes de multitrayectoria asociado con la j^{th} fuente. Por lo tanto, definimos la respuesta total al impulso del canal en banda base de la siguiente forma:

$$h_{\text{btotal}}(\tau, \phi) = \sum_{j=1}^J h_{(\text{cluster})j}(\tau, \phi) \quad (2)$$

donde el parámetro J es el número de *clusters*. De los resultados de las mediciones de campo reportadas en Toeltsch *et al.* (2002), Chong *et al.* (2003) y Yu *et al.* (2005) en el 90 % de los casos, se identificaron del lado del receptor como máximo seis *clusters*, por lo tanto este dato lo utilizamos como criterio de selección para asignar el parámetro J , i.e. $J \leq L$. En la Fig. 2 se describe en mayor detalle el método propuesto en relación al análisis de los parámetros de la longitud de la trayectoria (*path length*) y los tiempos de llegada (TOA, por sus siglas en inglés) de la señal recibida. La Fig. 2 ilustra la descripción geométrica del modelo, donde asumimos las siguientes consideraciones: la región de cada *cluster* tiene una forma elíptica, y el *scatter* principal identificado como (Sc), el cual es descrito como un obstáculo en el campo lejano visto desde el receptor, (por ejemplo un edificio de varios pisos), es ubicado en uno de los focos de la elipse. Además asumimos que todos los *scatterers* representados como (S) en la Fig. 2, que pertenecen al mismo *cluster* están uniformemente distribuidos dentro del *cluster*. Otra de las consideraciones asumidas es que la propagación se desarrolla en un plano horizontal que contiene al transmisor (Tx), al receptor (Rx), (en este caso la estación móvil (MS)), y al *cluster*. En la misma Fig. 2, el parámetro D_{LOS} representa la distancia de separación entre el transmisor (Tx) y receptor (Rx).

Derivación analítica de la PDF del TOA

En esta sección, presentamos el análisis (en el dominio del tiempo), para derivar la PDF marginal del TOA entre el receptor (Rx) y el

cluster ubicado en el campo lejano. El área de la región sombreada como se ilustra en la Fig. 3 se calcula integrando esta región que es limitada por el *cluster* y de esa forma obtener la función de distribución acumulada (CDF, por sus siglas en inglés), luego derivando la CDF con respecto al tiempo de retardo, obtenemos la PDF del TOA.

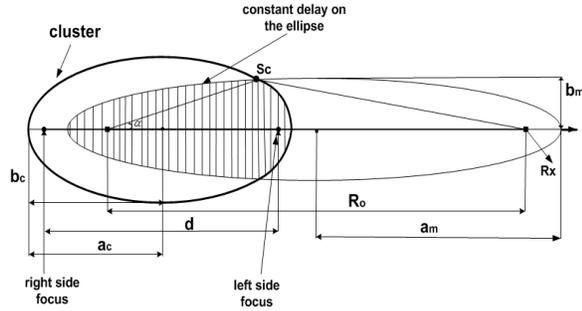


Fig. 3 Modelo de canal basado en geometría utilizado para derivar analíticamente la PDF del TOA por *cluster*.

De la Fig. 3 se puede observar que el máximo tiempo de retardo ocurre cuando la elipse encierra todos los puntos de la región definida por el *cluster*, como se menciona en Ertel y Reed (1999) y Janaswamy (2002). Si la región definida por el *cluster* se extiende hacia infinito, el tiempo máximo de retardo también tiende a infinito. Para derivar la CDF, expresamos la función de densidad de los *scatterers* que forman un *cluster* en coordenadas polares (r, θ). Las coordenadas polares se expresan en función de las coordenadas cartesianas a través del siguiente conjunto de ecuaciones:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right), \quad (3)$$

$$x = r \cos(\theta), y = r \sin(\theta)$$

donde, las coordenadas (x, y) definen la posición del *cluster*. Para una función de distribución uniforme de los *scatterers* que forman el *cluster*, la CDF del TOA puede definirse de la siguiente forma:

$$F_\tau(\tau) = \frac{A_\tau(\tau)}{A_c} \quad (4)$$

donde el área definida como $A_c = a_c b_c \pi$ describe el área *cluster* de forma elíptica, donde a_c y b_c representan los valores de los semiejes mayor y menor respectivamente, como se muestra en la Fig. 3. Además definimos el cociente de la elipse como el factor definido como $r_{ab} = b/a$, $0 < r_{ab} \leq 1$ para todo $a > b$. La ecuación de la elipse definida por los parámetros a_m y b_m como se ilustra en la Fig. 3 se define como sigue:

$$\frac{(x - R_0/2)^2}{a_m^2} + \frac{y^2}{b_m^2} = 1 \quad (5)$$

donde los parámetros a_m y b_m presentan los valores de los semiejes mayor y menor respectivamente, y f representa el foco de la elipse, el cual esta definido por la siguiente expresión (Liberti y Rappaport, 1999):

$$a_m = \frac{c\tau_m}{2}, b_m = \frac{1}{2} \sqrt{c^2\tau_m^2 - d^2}, \quad (6)$$

$$f = \sqrt{a^2 - b^2} = a \sqrt{1 - r_{ab}^2}$$

donde c representa la velocidad de la luz, y τ_m es el máximo TOA el cual se intersecta con el *cluster* en el punto S_c , localizado en el ángulo α como se ilustra en la Fig. 3. Utilizando las ecuaciones (3) y (6) podemos reescribir la ecuación (5) como sigue:

$$\frac{(R_0/2 - r_m \cos\phi)^2}{a_m^2} + \frac{r_m^2 \sin^2\phi}{b_m^2} = 1 \quad (7)$$

Entonces la ecuación (7) puede reescribirse en función de r_m de la siguiente forma:

$$r_m = \frac{4a_m^2 - R_0^2}{2(2a_m - R_0 \cos\phi)} = \frac{c^2\tau^2 - R_0^2}{2(c\tau - R_0 \cos\phi)} \quad (8)$$

De forma similar, también podemos analizar la ecuación de la región del *cluster* elíptico que se

ilustra en la Fig. 3 que se define de la siguiente forma:

$$\frac{(x-d_0)^2}{a_c^2} + \frac{y^2}{b_c^2} = 1 \quad (9)$$

y la ecuación (9) puede ser rescrita como sigue:

$$\frac{(r_c \cos \phi)^2}{a_c^2} + \frac{r_c^2 \sin^2 \phi}{b_c^2} = 1 \quad (10)$$

De lo anterior podemos reescribir la ecuación (10) en función de r_c como sigue:

$$r_c = \frac{a_c b_c}{\sqrt{a_c^2 \sin^2 \phi + b_c^2 \cos^2 \phi}} \quad (11)$$

Luego, calculando el área de traslape entre la elipse y el *cluster* elíptico en función del tiempo

$$A_\tau(\tau) = a_c^2 r_{ab} \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha}{r_{ab}} \right) + \frac{c^2 \tau^2 (e_\tau^2 - 1)}{4} \left[\frac{-\pi}{\sqrt{1 - e_\tau^2}} + \frac{e_\tau^2 \operatorname{sen} \alpha}{1 - e_\tau \cos \alpha} + \frac{2}{\sqrt{1 - e_\tau^2}} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 + e_\tau} \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right)}{\sqrt{1 - e_\tau}} \right) \right] \quad (14)$$

donde e_τ representa la excentricidad de la elipse correspondiente al tiempo de retardo (*time delay*) τ definido como:

$$e_\tau = \frac{R_0}{c\tau} \quad (15)$$

$$p_\tau(\tau) = \frac{c(2c^2\tau^2 - R_0^2)}{2\pi a_c^2 \sqrt{c^2\tau^2 - R_0^2}} \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{\sqrt{R_0 + c\tau - 2a_c}}{\sqrt{c\tau - R_0 + 2a_c}} + \frac{(2a_c - c\tau)\sqrt{R_0^2 - (c\tau - 2a_c)^2}}{2(c^2\tau^2 - R_0^2)} \right] \quad \forall \tau_0 < \tau \leq \tau_{\max} \quad (16)$$

La Fig. 4 muestra los resultados de teóricos y por simulación de la función de densidad de probabilidad de potencia PDF del TOA, para dos diferentes tipos de *cluster*. Para el caso teórico asumimos el *cluster* tipo circular, es decir $r_{ab} = 1$, y para el caso por simulación asumimos el *cluster* tipo elíptico es decir, $r_{ab} = 0.8$. Para el caso elíptico podemos notar de la Fig. 4 que la PDF del TOA exhibe un comportamiento de

de retardo definido como $A_\tau(\tau)$ de la siguiente forma:

$$A_\tau(\tau) = 2 \int_0^\alpha \frac{1}{2} r_c^2(\phi) d\phi + 2 \int_\alpha^\pi r_m^2(\phi) d(\phi) \quad (12)$$

y sustituyendo la ecuación (8) y la ecuación (10) en la ecuación (12) obtenemos:

$$A_\tau(\tau) = 2 \int_0^\alpha \left[\frac{a_c b_c}{\sqrt{a_c^2 \sin^2 \phi + b_c^2 \cos^2 \phi}} \right]^2 d\phi \quad (13)$$

$$+ \int_\alpha^\pi \left[\frac{c^2 \tau^2 - R_0^2}{2(c\tau - R_0 \cos \phi)} \right]^2 d(\phi)$$

y resolviendo la ecuación (13) en función de α , obtenemos:

Finalmente obtenemos la CDF del TOA sustituyendo la ecuación (14) en la ecuación (4), y luego derivando la CDF del TOA, obtenemos la siguiente expresión de la PDF del TOA para el caso particular cuando el cociente de la elipse $r_{ab} = b/a = 1$.

función exponencial decreciente, similar a los resultados de las mediciones de campos realizados y reportados en Toeltsch *et al.* (2002) y Chong *et al.* (2003), respectivamente. Además podemos observar de la misma Fig. 4 que en la medida que el cociente elíptico r_{ab} disminuye el TOA también disminuye. Esta relación decreciente se cumple para los casos elípticos, siempre que el *cluster* sea limitado por la forma

circular, es decir para el caso donde el cociente de la elipse $r_{ab} = 1$ sea el limite máximo superior de la forma del *cluster*.

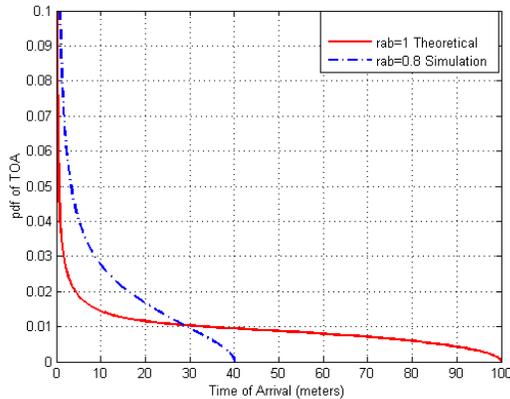


Fig. 4 Función de densidad de probabilidad de potencia PDF del tiempo de llegada TOA para un *cluster* con dos diversos cocientes $r_{ab} = 1$, forma circular (teórico) y $r_{ab} = 0.8$, (por simulación), forma elíptica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados numéricos y su comparación con resultados experimentales

En la literatura científica se han publicado varios resultados experimentales que pueden compararse con los resultados teóricos de la PDF del TOA que hemos derivado en la sección anterior. Por ejemplo, Chong *et al.* (2003) han caracterizado el canal de banda ancha para ambientes urbanos interiores en el dominio angular a través de resultados experimentales obtenidos con un medidor de canal de banda ancha con un arreglo vectorial lineal uniforme de ocho elementos en el receptor (Rx). Los parámetros de los componentes de multitrayectoria (MPCs por sus siglas en inglés), fueron estimados usando un algoritmo en el dominio de la frecuencia de alta resolución (FD-SAGE) y los *clusters* fueron identificados en el dominio espacio-tiempo por medio de un procedimiento no paramétrico. El efecto de los *clusters* presenta dos tipos de espectros de densidad de potencia del canal (PDS)- el intercluster y el intracluster PDS, que presentan un comportamiento exponencial en el dominio

del tiempo de retardo y comportamiento Laplaciano en el dominio angular respectivamente.

En el caso de ambientes urbanos exteriores, Toeltsch *et al.* (2002) utilizaron un equipo de medición de banda ancha con un arreglo de antenas planas para determinar los parámetros de las ondas incidentes en el lado receptor (Rx). Un algoritmo de alta resolución (*esprit* unitario) permite obtener con resolución las componentes MPCs individual en tales racimos y por lo tanto permite un análisis estadístico detallado de las características de la propagación. Por consiguiente hemos hecho la comparación con uno de los resultados experimentales publicados en Toeltsch *et al.* (2002), que se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1 Resultados experimentales en ángulo (grados) y tiempo de retardo (en términos de distancia (m)) de los perfiles del espectro de potencia promedio recibido (PDAPs) por cada *cluster* (Toeltsch *et al.*, 2002).

No. de <i>cluster</i>	Tiempo de retardo (m)	Difusión de retardo (m)	Angulo de llegada α (grados)	Angulo de la difusión $2\Delta\alpha$ (grados)
Sc1	150	60	-8	25
Sc2	45	60	-6	6
Sc3	15	60	0	8
Sc4	210	180	0	8

En la Fig. 5 se ilustra la posición de cada *cluster* basado en las mediciones de los perfiles del espectro de potencia promedio recibido (PDAPs) publicados en Toeltsch *et al.* (2002). La Tabla 2 resume los parámetros usando la solución analítica según lo derivado en detalles en Arias y Mandersson (2005, 2006) para los parámetros del dominio del ángulo. En Fig. 5 demostramos los límites de los PDAPs por cada *cluster* obtenido de los parámetros extraídos de Toeltsch *et al.* (2002) y definidos en Tabla 1.

Como se ilustra en la Fig. 6, podemos describir diversas formas y tamaños de los *clusters* encontrados en los PDAPs que resultan de las

mediciones de campo publicadas en la literatura, como las reportadas en Toeltsch *et al.* (2002), Chong *et al.* (2003) y Yu *et al.* (2005).

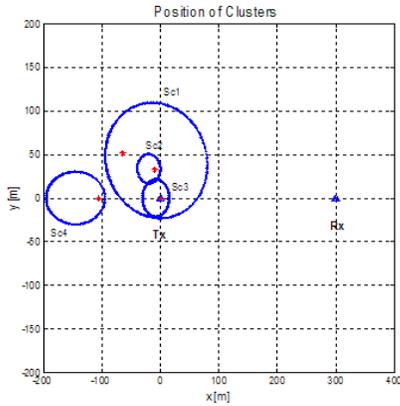


Fig. 5 Posición de cada *cluster* en el eje de coordenadas X-Y obtenidos de los resultados experimentales en Toeltsch *et al.* (2002) de los PDAPs y del método de doble rebote descrito en Arias y Mandersson (2006).

Tabla 2 Parámetros de cuatro *clusters* cuyos valores son extraídos de la Tabla 1: posición (x-y), radio principal (a), y el factor (b/a).

Tx-Rx y No. <i>cluster</i> (Sc)	Posición x-y (m)		Radio Princip al a (m)	Factor $r_{ab} =$ b/a	Dist. Sc- Rx (m)
	x	y			
Tx (BS)	0	0	-	-	-
Rx (MS)	300	0	-	-	-
Sc 1	64.3	51.2	87.6	0.75	367.8
Sc 2	-9.4	32.5	19.7	0.85	311
Sc 3	-7.5	0	23	0.95	307.5
Sc 4	-105	0	50.3	0.6	405

El número promedio de *clusters* y la distribución de los componentes de multitrayectoria (MPCs) dentro de un *cluster* dependen de la resolución del algoritmo utilizado para la estimación de los parámetros. Además, también dependen del tipo

de escenario, (interior o exterior); por ejemplo, en los resultados experimentales de los escenarios interiores, como los estudiados en Chong *et al.* (2003) y Yu *et al.* (2005), se encontraron como máximo nueve y cinco *clusters* respectivamente.

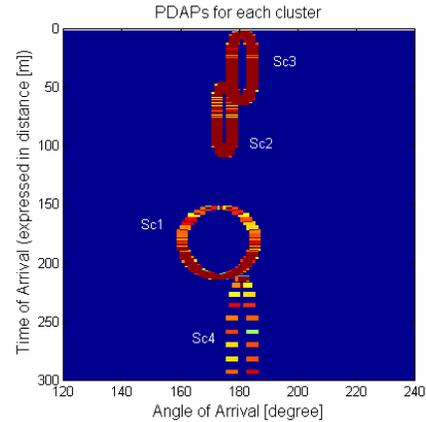


Fig. 6 Bordes de los PDAPs por cada *cluster*: eje horizontal “ α ”, eje vertical “tiempo de retardo” expresado en metros, y $\alpha_{LOS} = 180$ grados.

Por otra parte de resultados experimentales en escenarios al aire libre, (incluyendo las estaciones bases localizadas sobre, en, y debajo del nivel del techo), Toeltsch *et al.* (2002) reportaron como máximo cuatro *clusters*. Además, según lo indicado en Chong *et al.* (2003), el número de *clusters* y (MPCs) detectados también dependen de varios factores tales como la distancia de separación entre el Tx y Rx, y su localización, la disposición física del escenario analizado, así como el rango dinámico del equipo de medición del canal utilizado.

CONCLUSIONES

En este artículo hemos presentado brevemente un modelo de canal basado en geometría para radiocomunicación móvil en ambientes urbanos usando el método por agrupamiento (*clustering*) que luego utilizamos para derivar la función de densidad de probabilidad de potencia (PDF) del tiempo de llegada (TOA). Los valores de los parámetros utilizados provienen de los resultados publicados en la literatura reportados de extensivas mediciones de campo en

diferentes ciudades en áreas urbanas en ambientes internos y externos.

La PDF derivada en este artículo puede ser utilizada para simular la dispersión temporal de los componentes de multitrayectoria agrupados en *clusters* para diferentes condiciones de ambientes urbanos. Además podemos cuantificar parámetros estadísticos de segundo orden, es decir, la difusión de retardo (*delay spread*) para una forma elíptica específica dada por el grupo de señales de multitrayectorias.

REFERENCIAS

- Arias M.R. y B. Mandersson (2006). *Clustering Approach for Geometrically Based Channel Model in Urban Environments*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 05, No. 01, pp. 290-293.
- Arias M.R. y B. Mandersson (2005). *A Generalized Angle Domain Clusters PDF and Its Application in Geometrically Based Channel Models*. In Proceedings of the 5th International Conference on Information, Communications & Signal Processing (ICICS 2005), Vol. 01, pp. 1339-1343.
- Chong C.C., Ch.M. Tan, D.I. Laurenson y S. McLaughlin (2003). *A New Statistical Wideband Spatio-Temporal Channel Model for 5-GHz Band WLAN Systems*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 21, No. 02, pp. 139-150.
- Ertel R.B. y J.H. Reed (1999). *Angle and Time of Arrival Statistics for Circular and Elliptical Scattering Models*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 17, No. 11, pp. 1829-1840.
- Fuhl J., A.F. Molisch y E. Boneck (1998). *Unified Channel Model for Mobile Radio Systems with Smart Antennas*. In IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, Vol. 145, No. 01, pp. 32-41.
- Janaswamy R. (2002). *Angle and Time of Arrival Statistics for the Gaussian Scatter Density Model*. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 01 No. 03, pp. 488-497.
- Kermoal J.P., L. Schumaker, K.I. Pedersen, P.E. Mogensen y F. Frederiksen (2002). *A Stochastic MIMO Radio Model with Experimental Validation*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No. 06, pp. 1211-1226.
- Liberti J.C. y T.S. Rappaport (1999). *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Molisch A.F. (2004). *A Generic Model for MIMO Wireless Propagation Channels in Macro-and Microcells*. IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 52, No. 01, pp. 61-71.
- Pedersen K.I., P.E. Mogensen y B.H. Fleury. (2000). *A Stochastic Model of the Temporal and Azimuthal Dispersion seen at the Base Station in Outdoor Propagation Environments*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 49, No. 02, pp. 437-447.
- Toeltsch M., J. Laurilla, K. Kalliola, A.F. Molisch, P. Vainikainen y E. Bonek (2002). *Statistical Characterization of Urban Spatial Radio Channels*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No. 03, pp. 539-549.
- Yu K., Q. Li y M. Ho (2005). *Measurement Investigation of Tap and Cluster Angular Spreads at 5.2 GHz*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 07, pp. 2156-2160.
- Zhao X., J. Kivinen, P. Vainikainen y K. Skog (2002). *Propagation Characteristics for Wideband Outdoor Mobile Communications at 5.3 GHz*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No. 03, pp. 507-514.



Marvin Arias obtuvo su título de técnico Ingeniero Eléctrico y de Ingeniero Electrónico en 1987 y 1993 respectivamente ambos de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). En el año 2004, obtuvo el grado académico de LicEng en Procesamiento de Señales en la Universidad de Lund, Suecia. Actualmente está finalizando sus estudios de doctorado (PhD) en el Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional (IPN), México D.F., México. Sus tópicos de investigación incluyen: radio propagación, modelos de canal para sistemas de radiocomunicación móvil y técnicas de procesamiento digital de señales y sus aplicaciones en la industria. Profesor Titular, Facultad de Electrotecnia y Computación, Universidad Nacional de Ingeniería.