
ESTIMACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CANAL DE COMUNICACIÓN WIMAX

Víctor Hinostraza y Guillermo César López Caden
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Resumen

Uno de los sistemas de comunicación de próxima generación más promisorios es el estándar IEEE 802.16e (WiMAX). Este trabajo trata sobre la simulación en computadora de un sistema con el estándar WiMAX, se describen; la propagación de las señales a través del aire y la caracterización del canal de comunicación inalámbrica; el sistema WiMAX; y se presenta el sistema utilizado para realizar las simulaciones, los circuitos utilizados y los resultados de las mismas. Los resultados se enfocan en el efecto de varios parámetros en la probabilidad de error (BER y el FER) del sistema.

Palabras clave: Canal de comunicación, propagación de señales, BER, FER, WiMAX

Introducción

WiMAX es un sistema de comunicación que permite a dispositivos móviles conectarse a redes de datos de alta velocidad (Internet), usando ondas de radio como medios de transmisión, con transmisión de datos que pueden llegar a los 120 Mbps (WiMAX fijo, IEEE802.16d) o hasta 63 Mbps (WiMAX Móvil, IEEE802.16e/m). Las bandas de frecuencia en VHF, UHF y otras frecuencias arriba de éstas, son comúnmente usadas en aplicaciones para comunicaciones inalámbricas; el funcionamiento de estas señales está dominado por una serie de procesos y mecanismos tales como la reflexión, la difracción, desvanecimiento,

etc. Estos efectos son causados normalmente por características ambientales cercanas a la MS en algunos casos, también se puede presentar en la otra parte del enlace, la BS o AP, puede estar rodeada por algunas características locales que afectan las características de propagación.

El comportamiento del canal de comunicación inalámbrico puede ser descrito en términos de las funciones del sistema que dan una percepción de los mecanismos físicos los cuales dominan el comportamiento del canal. En canales de comunicación reales, las ondas de radio recibidas llegan a través de varias

trayectorias simultáneamente, formando una situación multi-trayectoria. Estas ondas se combinan vectorialmente para dar una señal oscilatoria resultante; las variaciones de amplitud de la señal son conocidas como el efecto de desvanecimiento.

En un modelo ideal de comunicaciones inalámbricas, la señal que se envía por el transmisor llegara al receptor por un sólo camino, por línea de vista o LOS; en la realidad esto no es cierto, una vez que la señal a transmitir deja la fuente ésta viaja a través de caminos múltiples y llega al receptor después de pasar por varios fenómenos; reflexión, refracción/difracción, dispersión o línea de vista o una combinación de estos. A esta diversidad de distintos trayectos se le llama propagación multi-trayectoria.

Generalmente cada camino que toma la señal tiene características muy diferentes lo que provoca que al receptor lleguen copias de la señal con distintas amplitudes, fases y retardos. Una vez que el receptor recibe todas esas copias de la misma señal realiza una suma vectorial, el resultado de esta suma es un efecto denominado desvanecimiento. Esta suma vectorial puede dar un resultado positivo, lo que nos indica que coinciden las fases de todas las señales y la señal resultante es de mayor potencia que

todas las señales recibidas. O la suma vectorial puede dar un resultado negativo, esto significa que las fases de las señales recibidas no coinciden y la señal resultante es de una potencia baja menor que la de las señales recibidas.

Existen dos tipos de desvanecimiento: Desvanecimiento a pequeña escala: este tipo de desvanecimiento es el resultado de la suma algebraica provocado por el efecto multi-trayectoria. Sus variaciones de potencia son súbitas, pueden ser de hasta 30dB en un movimiento de unas pocas longitudes de onda. Desvanecimiento de gran escala: este desvanecimiento es provocado por la antena receptora, y es el resultado de la pérdida de potencia provocado por la distancia. Uno de los mayores problemas que enfrentan las comunicaciones inalámbricas móviles es el desvanecimiento por multi-trayectoria. Las ecuaciones para evaluar el medio ambiente del radio son las que veremos a continuación.

$$s_0(t) = a_0 e^{j(\omega_0 t + \phi_0)} \quad (1)$$

Donde la frecuencia angular ω_0 es igual a $2\pi f_0$; f_0 es la frecuencia transmitida. La señal transmitida $s_0(t)$ proviene de N trayectorias, las cuales se pueden expresar con la siguiente ecuación:

$$s(t) = \sum_{i=1}^N a_i s_0(t - t_i) \quad (2)$$

El tiempo de propagación para la i -ésima trayectoria es:

$$\tau_i = \bar{\tau} + \Delta\tau_i \quad (3)$$

Donde $\bar{\tau}$ es el tiempo de propagación promedio y $\Delta\tau_i$ es el incremento debido a las variaciones del canal. Lo que nos da:

$$s(t) = \alpha_0 \left[\sum_{i=1}^N \alpha_0 e^{j(2\pi f_c \Delta\tau_i)} \right] \quad (4)$$

Esta ecuación aplica cuando la antena no se encuentra en movimiento. Cuando el receptor se encuentra en movimiento tenemos:

$$s(t) = \alpha_0 e^{j(\omega_c t + \phi_0 - \beta v_r \cos \theta)} \quad (5)$$

Donde $\beta = 2\pi/\lambda$, y λ la longitud de onda de la señal. El término adicional es debido el efecto *Doppler*, este efecto tiene una frecuencia de:

$$fD = fm \cos \theta \quad (6)$$

Donde $fm = V/\lambda$, es la máxima frecuencia *Doppler*; la frecuencia puede ser positiva o negativa, eso va a depender de la dirección relativa del móvil con respecto al transmisor con respecto al transmisor.

Si colocamos una antena transmisora en el espacio libre, alejado de la tierra y libre de obstrucciones, si tiene una ganancia G_T en dirección de la antena receptora, la densidad de potencia a una distancia d en la dirección elegida es:

$$W = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \quad (7)$$

Donde P_T es la potencia de transmisión. La potencia disponible en la antena receptora, la cual tiene un área efectiva A es:

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} A = \frac{P_R G_T}{4\pi d^2} \left(\frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \right) A \quad (8)$$

donde G_R es la ganancia en la antena receptora. De donde obtenemos

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (9)$$

esta ecuación muestra que la propagación de espacio libre sigue la ley inversa cuadrada con rango d , así la potencia recibida cae 6dB cuando el rango se dobla (o se reduce 20dB por década) [Parsons, 2000].

La pérdida de trayectoria y nivel de la señal es causado por la potencia irradiada por el transmisor así como por los efectos de la propagación del canal. Los modelos de pérdida de trayectoria generalmente asumen que es el mismo en una distancia dada entre receptor y transmisor. Las variaciones de la señal debido a la pérdida de trayectoria sobre distancias relativamente largas son denominadas como efectos de propagación a gran escala; y las variaciones por multi-trayectoria sobre distancias cortas son comúnmente denominadas efectos de propagación de pequeña escala.

Pérdida de trayectoria, sombreado y multi-trayectoria
 Pérdida de trayectoria y sombreado
 Pérdida de trayectoria

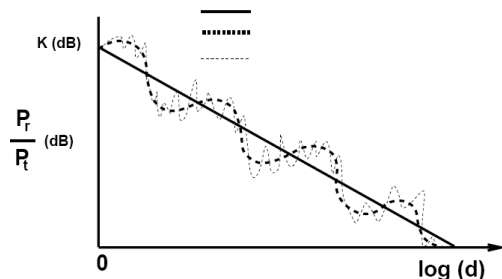


Figura 1. Pérdida de trayectoria contra distancia.

Suponga que se transmite una señal $s(t)$ con potencia P_t a través de un canal dado, con su señal recibida correspondiente $r(t)$ de potencia P_r . Se define la pérdida de trayectoria lineal como la relación entre la potencia de la señal transmitida entre la potencia de la señal recibida [Goldsmith, 2005].

$$P_L = \frac{P_t}{P_r} = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} \text{ dB} \quad (10)$$

La pérdida de trayectoria en espacio libre, es un modelo de canal mejor conocido como LOS, la señal recibida es [Goldsmith, 2009]:

$$r(t) = \Re \left\{ \frac{u(t) \sqrt{G_t} \lambda e^{j2\pi d / \lambda}}{4\pi d} \right\} e^{j(2\pi f_c t + \phi_0)} \quad (11)$$

con potencia recibida:

$$P_r = P_t \left[\frac{\sqrt{G_t} \lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad (12)$$

la pérdida de trayectoria en espacio libre:

$$P_L \text{ dB} = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} = -10 \log_{10} \left[\frac{\sqrt{G_t} \lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad (13)$$

En este modelo, la potencia cae proporcionalmente a la relación de la longitud de onda sobre la distancia al cuadrado. La potencia cae proporcionalmente a la ganancia neta de la antena G_t . Este modelo no es preciso en todos los ambientes. En el modelo de trazado de rayo, se asume un número finito de reflectores con ubicación y propiedades dieléctricas conocidas. Los modelos más simples sólo determinan las reflexiones. La difracción y la dispersión pueden ser incluidas.

El modelo de dos rayos cuando una sola reflexión domina el efecto multi-trayectoria, es decir, la señal recibida consiste en la componente LOS y una componente reflejada.

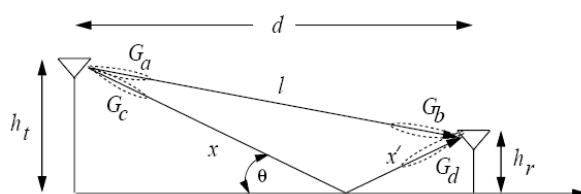


Figura 2. Modelo de dos rayos

La señal recibida por el modelo de dos rayos es:

$$r_{2rayos}(t) = \Re \left\{ \frac{\lambda}{4\pi} \left[\frac{\sqrt{G_1} u(t) e^{-j2\pi l/\lambda}}{i} + \frac{R \sqrt{G_1} u(t-\tau) e^{-j2\pi(x+x')/\lambda}}{x+x'} \right] e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (14)$$

Donde $\tau = (x + x' - l)/c$ es el retardo de tiempo de la reflexión relativa de la tierra respecto al rayo LOS, y la potencia recibida es:

$$P_r \approx P_t \left[\frac{\sqrt{G_1} h_t h_r}{d^2} \right]^2 \quad (15)$$

En el trazado de rayo general se incorporan todas las componentes de la señal (reflexiones, dispersión y difracción); los rayos reflejados tienen una caída de potencia proporcional a d^2 por el modelo de pérdida de trayectoria en espacio libre. La mayoría de los paquetes computacionales para simulación de canal para ambientes interiores/exteriores utiliza la pérdida de trayectoria por trazado de rayos general [Goldsmith, 2005].

El desvanecimiento puede ser dividido en dos componentes, el desvanecimiento lento y el desvanecimiento rápido. El desvanecimiento rápido o a

pequeña escala es debido al efecto multi-trayectoria que provoca a la señal variación en magnitudes y fases. El desvanecimiento lento de gran escala, es generado por los cambios de señal debido al cambio de distancia entre el transmisor y el receptor. Generalmente, el receptor no tiene la capacidad de detectar componentes en cuadratura, tiene la capacidad de responder a la envolvente y/o la fase de la señal compleja $E(t)$. La envolvente $r(t)$ de la señal compleja $E(t)$ esta especificada por:

$$r(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} \quad (16)$$

Y la PDF de la señal recibida $r(t)$ es:

$$P_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (17)$$

Que es la función de PDF de Rayleigh, donde σ^2 es la potencia media y $\frac{r^2}{2}$ es la potencia de la señal, la probabilidad de que la envolvente no exceda un valor especificado R esta dado por:

$$\text{prob} [r \leq R] = P_r(r) = \int_0^R P_r(r) dr = 1 - e^{-\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (18)$$

Por otro lado, existen algunas condiciones en las cuales hay un componente *LOS* o un componente dominante. Aquí las condiciones de propagación varían un poco de las condiciones descritas en las pasadas secciones. La PDF conjunta del envolvente y la fase de la señal recibida que concuerdan con la situación descrita arriba en la cual hay un componente dominante r_s es

$$p(r, \theta) = \frac{r}{2\pi\sigma^2} e^{\left[r^2 + r_s^2 - \frac{2rr_s \cos\theta}{\sigma^2} \right]} \quad (19)$$

La PDF de la envolvente es el resultado de integrar en θ .

$$p(r, \theta) = \frac{r}{2\pi\sigma^2} e^{\left[\frac{r^2 + r_s^2}{2\sigma^2} \right]} I_0 \left[\frac{rr_s}{\sigma^2} \right] \quad (20)$$

Donde $I_0[.]$ es la función de *Bessel* modificada. Esta ecuación es conocida como la distribución *Rician*; a menudo esta distribución se describe relacionada a un parámetro K y descrita como:

$$K(dB) = 10 \log \left(\frac{r_s^2}{2\sigma^2} \right) \quad (21)$$

Simulación del sistema WiMAX

El software usado para simulación del proyecto fue el ADS (Advanced Design System) de Agilent Technologies. Este software tiene todos los componentes para el análisis, caracterización, simulación y prueba de componentes y sistemas en altas

frecuencias. ADS es el software líder en diseño electrónico automatizado (*EDA*) para RF, micro-ondas y aplicaciones de integración de señales [23]. Para aplicaciones WiMAX, LTE, enlaces de datos de altas velocidades (varios giga bits por segundo), radar y satélite, ADS provee diseño y verificación basados en estándares con librerías inalámbricas y co-simulación de sistemas de circuitos electromagnéticos en una sola plataforma. ADS es pionero en la industria *EDA* para RF con las tecnologías más innovadoras y exitosas comercialmente.

Los bloques de sistema y parámetros usados en la simulación del sistema WiMAX, son todos partes componentes de ADS. Para la construcción de un sistema ADS permite agregar bloques de módulos, sub-sistemas y componentes según se requiere. Cada uno de estos módulos puede tener a su vez sub-bloques y componentes dentro de sí mismos. De tal manera que se puede iniciar el análisis, diseño y la simulación con partes pequeñas del sistema e ir agregando partes y sub-partes según se requiera hasta formar el sistema completo. Esto permite probar los sub-sistemas por separado y luego probar el sistema completo. Enseguida se describen algunas de estas partes y sub-sistemas y se

proporciona una explicación breve de sus parámetros principales.

Los modelos de canal pueden ser clasificados en dos categorías, estadístico y empírico.

Los modelos empíricos están basados en mediciones realizadas en ambientes reales, mientras que los modelos estadísticos estiman sus características del canal a través de relaciones matemáticas. Para describir un sistema *WiMAX*, generalmente son usados dos modelos empíricos: el modelo de canal *SUI*, el cual es usado para la simulación de los sistemas *WiMAX* fijo (IEEE802.16-2004); el modelo de canal *ITU-R*, el cual fue desarrollado de acuerdo a la recomendación *ITU-R M.1225*, es usado para la simulación de los sistemas *WiMAX* Móvil (IEEE802.16e). Este último modelo de canal, inicialmente fue desarrollado para las tecnologías IMT-2000, es usado para modelar los sistemas *WiMAX* Móvil dado que adopto esta tecnología en noviembre de 2007 como una de las tecnologías IMT-2000. El modelo de canal de banda ancha ITU es descrito en base a un modelo *tapped delay line*, con un número máximo de 6 *taps*. En [30] se especifican 3 ambientes diferentes de prueba: interiores, pedestre y vehicular, especifica dos diferentes perfiles de retardo extendido para

cada uno de los ambientes de prueba; perfil de retardo extendido bajo (se denota con A), retardo extendido RMS de hasta 100 ns; perfil de retardo extendido medio (se denota con B), retardo extendido RMS de unos cientos de nano segundos.

Aunque *WiMAX* Forum recomienda usar solo dos de los seis modelos, los cuales son Pedestre B y Vehicular A. En las 3 simulaciones realizadas se utilizaron 3 sistemas, canal *AWGN*, modelo de canal *ITU-R* SISO y modelo de canal *ITU-R* MIMO. La figura 3 muestra el modelo utilizados en las simulaciones realizadas para este trabajo.

Basándonos en los resultados de la simulación mostrados en la figura 4, podemos observar que podemos usar una modulación mayor (por ejemplo 64-QAM) cuando la relación E_b/N_0 aumenta, esto representa realizar una transmisión de bit mayor por símbolo (por ejemplo, 6 bits por símbolo para una modulación 64-QAM) [29] lo que nos da como resultado una velocidad de transmisión de datos mayor, la desventaja es que esta modulación es más susceptible a la interferencia. Este tipo de modulación es más utilizado cuando el usuario esta cerca de la *BS*. Por otro lado, la modulación QPSK nos permite una transmisión de datos más baja que la

modulación 64-QAM, teniendo solo 2 bits por símbolo, pero es más robusta a la interferencia; necesita solo un

$E_b/N_0 = 7$ para alcanzar un $BER = 10^{-6}$, el cual es suficiente para tener una aplicación VoIP.

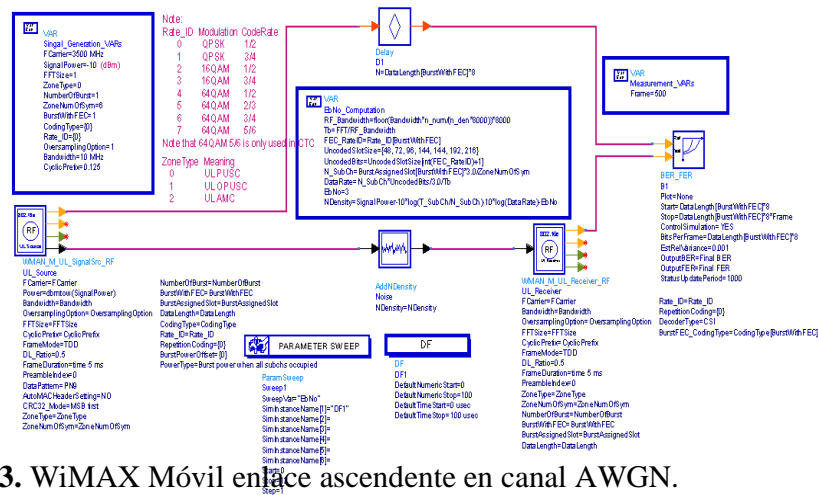


Figura 3. WiMAX Móvil enlace ascendente en canal AWGN.

En la tabla 1 se muestran los parámetros de la simulación.

Tabla 1. Parámetros de simulación para canal AWGN

Parametro	Valor
Frecuencia de Portadora	3500 MHz
Tipo de Zona	UL PUSC
Tamaño de FFT	1024
Ancho de Banda	10MHz
Duración de la trama	5 ms
Opción de Sobre muestreo	Ratio 2
Prefijo ciclico	1/8
Longitud del paquete en una trama (longitud de datos)	410 Bytes
Tipo de codificación	Codificación Convolutacional (CC)
Modulación	QPSK 1/2, QPSK 3/4, 16QAM 1/2, 16QAM 2/3, 64QAM 1/4, 64 QAM 5/6
Tipo de Decodificador	CSI

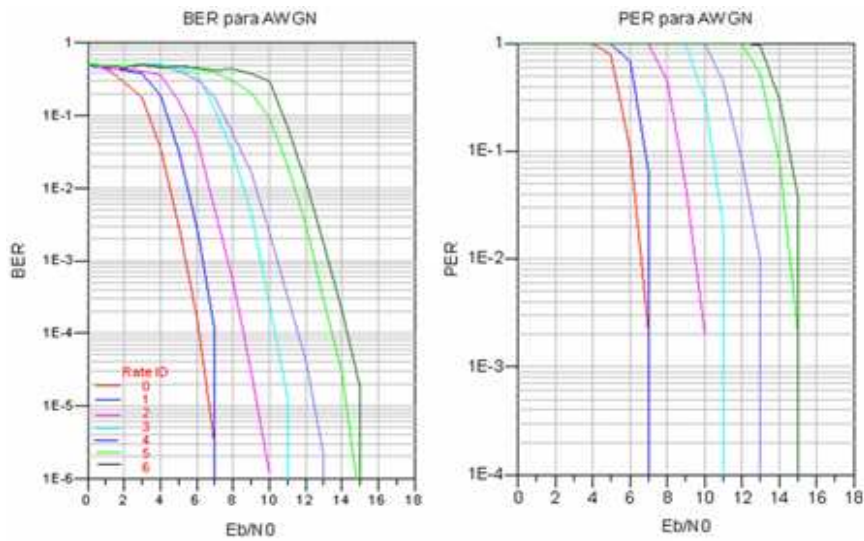


Figura 4. Resultados de simulación para canal AWGN.

WiMAX Móvil DL SISO en canal ITU Pedestre B con desvanecimiento.

Para llevar a cabo la simulación, se utilizó el modelo citado en la figura 5, similar al utilizado en la simulación descrita anteriormente, agregando, al modelo

utilizado en la simulación 1, el modelo de canal ITU-R, considerando un movilidad pedestre considerando una velocidad de 3km/h; a continuación los parámetros de simulación son similares a los mostrados en la tabla 1.

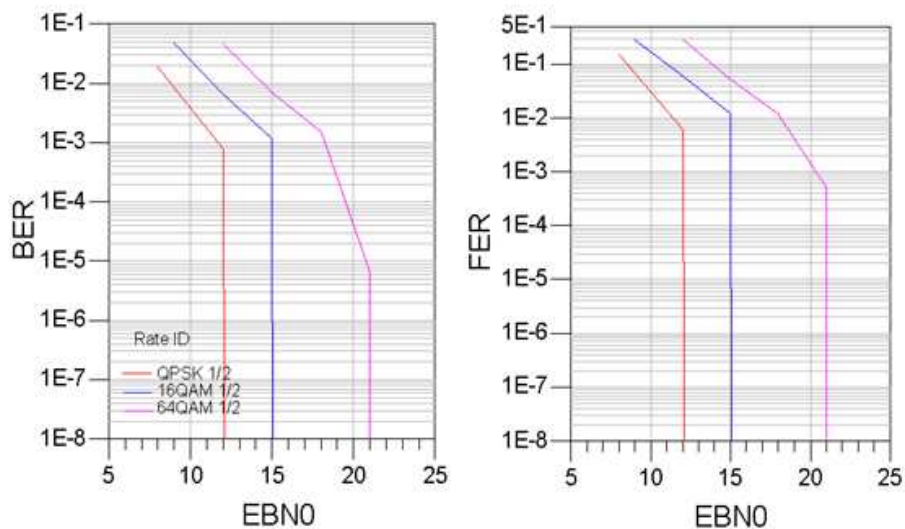


Figura 5. Graficas BER y FER para canal ITU Pedestre B

En la figura 6, se muestran dos imágenes con tres gráficas en una misma figura, estas tres graficas corresponden a tres tipos de modulación a los cuales se somete el sistema, las modulaciones son; QPSK, 16-QAM y 64-QAM. El eje coordenado X esta en escala logarítmica y representa el BER (la relación de bit en error) o el PER o FER que son la misma relación pero para la trama completa o un paquete de datos. El eje coordenado Y representa la potencia relativa de cada bit (E_b/N_0), este valor resulta de dividir la potencia de total entre la velocidad en bits y también está en una escala logarítmica (decibeles), este es un parámetro

importante para comunicaciones digitales y puede considerado como SNR normalizado, es muy útil cuando se compara el desempeño del BER para diferentes esquemas de modulación. Esta graficas se pueden interpretar de la siguiente manera; Entre más rápido caiga la pendiente de la grafica mejor., es decir, a menor valor de BER , menor probabilidad de tener un error. O alternativamente si tenemos menor a misma probabilidad de error, menos potencia es necesaria para procesar la señal y posiblemente podemos tener mayor velocidad o más alcance.

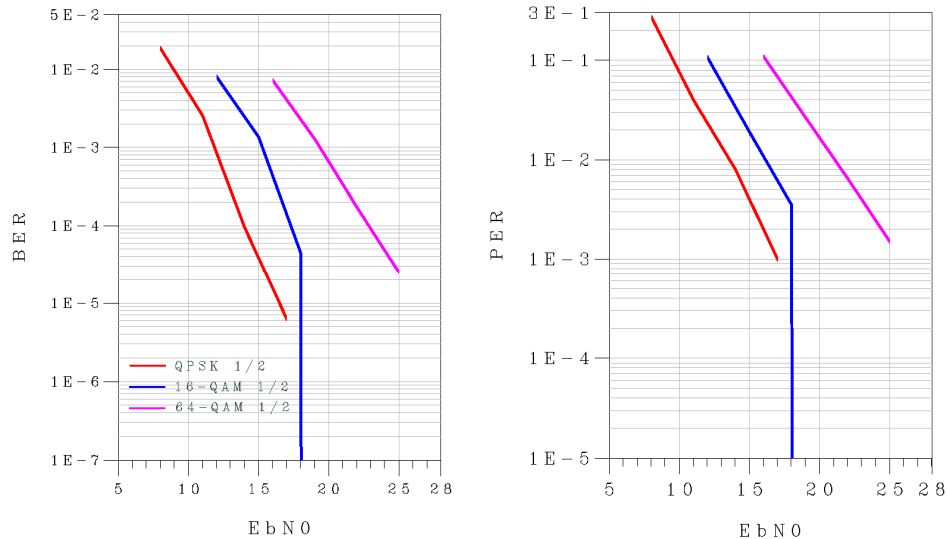


Figura 6. Graficas BER y FER para canal ITU vehicular.

En la figura 6 se observa que por lo general al usar modulación de menor nivel, por ejemplo QPSK, se tiene una menor

probabilidad de error, con la misma potencia. podemos observar que para llegar a un BER de aproximadamente 10^{-5}

se necesita un $E_b/N_0 \cong 17dB$, en el caso de una modulación QPSK $\frac{1}{2}$, en comparación a los 7dB que se necesitan en un canal con AWGN, de acuerdo a la figura 7.16; de la misma manera, para alcanzar esa misma especificación de BER, utilizando una modulación 16-QAM es necesario contar con un $E_b/N_0 \cong 18dB$ y un $E_b/N_0 > 25dB$ para una modulación 64QAM $\frac{1}{2}$, estos resultados son mayores que los obtenidos en la simulación con canal AWGN.

WiMAX Móvil DL SISO en canal ITU Vehicular A con desvanecimiento

La figura 7 nos muestra el modelo utilizado para la tercera simulación, utilizando un canal de comunicación WiMAX SISO, cabe mencionar que el modelo es muy similar al utilizado para AWGN, con la diferencia que se agrega el canal de desvanecimiento. El canal con desvanecimiento utilizado en esta simulación está basado en el ITU-R M.1225 soportando tanto ambiente vehicular como pedestre. También, es posible modificar un modo específico del canal de desvanecimiento por medio de los parámetros *Delay*, *Power* y *Ricean Factor*.

En los resultados de la simulación, de canal *WIMAX SISO* con movilidad vehicular a 60 km/h, comparamos estos resultados con los

obtenidos en la simulación anterior observamos que con un $E_b/N_0 \cong 17dB$, podía alcanzar un $BER = 10^{-5}$, en la simulación actual se alcanza un $BER \cong 10^{-4}$, para una modulación QPSK $\frac{1}{2}$, para alcanzar la misma tasa de error con usando modulación 16-QAM $\frac{1}{2}$ es necesario incrementar el E_b/N_0 en aproximadamente $4dB$ y para una modulación 64-QAM $\frac{1}{2}$ incrementar el E_b/N_0 en mas de $10dB$, lo que nos indica que este ultimo tipo de modulación es más eficaz cuando la estación móvil se encuentra cerca de la estación base.

WiMAX Móvil DL en canal ITU MIMO Vehicular A con desvanecimiento

Analizamos el comportamiento del canal MIMO utilizando los parámetros mostrados en la tabla1, después se realizo una modificación a los parámetros, cambiando el tipo de codificación, originalmente propusimos código convolucional (CC), a turbo código convolucional (CTC), para realizar comparaciones entre estas dos utilizando un mismo modelo MIMO.

Los resultados de esta simulación nos permiten observar que el comportamiento del canal tiene una pequeña mejora cuando cambiamos en un esquema multi-antenas el tipo de codificación (de CC a CTC), utilizando una modulación QPSK $\frac{1}{2}$ hay una

diferencia de aproximadamente 1/2 dB siendo mejor CTC, en cambio para 16-QAM 1/2 el

E_b/N_0 es similar, pero en 64-QAM 1/2 CTC se encuentra 1dB delante de CC.

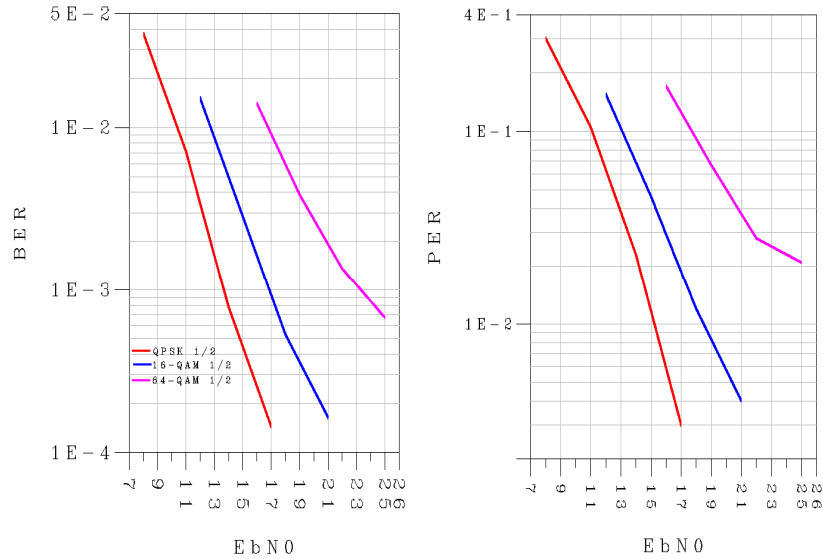


Figura 7. Graficas BER y FER para canal ITU Vehicular A.

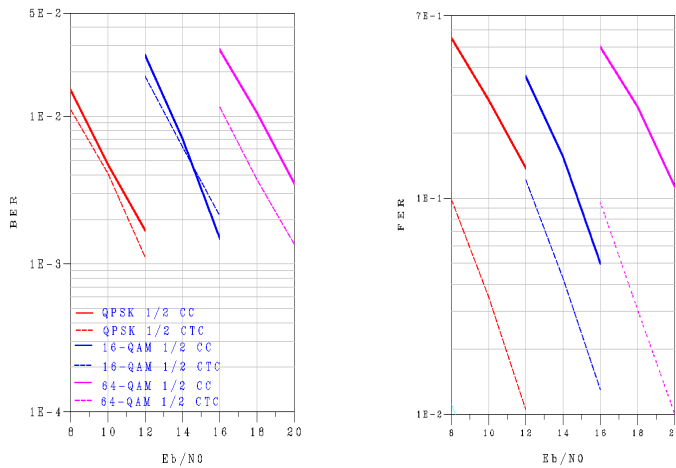


Figura 8. Graficas BER y FER para canal ITU MIMO vehicular A.

Conclusiones

Se realizaron 5 simulaciones utilizando 3 diferentes sistemas WiMAX móvil, con canales AWGN, ITU-R SISO e ITU-R

MIMO, modificando las características del sistema, basándonos en los perfiles de movilidad pedestre B (a 3 km/h) y vehicular A (a 60 km/h). En los resultados de las

simulaciones se puede observar que el sistema que tiene menor E_b/N_0 para un menor BER es el que solo se involucra AWGN en el canal de comunicación; en un canal ITU SISO un perfil de movilidad pedestre tiene mejor comportamiento que uno de movilidad vehicular; se realizaron simulaciones en un canal MIMO para movilidad vehicular, teniendo como resultado un mejor desempeño del sistema modificando el tipo de codificación de CC a CTC. Podemos considerar el problema de cómo mejorar el desempeño de cada uno de los esquemas de modulación uno de los ambientes propuestos, es decir, mejorar el BER vs E_b/N_0 para, por ejemplo, un canal móvil utilizando múltiples antenas, modificando los parámetros de uno de los sistemas expuestos en este documento, al igual podemos considerar una campaña de mediciones en varios ambientes para colaborar con los resultados aquí descritos.

Referencias

Advanced design systems key features, (en línea) fecha de consulta: noviembre de 2009, URL:
<http://www.home.agilent.com/agilent/editorial.jsp?cc=US&lc=eng&cckey=1608816&nid=-34346.0.00&id=1608816>

Agilent Advanced Design System 2008 - Mobile WiMAX Design Library, August 2008.

AddNDensity, (en línea) fecha de consulta: noviembre de 2009, URL:

<http://edocs.soco.agilent.com/display/ads2008U1/AddNDensity>

Quintero, A. G. 2009. *Modulaciones M-ARIAS*, (en línea) fecha de consulta: octubre de 2009, URL:

http://logos.upb.edu.co/~alexander.galvis/index_archivos/ModDig_M-arias.pdf

Goldsmith, Andrea 2005. *Fundamentals of wireless communications*, USA, Cambridge University Press, p.196

Goldsmith, Andrea 2009. *Signal Propagations. Path Loss Model*, (en línea) fecha de consulta: octubre de 2009, URL:
http://www.stanford.edu/class/ee359/lecture09/lecture2_sum.pdf

BER_FER, (en línea) fecha de consulta: noviembre de 2009, URL:

<http://edocs.soco.agilent.com/display/ads2008U2/BER+FER>

Sklar, Bernard 2001. *Digital communications, Fundamentals and applications*, New Jersey, USA, Prentice Hall, p. 57.

Vucetic, Branka 2004. *Space-time coding*, England, Ed. Wiley, p. 117.

Delay, (en línea) fecha de consulta: noviembre de 2009, URL:

<http://edocs.soco.agilent.com/display/ads2008U1/Delay>

Documento ITU, 1997, Rec.ITU-R M.1225 – *Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000*, ITU-R.

Federation of American Scientists, *Frequency modulation*, (en línea) fecha de consulta: octubre de 2009, URL: <http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/FM.htm>

Shin, Hyundong 2004. On the capacity of wireless MIMO channels, Massachusetts USA, *IEICE Transactions*, Vol. E87-B, No. 3, Ed. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, p. 671-677.

IEEE Standard 802.16-2004. *Part 16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access system*. October 2004.

Andrews, Jeffrey G. 2007. *Fundamentals of WiMAX*, Ed. Prentice Hall, New Jersey USA.

Parsons, John 2000. *The mobile radio propagation channel*, England, Ed. John Wiley and Sons, p.16.

Kamran, Etemad 2008. Overview of Mobile WiMAX Technology and Evolution, *IEEE communications magazine*, Vol. 46, No. 3, Ontario Ca.,

Katz, D. Marcos 2009. *WiMAX evolution emerging technologies and applications*, Ed. Wiley, Torquay UK,

Faúndez, Zanuy, Marcos 2001. *Sistemas de comunicación*, Marcombo, Barcelona España, p. 155.

Jankiraman, Mohinder 2004. *Space-time codes and MIMO systems*, Ed. Artec House, Massachusetts USA, p.200.

Colda, Rebecca M. 2009. Transmission Performance of Mobile WiMAX Pedestrian Environments, *17th Telecommunications forum TELFOR 2009*.

Vaughan. Rodney 2003. *Channel propagations and antennas for mobile communications*, United Kingdom, The Institution of Electrical Engineers, p. 205.

Textos científicos, *Modulación de amplitud*, (en línea) fecha de consulta: octubre de 2009, URL: <http://www.textoscientificos.com/redes/modulacion/amplitud>

Textos científicos, *Modulation en fase*, (en línea) fecha de consulta: octubre de 2009, URL: <http://www.textoscientificos.com/redes/modulacion/fase>

Rappaport, Theodore S. 2002. *Wireless communications principles and practice*, New Jersey USA, Ed. Prentice Hall, p.263, 264, 313, 314.

VAR, (en línea) fecha de consulta: noviembre de 2009, URL:

<http://edocs.soco.agilent.com/display/ads2008U1/VAR+%28Variables+and+Equations+Component%29>

Hinostrza, Victor. 2009. *Unidad IV. Comunicaciones inalámbricas*, (en línea) fecha de consulta: octubre 2009, URL:

<http://docentes.uacj.mx/vhinostr/Nuevo%20Formato/CLASES/ComII.htm>

WiMAX Forum, August 2006, *Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation*”, USA.

WiMAX Network Reference Model, (en línea) fecha de consulta: 19 de noviembre de 2009, disponible en:

http://www.juniper.net/techpubs/software/aaa_802/sbr/sbr70/sw-sbr-admin/html/WiMAX_Overview3.html

CULCyT