

SOFTWARE DE SIMULACIÓN DE CANALES INFRARROJOS EN AMBIENTES DE INTERIOR

S. RODRÍGUEZ, B. R. MENDOZA, O. GONZÁLEZ Y A. AYALA
*Departamento de Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas.
Universidad de La Laguna. España.
srdguezp@ull.es, bmendoza@ull.es, oghdez@ull.es, aayala@ull.es*

En este trabajo se presenta un software de simulación del canal infrarrojo (IR) en ambientes de interior. En general, permite obtener la respuesta al impulso del canal IR a partir de un fichero CAD de definición del entorno (escena 3D) donde se especifica, además de la geometría del entorno, los emisores y receptores presentes en el enlace y las características de reflexión de las superficies. El software puede ser utilizado en materias relacionadas con el estudio de sistemas de comunicaciones analógicas y digitales, y en especial con sistemas de comunicaciones ópticas no guiadas.

Palabras clave: software, simulación, canal, infrarrojo.

1. Introducción

El interés pedagógico del software de simulación de canales ópticos no guiados en la región espectral del infrarrojo (IR) que se presenta en este trabajo, permite al alumno abordar el estudio y comprensión de las características principales del canal IR. El software de simulación, basado en un algoritmo que utiliza técnicas de trazado de rayos y el método de Monte Carlo, permite obtener la respuesta al impulso del canal IR, o alternativamente, su respuesta en frecuencia. Todo ello, a partir de un fichero CAD (*Computer Aided Design*) de definición del entorno (escena 3D) donde se especifica, además de la geometría del entorno, las características de reflexión de los materiales que conforman sus superficies, así como la localización y características de los emisores y receptores utilizados para establecer el enlace. En la actualidad, el software de simulación desarrollado es utilizado por alumnos que cursan las materias de Sistemas de Comunicaciones Analógicas y Digitales, Comunicaciones Ópticas y Comunicaciones Ópticas no Guiadas, recogidas en el plan de estudios del Master en Ingeniería Electrónica que la Universidad de La Laguna oferta en sus estudios oficiales de posgrado.

La región espectral infrarroja ofrece virtualmente un ancho de banda ilimitado no sujeto a regulación, lo cual constituye una de las ventajas significativas que presenta el canal óptico IR no guiado frente al de radiofrecuencia (RF) en interiores, aunque no está exento de desventajas [1]. El canal IR comprende el espacio físico limitado por fronteras opacas a la radiación en las longitudes de onda del infrarrojo. El confinamiento se debe a las paredes, el techo y el suelo de la habitación donde se origina la radiación. Estas superficies, aunque no dejan pasar la radiación a habitaciones contiguas, dan lugar a efectos de reflexión y dispersión de dicha radiación. Este confinamiento le proporciona cierta privacidad y evita la interferencia entre enlaces operando en diferentes habitaciones. El canal está sujeto a sombras provocadas por objetos fijos o móviles y por el mobiliario de la habitación. A diferencia del de radiofrecuencia (RF), no se presentan desvanecimientos por multitrayectoria (*multipath fading*), dada la dimensión espacial del detector con respecto a la longitud de onda de la radiación, sin embargo, si está sujeto a dispersión temporal por multitrayectoria (*multipath dispersion*).

Como se comentó con anterioridad, el canal IR no está exento de desventajas. El confinamiento hace que la transmisión entre habitaciones requiera la instalación de cableado y la localización de puntos de acceso. La iluminación, debida a la luz solar y a las lámparas incandescentes y fluorescentes, compone una importante fuente de ruido que contribuye a degradar las prestaciones del canal. Además, presenta elevadas pérdidas por propagación (*Path Loss*, PL) y está limitado en potencia por condiciones de seguridad al ojo humano. En definitiva, el uso de uno u otro canal depende principalmente de la aplicación que vaya a tener el sistema de comunicación. El canal de RF es adecuado para aplicaciones de largo alcance donde se requiere gran movilidad por parte del usuario y que la radiación atraviese obstáculos y paredes, mientras que el infrarrojo conviene ser usado en aplicaciones de corto alcance donde se requiere alta capacidad y velocidad de transmisión, bajo coste y receptores de baja complejidad.

En definitiva, el software de simulación que se presenta en este trabajo, permite configurar un enlace IR (emisor, receptor, recinto donde se establece la comunicación, etc.) y caracterizarlo a través de su respuesta al impulso o, alternativamente, por su respuesta en frecuencia. Además, la caracterización del canal permite, con posterioridad, disponer de diferentes tipos de configuración de enlaces IR para estudiar las prestaciones de diferentes técnicas de modulación, mediante la utilización de otros programas como MATLAB, Scilab, etc., que se abordan en los proyectos docentes de las materias de Sistemas de Comunicaciones Analógicas y Sistemas de Comunicaciones Digitales.

2. El canal IR no guiado en interiores.

En los enlaces IR la técnica de modulación viable es la modulación de intensidad (*Intensity Modulation*, IM), donde la forma de onda deseada es modulada sobre la potencia instantánea de la portadora óptica [1]. La técnica factible de conversión óptico-eléctrica es la detección directa (*Direct Detect*, DD); en la cual, un fotodetector suministra una corriente proporcional a la potencia óptica instantánea recibida. El modelo del canal con IM/DD permite analizar alguna de las características fundamentales del canal óptico IR no guiado. La forma de onda transmitida $X(t)$ es la potencia óptica instantánea radiada por el emisor IR, y la forma de onda recibida $Y(t)$, es la corriente instantánea producida por el fotodetector como resultado de integrar, sobre toda su superficie, la densidad superficial de potencia óptica instantánea en cada punto multiplicada por su responsividad.

El canal IR con IM/DD puede ser modelado como un sistema lineal en banda base, con una potencia de entrada $X(t)$, una corriente de salida $Y(t)$, y una respuesta al impulso $h(t)$. Alternativamente, el canal puede ser descrito en términos de su respuesta en frecuencia.

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (1)$$

La respuesta al impulso o respuesta en frecuencia, es fija para una determinada configuración física del emisor, receptor y superficies reflectoras que conforman el recinto donde se establece el enlace. Así mismo, la respuesta al impulso es cuasiestática, debido a la alta velocidad de señalización, la diversidad espacial debida al gran área del fotodetector y la baja velocidad de movimiento de los objetos u obstáculos presentes en el canal.

Considerando lo mencionado anteriormente, la corriente de salida del fotodetector se puede expresar como:

$$Y(t) = R X(t) \otimes h(t) + N(t) \quad (2)$$

donde el símbolo “ \otimes ” denota convolución, R es la responsividad del detector (A/W) y $N(t)$ representa el ruido del canal. En general, $N(t)$ se suele considerar como AWGN e independiente de la señal. En este caso $X(t)$, la entrada del canal, nunca puede ser negativa, pues es la potencia óptica instantánea transmitida por el emisor IR, cuyo valor medio P_t es:

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t) dt \quad (3)$$

La potencia óptica media recibida, P , viene dada por:

$$P = H(0) P_t \quad (4)$$

donde $H(0)$ representa la ganancia en continua (*Direct Component*, DC), del canal:

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt \quad (5)$$

La relación señal ruido eléctrica (*Signal Noise Ratio*, SNR), recibida en un enlace digital para una velocidad de transmisión R_b , está dada por la ecuación:

$$SNR = \frac{(RP)^2}{R_b N_o} = \frac{R^2 H^2(0) P_t^2}{R_b N_o} \quad (6)$$

asumiendo que $N(t)$ se ha modelado como AWGN con una componente de densidad espectral de doble banda lateral N_o . Como se puede observar, la SNR depende del cuadrado de la potencia óptica media recibida implicando que los enlaces infrarrojos con IM/DD deben utilizar alta potencia óptica de transmisión, a diferencia de los canales de transmisión de RF convencionales donde la SNR es proporcional a la primera potencia de la misma.

3. Descripción del software de simulación.

Como se indicó con anterioridad, el software de simulación, basado en el método de Monte Carlo y técnicas de trazado de rayos [2, 3, 4], permite estimar mediante simulación la respuesta de canales IR en tiempo y/o frecuencia, a partir de un fichero CAD de definición del entorno (escena 3D que el usuario introduce en formato 3DS), donde se especifica, además de la geometría del entorno, las características de reflexión de los materiales que constituyen las superficies de reflexión. El resto de entradas corresponden a las características y localización de los emisores y receptores IR presentes en el entorno de simulación (enlace IR). Además, el software incluye una utilidad que permite visualizar y analizar la traza de ejecución del programa a través de un visor de entornos 3D desarrollado en Java 3D.

En la Fig. 1 se muestra el diagrama de bloques del software de simulación desarrollado. Del diagrama de bloques se pueden extraer dos elementos principales que conforman el software de simulación. Como primer elemento tenemos el programa de diseño CAD, que permite definir el entorno de simulación o ambiente de interior (escena 3D), y como segundo, el modelo de simulación. El modelo de simulación hace referencia a los modelos matemáticos que caracterizan el efecto de cada uno de los elementos que constituyen el entorno de simulación o enlace IR (modelo de propagación), y al algoritmo de simulación, que con ayuda de dichos modelos, permite determinar la respuesta al impulso del canal. A continuación se describe el primero de ellos, dejando la descripción del modelo de simulación para el siguiente apartado de esta contribución.

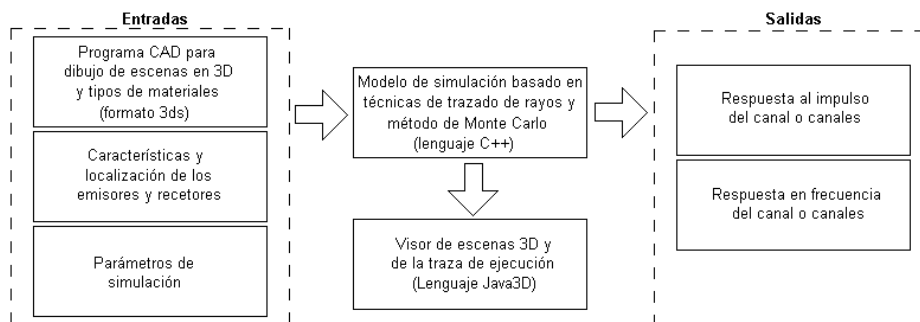


Figura 1. Diagrama de bloques del software de simulación.

El Diseño Asistido por Ordenador, abreviado como DAO, pero más conocido por sus siglas inglesas CAD (*Computer Aided Design*), se basa en el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y a otros profesionales del diseño en sus respectivas actividades [5, 6]. Una de las peculiaridades del software desarrollado, es que permite cualquier composición, por muy compleja que sea, para definir el entorno de simulación. En general, se puede hacer uso de cualquier programa de diseño CAD (Maya 2008, 3D Studio Max, Lightwave 3D, Softimage XSI, SketchUp, Blender), capaz de generar gráficos 3D de tipo vectorial y almacenarlos en un fichero con formato 3DS.

El formato 3DS fue en su origen el formato de fichero nativo de la aplicación 3D Studio desarrollada por la empresa Autodesk. Este formato contiene información de las mallas, atributos de los materiales, referencias a *bitmaps*, datos de texturas, configuraciones de vistas, posiciones de las cámaras, luminosidad e incluso datos de animación de objetos. El formato 3DS es ampliamente utilizado y ofrece una manera directa de exportar modelos a una amplia gama de programas para el diseño 3D con una fidelidad superior a la de otros formatos. De entre el software de diseño existente se puede utilizar cualquiera que ofrezca la opción de exportación a formato 3DS, sin embargo, para el diseño mostrado en este trabajo (Fig. 4) se ha utilizado la herramienta Blender por ser multiplataforma (disponible para Windows, Mac OS X, Linux, Solaris, FreeBSD e IRIX) y de software libre.

Como se ha indicado con anterioridad, el software de simulación permite su ejecución en modo traza. Si en la ejecución de una simulación el usuario activa la opción de generar una traza, se generará un fichero de salida que contiene información detallada de todos los rayos generados durante la simulación, así como las potencias recibidas por los dispositivos receptores. En este sentido, se ha desarrollado un visor de entornos 3D que utiliza estos ficheros de traza que permite visualizar y analizar por parte de los usuarios el proceso de simulación de una forma gráfica.

4. Modelo de simulación.

En general, el modelo de simulación hace referencia al modelo de propagación, es decir, los modelos matemáticos utilizados para caracterizar los efectos de cada uno de los elementos que constituyen el canal IR (emisores, receptores y superficies reflectoras), y al algoritmo de simulación, que con ayuda de dichos modelos, permite determinar la respuesta al impulso del canal. Este bloque del software, encargado de implementar el modelo de simulación, se ha desarrollado en lenguaje C++. A continuación se describe el modelo de propagación y el algoritmo de simulación basado en la utilización de técnicas trazado de rayos y en el método de Monte Carlo.

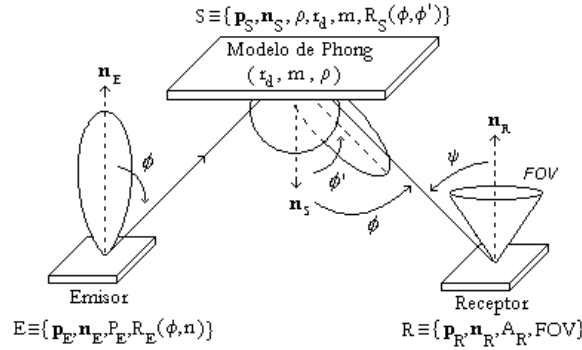


Figura 2. Modelo de propagación básico de un enlace IR.

4.1. Modelo de propagación.

En la Fig. 2 se representa el modelo de propagación básico utilizado para simular un enlace IR, el cual incluye un emisor, un receptor, y un recinto cuyas paredes constituyen las superficies reflectoras. A continuación se describen brevemente cada uno de los modelos matemáticos utilizados para describir el efecto de cada uno de ellos sobre la propagación de la señal IR en ambientes de interior.

En lo que se refiere al emisor, éste se puede representar de manera general mediante un vector de posición (\mathbf{r}_E), un vector de orientación (\mathbf{n}_E), la potencia emitida (P_E) y por su diagrama de radiación ($R_E(\phi, n)$). Con la finalidad de incluir el caso más general, se considera que el emisor presenta un perfil de radiación lambertiano generalizado [1, 3], con simetría axial e independiente de ϕ , y que viene dado por la ecuación:

$$R_E(\phi, n) = \frac{n+1}{2\pi} P_E \cos^n(\phi) \quad \phi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right] \quad (7)$$

El software de simulación también permite simular cualquier emisor con un patrón de radiación genérico, con simetría axial, a través de la definición de su perfil de radiación medido de manera experimental o proporcionado por el fabricante. Sin embargo, desde un punto de vista docente, parece suficiente con la posibilidad de disponer de la primera posibilidad, es decir, modelar cualquier emisor a través de un perfil de radiación lambertiano generalizado.

De manera general, el receptor se puede caracterizar a través de su posición (\mathbf{r}_R), orientación (\mathbf{n}_R), campo de visión (FOV) y por su área efectiva de detección (A_{eff}). En general, un receptor IR detecta una potencia óptica proporcional a su área efectiva de detección [1, 3]. Si A_r es el área física del detector, ψ es el ángulo de incidencia de la radiación sobre el detector, e ignorando las pérdidas por reflexión, el área efectiva viene dada por:

$$A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A_r \cos \psi & 0 \leq \psi \leq \pi/2 \\ 0 & \psi > \pi/2 \end{cases} \quad (8)$$

En el software de simulación se incluye la posibilidad de simular otro tipo de receptores. Concretamente, se incluyen modelos de receptores convencionales y sectorizados, que se engloban dentro de los denominados receptores con diversidad angular, que básicamente están formados por múltiples

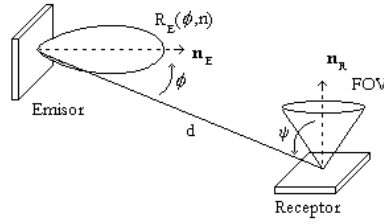


Figura 3. Geometría de emisor y receptor sin elementos reflectores.

detectores IR orientados hacia diferentes direcciones de recepción. Sin embargo, al igual que para el emisor, desde un punto de vista docente no es estrictamente necesario disponer de estos modelos.

El modelo de reflexión utilizado para aproximar el comportamiento de las superficies reflectoras, es el denominado modelo de Phong [3, 7]. En este modelo, cada una de las superficies queda caracterizada por tres parámetros: el porcentaje de radiación que es reflejada de manera difusa (r_d), la directividad de la componente especular (m) y el coeficiente de reflexión (ρ). Si P_i es la potencia incidente sobre la superficie y ϕ' representa la dirección especular de reflexión, la ecuación que define el patrón de reflexión según este modelo es:

$$R_S(\phi, \phi') = \rho P_i \left(\frac{r_d}{\pi} \cos \phi + (1 - r_d) \frac{m+1}{2\pi} \cos^m(\phi - \phi') \right) \quad \phi, \phi' \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right] \quad (9)$$

4.2. Algoritmo de simulación.

Para determinar la respuesta al impulso, en el algoritmo de simulación se consideran dos casos posibles: la contribución a la respuesta debida a la existencia de visión directa entre el emisor y el receptor, y la contribución debida a las múltiples reflexiones que sufre la señal IR antes de alcanzar al receptor [2, 3, 4].

Para determinar la contribución por visión directa, se supone un emisor y un receptor en un entorno donde no existen reflexiones (Fig. 3). Dicha contribución se puede expresar como una función $\delta(t-d/c)$, escalada según la siguiente expresión:

$$P_r = \begin{cases} \frac{1}{d^2} R_E(\phi, n) A_{\text{eff}}(\psi) & 0 \leq \psi \leq \pi/2 \\ 0 & \psi > \pi/2 \end{cases} \quad (10)$$

donde c representa la velocidad de la luz.

Para el caso en que la señal transmitida sea detectada por el receptor después de sufrir una o varias reflexiones en su trayectoria (Fig. 2), su contribución a la respuesta al impulso se determina aplicando técnicas de trazado de rayos y el método de Monte Carlo. Básicamente, consiste en generar un número elevado de rayos que parten desde la posición del emisor y que se orientan, de manera aleatoria, en base a una distribución de probabilidad confeccionada a partir de $R_E(\phi, n)$. Cuando un rayo alcanza una superficie, el punto donde se produce la colisión se considera como una nueva fuente óptica, generándose un nuevo rayo, con una orientación aleatoria que ahora se obtiene según una distribución de probabilidad confeccionada a partir del modelo de reflexión donde se ha producido la colisión, de $R_S(\phi, \phi')$. Después de

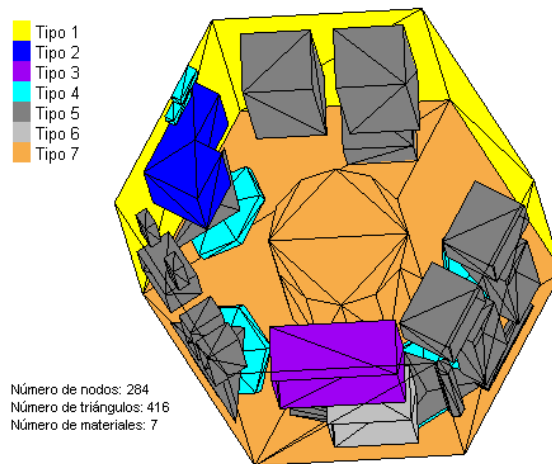


Figura 4. Entorno de simulación o escena 3D.

cada reflexión, la potencia que lleva asociada cada rayo se reduce según el coeficiente de reflexión y se determina la contribución a la respuesta al impulso según la siguiente ecuación:

$$P_r = \frac{1}{d^2} R_S(\phi, n) A_{eff}(\psi) \quad (11)$$

Como el objetivo es obtener información de la distribución temporal de potencia que detecta el receptor (respuesta al impulso), a cada uno de los rayos se le asocia dos parámetros: el tiempo de propagación, definido como el tiempo transcurrido desde que partió desde el emisor, y su potencia.

5. Resultados: ejemplo de aplicación.

En este apartado se presenta, a modo de ejemplo, el resultado de simular la propagación de la señal IR en el interior del recinto representado en la Fig. 4, para una posición fija de emisor y receptor. Hay que resaltar que aunque en el ejemplo se consideren únicamente un emisor y un receptor, el software de simulación permite simular la presencia de múltiples emisores y receptores en cualquier ambiente de interior o entorno 3D por muy complejo que éste sea. El recinto (escena 3D) se ha modelado haciendo uso de la herramienta de diseño Blender, cuyo fichero generado en formato 3DS recopila toda la información relativa a dicho entorno de simulación: geometría, localización del emisor y receptor, y tipos de materiales que constituyen las superficies que conforman el entorno de simulación.

El fichero en formato 3DS generado con el programa de diseño gráfico, constituye una de las entradas del bloque del software de simulación que implementa el modelo de simulación, y que tras su ejecución proporciona la respuesta al impulso del canal IR definido en dicho fichero. Este bloque es capaz de interpretar la información almacenada en dicho fichero y extraer la localización de vértices y triángulos utilizados para modelar la escena 3D, puesto que este bloque trabaja con escenas 3D definidas por medio de triángulos. Como dato, indicar que la escena mostrada en la Fig. 4 se ha modelado usando 284 vértices y 416 triángulos, y que en este caso se suponen presentes en el entorno siete tipos de materiales con características de reflexión diferentes. Además de este fichero, este bloque necesita como entrada los parámetros directamente relacionados con la simulación, es decir, número de rayos a utilizar, número máximo de reflexiones y tiempo máximo de simulación; así como las características del emisor y receptor IR presentes en la simulación. Todos estos parámetros de entrada se extraen de ficheros auxiliares en

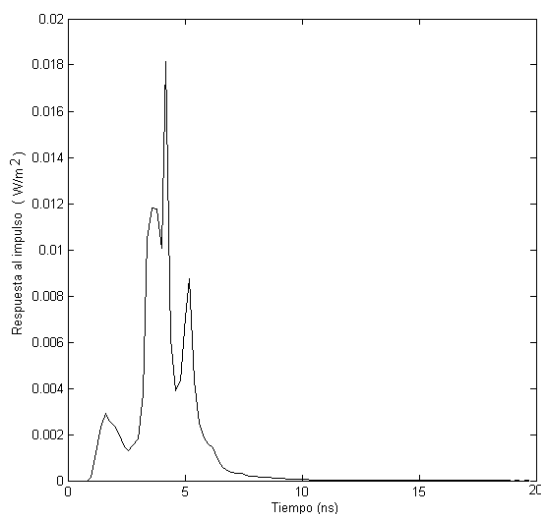


Figura 5. Respuesta al impulso obtenida en la simulación.

formato de texto. En ellos se almacenan datos como la orientación del emisor y receptor, índice modal del emisor, campo de visión del receptor, etc. Los parámetros empleados en la simulación se recogen en la Tabla 1, y la respuesta al impulso obtenida se muestra en la Fig. 5. En lo que se refiere al tiempo de simulación, hay que indicar que para un computador bi-procesador Intel Xeon 3.20 Ghz con 1Gb RAM y Debian GNU/Linux, el tiempo de ejecución de simulación fue aproximadamente de 12 minutos (726 segundos).

Tabla 1. Parámetros de configuración.

Emisor:	Posición: (x,y,z)	(-0,25, 0,14, 0,83)	
	Orientación	90°, 330°	
	Índice modal (n)	4,82	
	Potencia emitida	0,21 W	
Receptor:	Posición: (x,y,z)	(-0,33, 0,24, 0,91)	
	Orientación	90°, 330°	
	FOV	90°	
	Área activa (A_r)	1cm ²	
Parámetros de simulación:	Nº de rayos	500.000	
	Nº de reflexiones	6	
	Resolución (Δt)	0,2 ns	
Materiales	ρ	r_d	m
Tipo 1	0,20	1	---
Tipo 2	0,50	0,3	97
Tipo 3	0,80	0,1	230
Tipo 4	0,40	1	---
Tipo 5	0,15	1	---
Tipo 6	0,90	1	---
Tipo 7	0,75	0,7	26

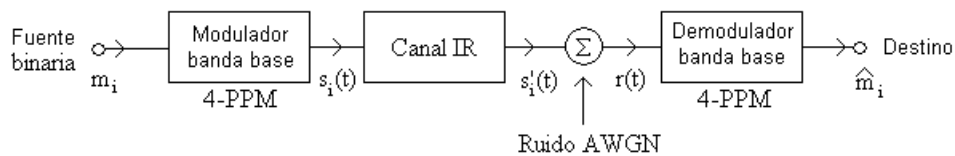


Figura 6. Diagrama de bloques de un sistema de transmisión IR que utiliza como esquema de modulación 4-PPM.

Como se indicó con anterioridad, el software de simulación desarrollado permite disponer de diferentes tipos de configuración de enlaces IR para estudiar las prestaciones de diferentes técnicas de modulación que se abordan en los proyectos docentes de materias relacionadas con sistemas de comunicaciones analógicas y digitales. A modo de ejemplo, en la Fig. 6 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de transmisión digital en banda base en presencia de ruido AWGN y basado en un esquema de modulación 4-PPM, que utiliza como medio de transmisión el canal IR caracterizado por presentar la respuesta al impulso mostrada en la Fig. 5. Para simular el sistema de transmisión se ha empleado la herramienta comercial MATLAB, y se ha supuesto que el sistema no emplea ecualización y que utiliza como demodulador el esquema de un receptor óptimo que opera en un canal con ruido AWGN, en ausencia de interferencia entre símbolos (*InterSymbol Interference*, ISI), cuando se utiliza como criterio de decisión el de máxima semejanza o verosimilitud.

En la Fig. 7 se muestra la tasa de error de bit (*Bit Error Rate*, BER), frente a la relación señal-ruido normaliza a bit (E_b/N_0) para tres velocidades de transmisión diferentes: 5, 20 y 50 Mbps. Como se puede observar, a medida que aumenta la tasa de bits, el sistema se hace más sensible frente al efecto de la ISI introducida por el canal, puesto que el ancho del pulso del símbolo 4-PPM es cada vez menor, llegando a ser comparable con la dispersión temporal del canal (*rms delay spreads* de la respuesta al impulso).

6. Conclusiones

El software de simulación de canales infrarrojos para ambientes de interior presentado en este trabajo puede ser utilizado por alumnos que cursan materias relacionadas con sistemas de comunicaciones analógicas y digitales, constituyendo una herramienta de apoyo en asignaturas relacionadas con sistemas de comunicaciones inalámbricas, concretamente en aquellas cuyo proyecto docente abarca aspectos de comunicaciones ópticas no guiadas. En este sentido, el software constituye una herramienta fundamental para abordar el estudio y comprensión de las características principales del canal óptico no guiado, así como estudiar las prestaciones de diferentes sistemas de comunicación que utilicen como medio de transmisión dicho canal.

En general, el software de simulación permite obtener la respuesta al impulso del canal IR o su respuesta en frecuencia, a partir de un fichero CAD (en formato 3DS) de definición del entorno, donde se especifica, además de la geometría del entorno, la localización de los emisores y receptores utilizados para establecer el enlace y las características de reflexión de los materiales que conforman sus superficies. El bloque del software encargado de implementar el modelo de simulación se ha desarrollado en lenguaje C++. Además, el software incluye una utilidad que permite visualizar y analizar la traza de ejecución del programa a través de un visor de entornos 3D que ha sido desarrollado en Java 3D.

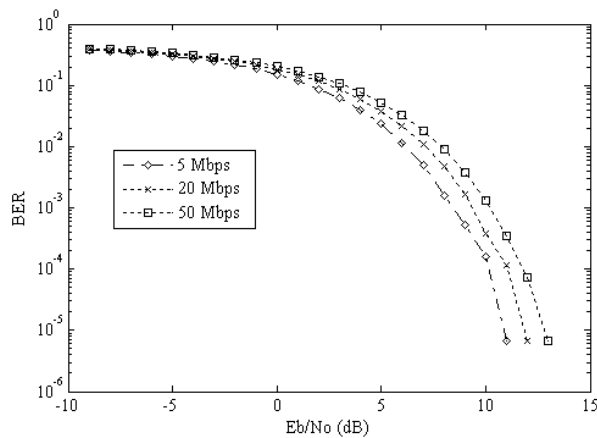


Figura 7. BER frente a E_b/N_0 para tres tasas de bit diferentes: 5, 20 y 50 Mbps.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado gracias a los proyectos de investigación del Plan Nacional con referencias TEC2006-13887-C05-05 y TEC2009-14059-C03-02.

Referencias

- [1] J.M. Kahn, J.R. Barry. *Wireless Infrared Communications. Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, N° 2, 367-379 (1997).
- [2] F.J. López-Hernandez, R. Pérez-Jiménez, A. Santamaría. *Ray-Tracing Algorithms for Fast Calculation of the Channel Impulse Response on Diffuse IR-Wireless Indoor Channels. SPIE Optical Engineering*, Vol. 39, N° 10, 1510-1512 (2000).
- [3] S. Rodríguez, R. Pérez-Jiménez, F.J. López-Hernández, O. González, A. Ayala. *Reflection model for calculation of the impulse response on IR-wireless indoor channels using ray-tracing algorithm. Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 32, N° 4, 296-300 (2002).
- [4] O. González, S. Rodríguez, R. Pérez-Jiménez, B.R. Mendoza, A. Ayala. *Error Analysis of the Simulated Impulse Response on Indoor Wireless Optical Channels Using a Monte Carlo-Based Ray-Tracing Algorithm. IEEE Transactions on Communications*, Vol. 53, N° 1, 124-130 (2005).
- [5] M. Domínguez Somonte y M. Espinosa Escudero. *Diseño Asistido. Campos De Aplicación*. Publicaciones UNED (1997).
- [6] P. Szalabaj. *CAD Principles for Architectural Design*. Elsevier (2000).
- [7] C. Lomba, R. Valadas, and A. Oliveira Duarte. *Experimental characterisation and modelling of the reflection of infrared signals on indoor surfaces. IEE Proceedings of Optoelectronics*, Vol. 145, N° 3, June 1998.