

Modelo Simulink de la capa física de Bluetooth

*Proyecto de fin de carrera
Ingeniería de Telecomunicación*



Autora: María Sierra González
Año académico 2008/2009

Profesores: Universidad Carlos III
Julio Villena Román

Università Politecnica delle Marche
Massimo Conti

Indice

Indice.....	1
1 Introducción.....	2
2 Capa física Bluetooth.....	2
3 Descripción del sistema.....	2
3.1 Transmisor.....	2
3.2 Canal.....	4
3.3 Receptor.....	6
4 Resultados.....	7
4.1 BER vs. E_b/N_0	7
4.2 Efectos de la interferencia.....	8
5 Conclusiones.....	10
Referencias y bibliografía.....	11

1 Introducción

El objetivo de este proyecto de fin de carrera es la simulación de una transmisión Bluetooth a nivel físico por medio de MATLAB Simulink. Como punto de partida se ha tomado un modelo Simulink ya obsoleto basado en el estándar 802.15-01^[1], que simula la transmisión de voz a través de un link SCO con modulación GFSK. Se han llevado a cabo una serie de cambios para actualizarlo en concordancia con la última especificación de Bluetooth^[2], y se ha diseñado también una batería de pruebas para estudiar su comportamiento bajo diferentes condiciones (Basic Rate, Enhanced Data Rate, presencia de ruido aditivo gaussiano, coexistencia con otros dispositivos que trabajan en la misma frecuencia y pérdidas entre el transmisor y el receptor). La simulación de protocolos de comunicaciones mediante herramientas como Simulink permite descubrir fallos de diseño durante el proceso de desarrollo cuando no es costoso corregirlos, y provee además una perspectiva general del funcionamiento de sistemas de comunicación complejos.

2 Capa física Bluetooth

A bajo nivel, la arquitectura Bluetooth consiste en un Host y uno a más controladores. En la especificación 3.0 se definen dos tipos de controladores: un controlador Basic Rate / Enhanced Data Rate, y un controlador MAC/PHY alternativo (AMP), que consigue una velocidad de transmisión de hasta 24 Mbps trabajando sobre la capa física de WiFi

En este proyecto se ha modelado el primero de ellos, que posee dos modos de funcionamiento:

- **Basic Rate**, que permite alcanzar una velocidad de 1 Mbps, con modulación GFSK.

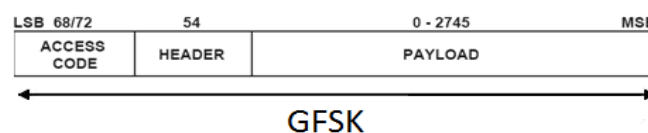


Figura 1: Paquete BR

- **Enhanced Data Rate**, que extiende la capacidad y los tipos de paquetes Bluetooth con el propósito de incrementar el máximo rendimiento, proporcionando mejor soporte para múltiples conexiones y disminuyendo el consumo de potencia, sin cambiar el resto de la arquitectura. La característica clave de Enhanced Data Rate es que el tipo de modulación cambia dentro del mismo paquete. El Access Code y la cabecera se transmiten moduladas con GFSK, mientras que la secuencia de sincronización, payload y trailer lo hacen con PSK:

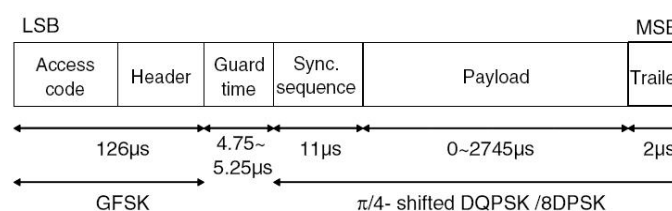


Figura 2: Paquete EDR

Los tipos de modulación PSK utilizados son $\pi/4$ DQPSK y 8-DPSK, que aumentan la velocidad de transmisión de 1 Mbps a 2 Mbps y 3 Mbps respectivamente.

3 Descripción del sistema

La figura 3 muestra el nivel más alto del modelo Simulink de Bluetooth. En él encontramos un transmisor, canal radio, interferente 802.11, receptor, medida de error e instrumentación. La naturaleza jerárquica de Simulink permite manejar diseños grandes y complejos modularizándolos en subsistemas. Al abrir cada uno de estos subsistemas se revelan otros niveles de detalle.

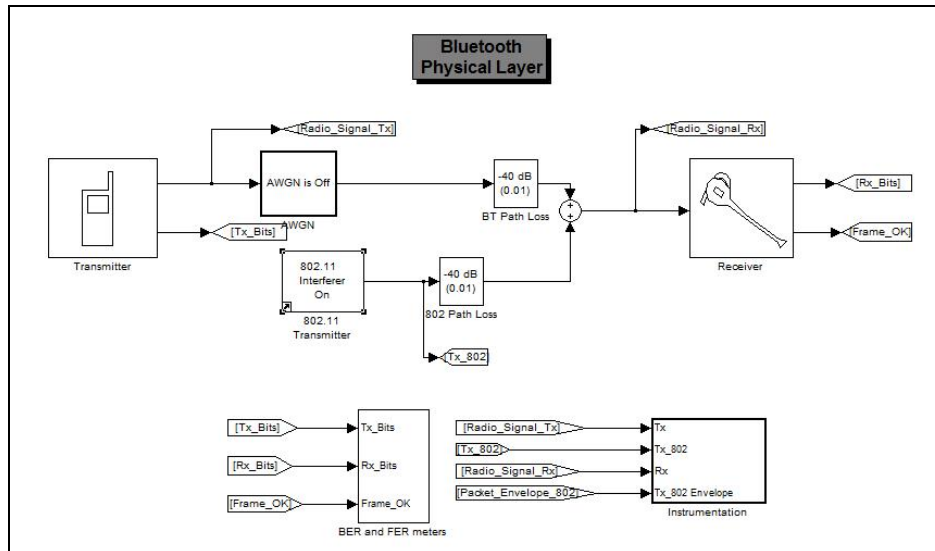


Figura 3: Esquema general

3.1 Transmisor

Las operaciones llevadas a cabo por el transmisor son *buffering*, HEC, FEC y generación de CRC. En el modo BR, tanto la cabecera como el payload se modulan con GFSK. En el modo EDR, la cabecera es modulada con GFSK y el payload con $\pi/4$ DQPSK o 8DPSK, dependiendo de la velocidad que se desee alcanzar (2 Mbps y 3 Mbps respectivamente).

Debido a que existe una diferencia significativa tanto en el entramado como en la modulación, se han implementado tres modelos diferentes para la transmisión de paquetes DH1, 2-DH1 y 3-DH1. Por simplicidad se detallará aquí solamente el segundo de ellos, que transmite paquetes 2-DH1 con modulación $\pi/4$ DQPSK.

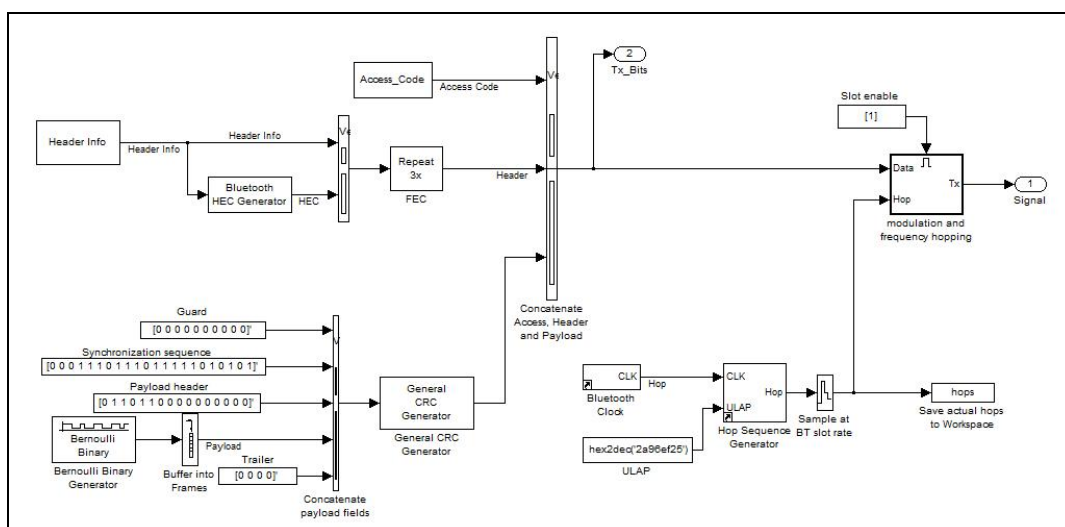


Figura 4: Transmisor

La fuente de información es un Generador Binario Bernoulli, cuya salida se dispone en tramas a una frecuencia de 625 μ s (el tiempo de un slot Bluetooth). La guarda, secuencia de sincronización, cabecera del payload y el trailer, junto con el Access Code y la cabecera, son fijos. El HEC se genera con un bloque Simulink basado en código C. Después de esto, se aplica una codificación FEC 1/3, simplemente repitiendo y concatenando la información de la cabecera y el HEC 3 veces. El CRC se calcula también y se añade al payload. El bloque de modulación y frequency hopping se habilita cada slot Bluetooth (625 μ s).

A la salida del generador de salto de frecuencia tenemos un número entre 0 y 78 que puede ser fijo, aleatorio, o dependiente de algunos parámetros del sistema.

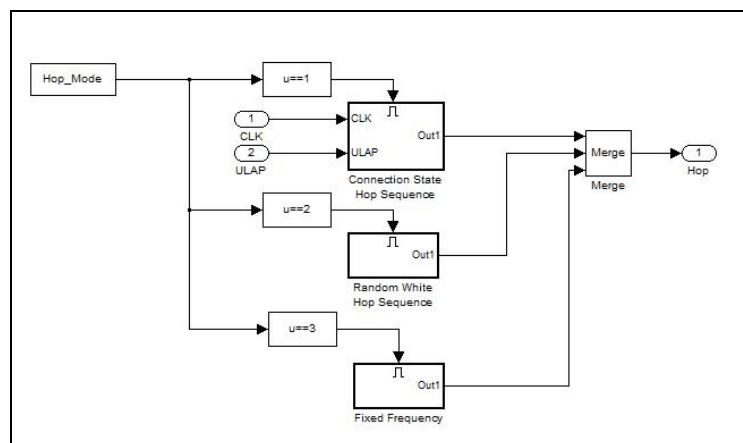


Figura 5: Frequency hopping

En el modulador, esta secuencia de salto generará hasta 79 portadoras diferentes, que son creadas en el modelo Simulink por medio de un bloque MFSK con una constelación de 79 símbolos y una separación en frecuencia de 1 MHz. De este modo, si el bloque recibe una entrada 0, se genera una senoide compleja de -39 MHz, si recibe un 1, se crea una de -38 MHz y así hasta los 39 MHz.

Aunque la frecuencia real de Bluetooth es de 2.4 GHz en este modelo los canales se distribuyen entre -39 MHz and 39 MHz porque Simulink trabaja en banda base para disminuir la complejidad computacional.

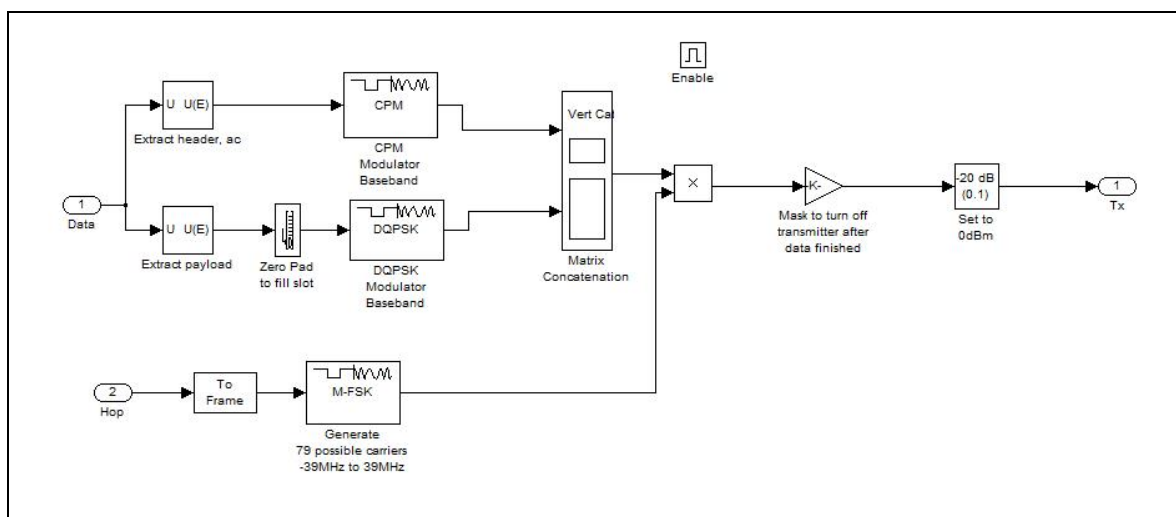


Figura 6: Modulador

En el modo EDR-2 Mbps, la cabecera y el Access Code se modulan con GFSK, y el payload con $\pi/4$ DQPSK. Esto hace necesario separar el paquete en dos partes para modularlas de manera diferente. Después de la modulación, las dos partes se vuelven a unir y la señal se mezcla con una portadora entre -39 y 39 MHz para simular el salto en frecuencia.

La modulación GFSK transmite una señal con una separación en frecuencia de +150 kHz con respecto a la portadora para el bit 1, y una señal separada -150 kHz para el bit 0. Esta funcionalidad se implementa dentro del subsistema modulador mostrado en la figura 4 usando el bloque Simulink de Continuous Phase Modulation (CPM) e introduciendo los valores de índice de modulación y producto BT especificados por Bluetooth.

En el caso de la modulación $\pi/4$ DQPSK, encontramos un bloque modulador DQPSK en la librería de Simulink, así que solamente es necesario poner un offset de fase de $\pi/4$ para rotar la constelación. Especificando 100 muestras por símbolo en ambos moduladores, obtenemos a la salida un ancho de banda centrado en 0 Hz con una tasa de muestreo de $0.01 \mu\text{s}$. Estas muestras se encapsulan en tramas de 62500 muestras, resultando en una duración de $625 \mu\text{s}$.

Para llenar el slot Bluetooth se ha añadido una cadena de ceros al payload, por lo tanto el transmisor tiene que ser apagado después de los bits de información. Para ello, se ha usado un bloque de ganancia con una máscara de unos y ceros para los bits de información y los de relleno, respectivamente. Finalmente, la potencia de salida se fija a 0 dBm (1 mW), para simular un dispositivo de clase 1. La atenuación requerida para lograr esto (20 dB) ha sido calculada empíricamente.

3.2 Canal

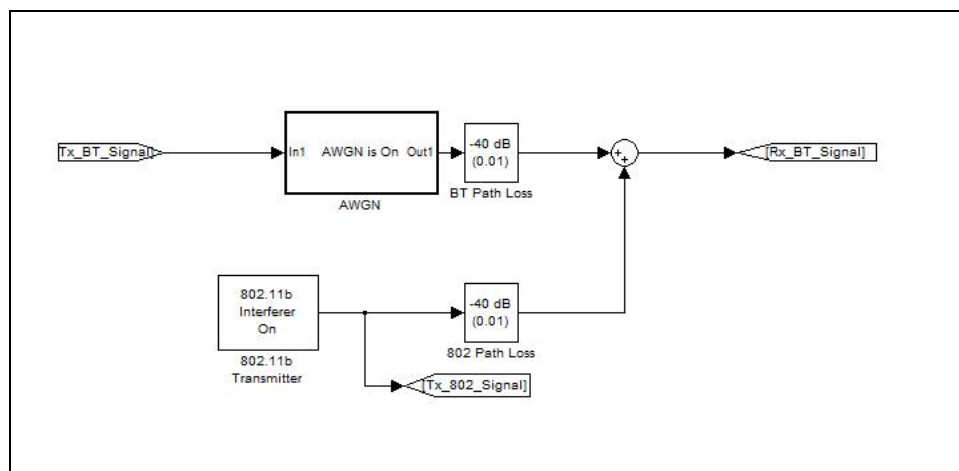


Figura 7: Modelo de canal

Los tres efectos de un canal de comunicaciones que han sido modelados son el ruido, la interferencia y el *pathloss*. Este último puede simularse introduciendo una atenuación de -40 dB, que corresponde a una separación de 1 m entre transmisor y receptor^[3].

El ruido blanco se añade usando un bloque AWGN, que se enmascara para permitir habilitar o deshabilitar el ruido y fijar un determinado valor de E_b/N_0 en cada simulación según se desee.

El bloque Simulink que genera la señal interferente también es un subsistema enmascarado que permite al usuario especificar parámetros como tasa media de paquetes, longitud, potencia y frecuencia.

El ancho de banda de transmisión de los dispositivos 802.11's es de unos 22MHz^[4]. Este se genera filtrando una fuente de ruido blanco dos veces:

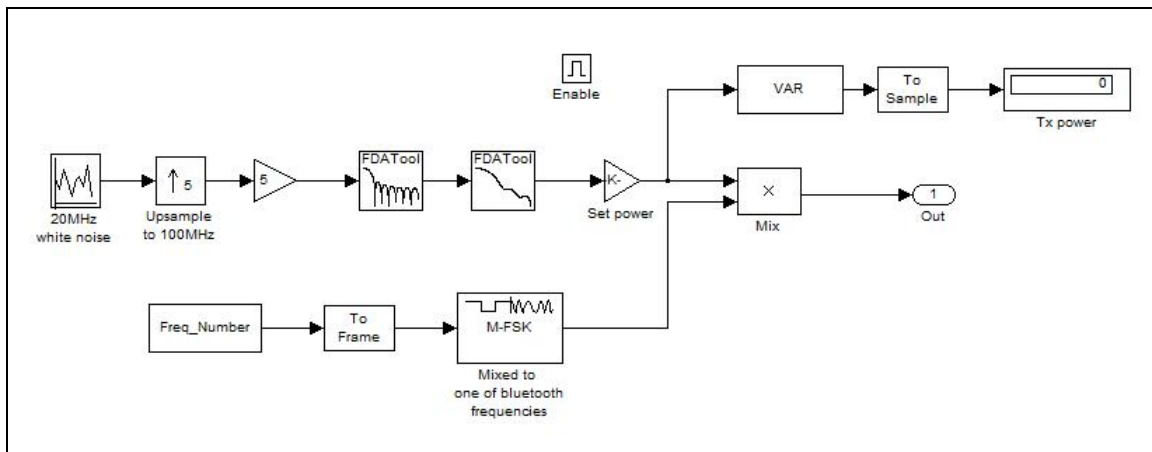


Figura 8: Generación del ruido de 22 MHz de ancho de banda

Ambos filtros son filtros Butterworth paso bajo con una frecuencia de corte de 6 MHz y la principal diferencia entre ellos es el orden, 13 y 12 respectivamente. El ruido filtrado se mezcla con uno de los canales Bluetooth para simular la superposición a 2.4 GHz.

El espectro resultante se muestra en la siguiente figura:

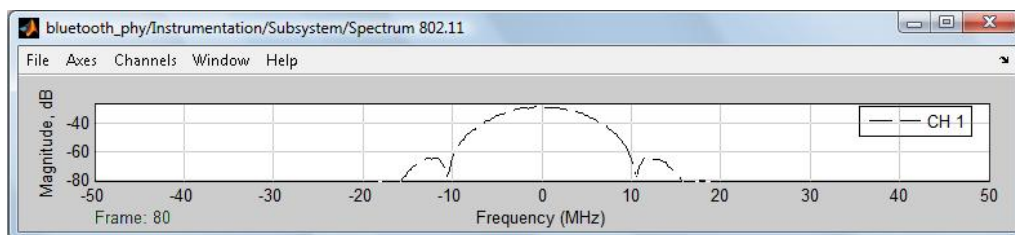


Figura 9: Espectro del interferente 802.11

802.11 es un sistema basado en paquetes y su transmisión puede ser caracterizada como ráfagas de actividad a con tasa Poissoniana. Estas ráfagas, que no están alineadas con los límites del slot Bluetooth, se crean habilitando el subsistema generador de ruido con una cadena de pulsos que llegan siguiendo una tasa poissoniana y tienen una anchura igual a la longitud del paquete. El bloque que genera el tren de pulsos es un bloque S-Function basado en código MATLAB que usa algunas características avanzadas de Simulink para controlar cuando es ejecutado.

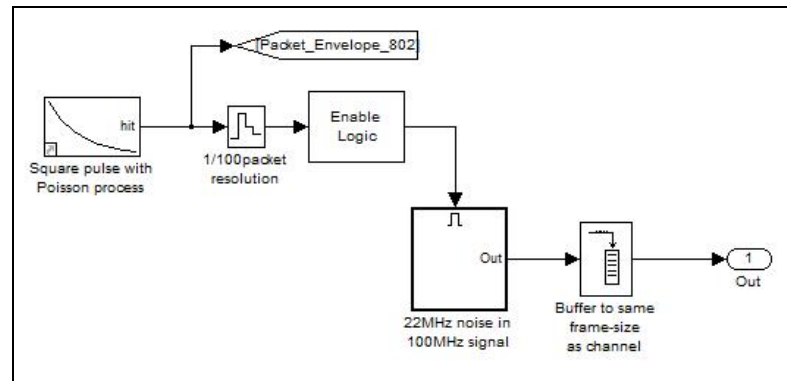


Figura 10: Modelo de interferente 802.11

3.3 Receptor

El objetivo del receptor es recuperar la información contenida en la señal de radio recibida. El receptor es normalmente más complicado que el transmisor debido a la necesidad de llevar a cabo operaciones de sincronización y detección de errores. En principio, realiza las mismas tareas que el transmisor pero en orden inverso. En este caso, la primera operación que sufre la señal de salida es la multiplicación por el conjugado de la frecuencia de salto, para volver a trasladarla a banda base. A continuación se filtra para eliminar el ruido, con un filtro paso bajo Butterworth de segundo orden. Este proceso de filtrado tiene el inconveniente de que genera un retardo de grupo de 55 muestras, pero puede corregirse simplemente añadiendo un bloque de retardo.

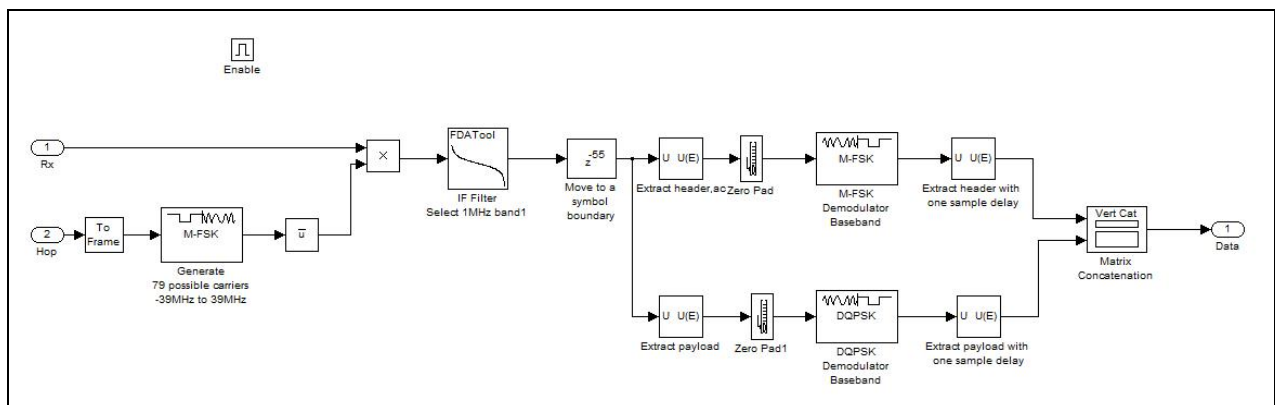


Figura 11: Demodulador

En el modo EDR, es necesario dividir el paquete en dos partes (cabecera, payload) para demodularlo de acuerdo con el respectivo esquema de modulación. El payload, modulado con $\pi/4$ DQPSK se demodula con un bloque demodulador DQPSK con un offset de fase de $\pi/4$ rad. La modulación de la cabecera, sin embargo, es GFSK. Como GFSK es un caso particular de 2-FSK, para demodular esta parte de la señal se ha usado un demodulador 2-FSK, con separación en frecuencia de 300 KHz (± 150 KHz con respecto a la portadora para los bits uno y cero, respectivamente).

La señales demoduladas tienen que ser corregidas de nuevo porque tienen un retardo de una muestra^[5], y entonces se obtiene el Access Code, la cabecera y el payload. La cabecera se decodifica extrayendo una de las tres repeticiones para obtener la información de cabecera y el HEC. Un fallo de trama, causado por ruido o interferencia excesivos, ocurre cuando el HEC no concuerda con la información de la cabecera o en el Access Code hay menos de 57 bits correctos (esto es sólo un criterio

de diseño). Si la trama falla, la señal Frame OK se pone a cero. Este *flag* será utilizado en el cálculo de la FER, así como para la exclusión de tramas corruptas del cálculo de la BER.

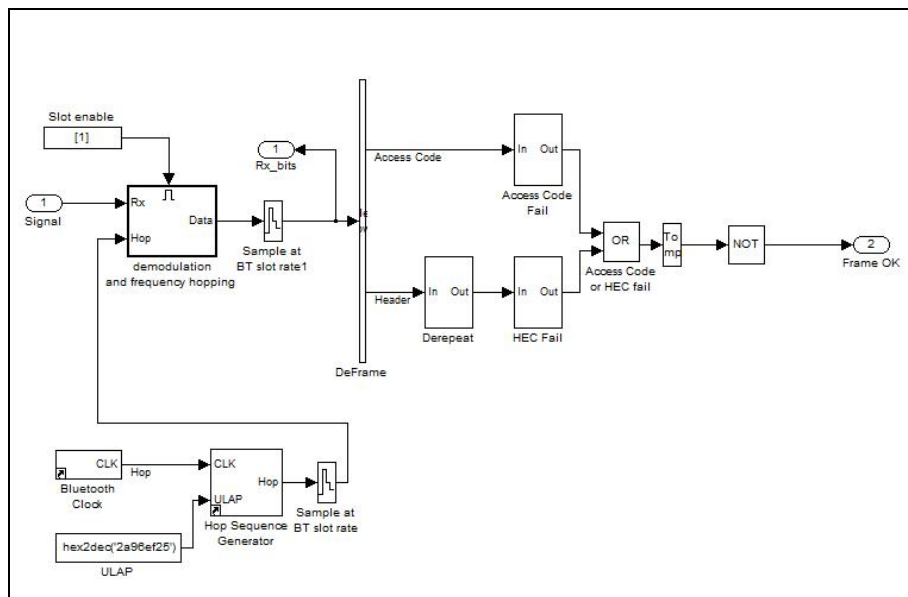


Figura 12: Receptor

4 Resultados

4.1 BER vs. E_b/N_0

La medida de la tasa de error de bit (BER) es una de las primeras consideraciones para determinar la calidad de una señal. Para ver el efecto de las modulaciones mixtas, se ha calculado la BER sobre todo el paquete, incluyendo la cabecera modulada con GFSK y el payload modulado con DPSK. El número de tramas transmitidas se ha fijado en 10^3 debido a la larga duración de las simulaciones.

En la siguiente figura se muestra la BER para los modos BR, EDR 2 Mbps y EDR 3 Mbps, junto con la BER teórica para las modulaciones GFSK, DQPSK y 8-DPSK.

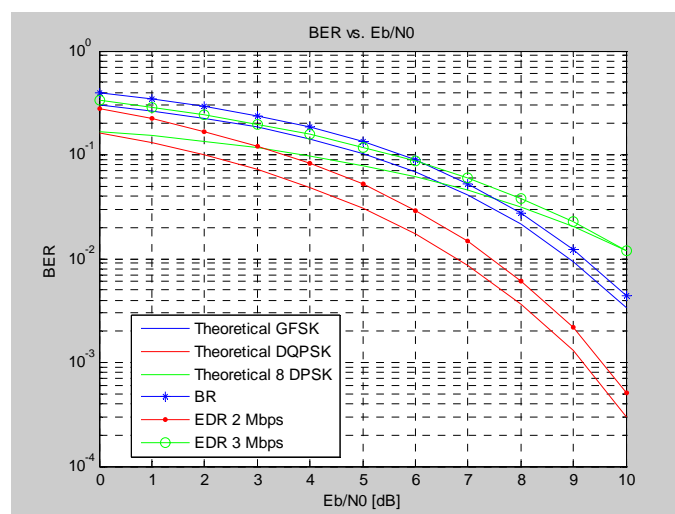


Figura 13: BER vs. E_b/N_0

Mirando el gráfico anterior vemos que, para baja E_b/N_0 , las modulaciones del tipo DPSK son en teoría mejores que GFSK. Sin embargo, aunque el comportamiento de la modulación DQPSK es mejor para todas las E_b/N_0 , el error obtenido con 8-DPSK es mayor que el obtenido con GFSK a partir de 6 dB. Los resultados prácticos son ligeramente superiores que los teóricos pero todavía coherentes. Para los modos EDR, la diferencia con la BER teórica en el caso de la modulación DPSK es mayor porque se la añade el error de la cabecera, modulada con GFSK. En el caso particular de EDR 3 Mbps, la mezcla de modulaciones en un mismo paquete hace que la BER disminuya más rápido que la de la 8-DPSK teórica.

4.2 Efectos de la interferencia

El uso de *Frequency Hopping* en Bluetooth puede evitar o limitar la interferencia con otros dispositivos en la banda 2.4 GHz, pero en la práctica la BER obtenida puede depender de cosas como el patrón de saltos seleccionado o la distancia entre el dispositivo Bluetooth y el interferente, además del tipo de modulación. Para analizar la influencia de estos factores, se han realizado diferentes simulaciones con frecuencia fija y con saltos uniformemente distribuidos, para los tres modos de funcionamiento (BR, EDR 2 Mbps y EDR 3 Mbps). El decremento de la BER debido a la separación con respecto al interferente ha sido estudiado también. Para evitar la degradación de la señal por causas ajenas a la interferencia, el canal AWGN ha sido apagado en este caso.

- Frecuencia de salto fija

Si la frecuencia de salto está fija pero se encuentra fuera de la banda de trabajo del interferente, entonces la BER obtenida es cero para todas las modulaciones, por lo tanto es como si no existiera interferencia alguna

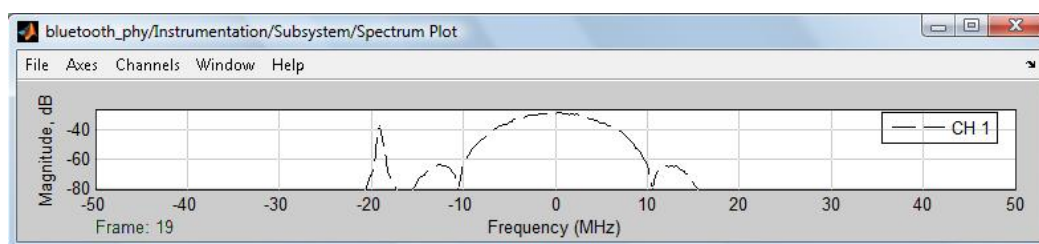


Figura 14: Frecuencia fija y fuera de la banda interferente

Pero puede también ocurrir lo opuesto, que esta frecuencia fija caiga exactamente en la banda de frecuencia del interferente. En este caso la interferencia enmascara la portadora Bluetooth y entonces es muy probable que los bits recibidos sean erróneos.

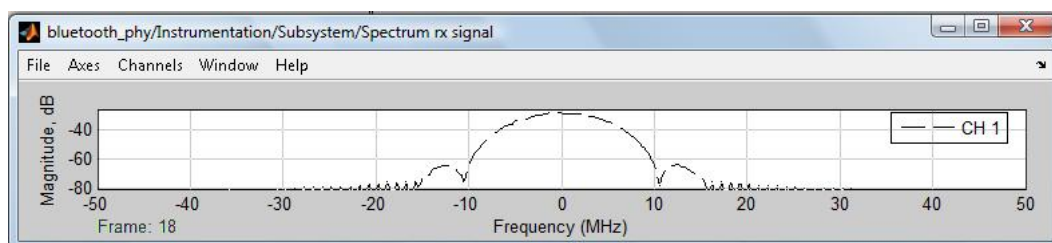


Figura 15: Frecuencia fija en la banda interferente

En la tabla siguiente se muestra hasta que punto el enlace puede ser deteriorado por esto:

Tasa de transmisión del interferente	Basic Rate		EDR 2 Mbps		EDR 3 Mbps	
	BER	FER	BER	FER	BER	FER
200 paquete/s	0.1112	0.1987	0.1112	0.1987	0.1248	0.1987
500 paquetes/s	0.3157	0.5354	0.3157	0.5354	0.3532	0.5354
Siempre encendido	0.6514	0.9983	0.6514	0.9983	0.7301	0.9983

Tabla 1: BER con interferente activo para frecuencia fija

Podemos ver que, incluso cuando la tasa de transmisión del interferente es baja, la BER obtenida es muy alta, y cuando el dispositivo WiFi está encendido siempre, el error es mayor que 0.5, así que la comunicación no podría llevarse a cabo. Se puede apreciar también que BR y EDR 2 Mbps son un poco más robustos en este caso que EDR 3 Mbps.

- Frecuencia de salto uniformemente distribuida (aleatoria o dependiente del estado de la conexión)

Tanto la secuencia aleatoria como la que depende del estado de la conexión generan un patrón uniformemente distribuido en la banda de Bluetooth, la única diferencia es que el segundo permite también evitar la interferencia con otras piconets, ya que un reloj y una ULAP diferentes generarán una secuencia completamente diferente. Pero como en nuestro caso solo prestamos atención a la interferencia de los dispositivos 802.11, los resultados son similares para ambos patrones. La BER para el caso particular de salto dependiente del estado de la conexión se muestra en la tabla siguiente:

Tasa de transmisión del interferente	Basic Rate		EDR 2 Mbps		EDR 3 Mbps	
	BER	FER	BER	FER	BER	FER
200 paquetes/s	0.01373	0.03535	0.01841	0.03535	0.02174	0.03535
500 paquetes/s	0.0421	0.1145	0.058	0.1162	0.0692	0.1162
Siempre encendido	0.08325	0.2088	0.115	0.2121	0.1365	0.2121

Tabla 2: BER con interferente activo para secuencia de salto dependiente del estado de la conexión

Como cabría esperar, la BER se incrementa con la tasa de transmisión del interferente, pero nunca llega a ser tan grande como la obtenida con una frecuencia fija cuando coincide con la frecuencia interferente. Además, se puede observar que para el modo EDR 2 Mbps es mayor que para BR, y que hay más errores debidos a la interferencia con EDR 3 Mbps que con EDR 2 Mbps. Podemos suponer con esto que las modulaciones de orden más alto, si bien incrementan la velocidad de transmisión, pueden provocar también un incremento de la BER cuando existen interferencias en el medio.

La distancia al transmisor WiFi es también un factor importante a tener en cuenta. La variación de la distancia con respecto al dispositivo Bluetooth puede ser modelada simplemente incrementando o decrementando las pérdidas de la señal interferente. Para el modo BR y con una secuencia de salto dependiente del estado de la conexión, la tasa de error de bit disminuye linealmente a medida que el interferente se aleja:

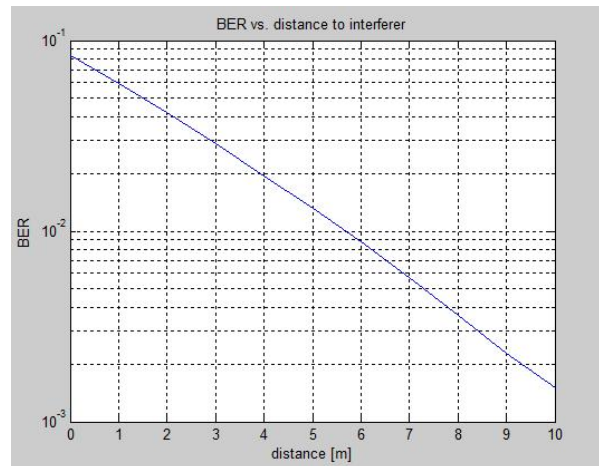


Figura 16: BER vs. distancia al interferente

5 Conclusiones

En este proyecto de fin de carrera se ha modelado y analizado el comportamiento de la capa física de Bluetooth, para los modos Enhanced Data Rate y Basic Rate. Hemos encontrado que, aunque las modulaciones DPSK usadas en EDR son más rápidas y tienen menos errores para baja E_b/N_0 , GFSK es más robusta en presencia de interferencias, muy comunes en la banda 2.4 GHz. Además, mantener la cabecera modulada con GFSK permite a los dispositivos Bluetooth adaptar el resto del paquete a la técnica de modulación dinámica para cada trama.

Otra conclusión que surge del análisis de la interferencia es que el uso de un salto de frecuencia fijo puede resultar en una BER más pequeña en caso de que la interferencia suceda siempre en la misma banda porque sería fácil evitarla. Pero si el interferente usa también una técnica de salto en frecuencia, como 802.11, es aconsejable utilizar una secuencia aleatoria o dependiente del estado de la conexión que distribuya uniformemente los saltos en la banda de trabajo, disminuyendo las colisiones y por lo tanto la BER.

Aunque la única interferencia simulada ha sido la de los dispositivos WiFi, puede ser implementada cualquier otra, como Zigbee o los teléfonos inalámbricos, simplemente cambiando la anchura de la banda interferente y la duración de la interferencia. Este modelo en particular no incluye ninguna sincronización porque asume que el sistema está completamente sincronizado, pero el receptor podría mejorarse usando un PLL, o una máquina de control flujo para la sincronización de las tramas. Esto permitiría simular una transmisión *full duplex*, y por lo tanto estudiar el comportamiento de Bluetooth a un nivel más alto.

Referencias y bibliografía

- [1] **Bluetooth Voice Simulink Model.** *Stuart McGarrity*. MATLAB Digest, Noviembre 2001.
<http://www.mathworks.com/company/newsletters/digest/nov01/bluetooth.html>
- [2] **Bluetooth specification version 3.0 + HS** *Bluetooth SIG*, Abril 2009
- [3] **Bluetooth Operation and use.** *Robert Morrow*. Ed. McGraw-Hill, 2002, página 42.
- [4] **IEEE Std 802.11™-2007**
- [5] **Communications Blockset User's Guide.**
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/commblocks/index.html?/access/helpdesk/help/toolbox/commblocks/>
- [6] **History of Bluetooth Technology.** http://www.bluetooth.com/Bluetooth/SIG/History_of_the_SIG.htm
- [7] **Bluetooth technology gets faster with bluetooth 3.0.** *Bluetooth SIG*, Abril 2009
http://www.bluetooth.com/Bluetooth/Press/SIG/iBLUETOOTHi_TECHNOLOGY_GETS_FASTER_WITH_iBLUETOOTHi_30.htm
- [8] **Bluetooth Simulation in C# with Serial Ports.** *Badea Florin*. The code project, Junio 2008
http://www.codeproject.com/KB/mobile/bth_serial_port.aspx
- [9] **A unified GFSK, $\pi/4$ -shifted DQPSK, and 8-DPSK baseband controller for enhanced data rate Bluetooth SoC.** *Yoonseok Choi y otros*. Current Applied Physics, Volumen 6, Tema 5, Septiembre 2006, Páginas 862-872.
- [10] **Quantifying Bluetooth Piconet Mutual Interference.** *David Harris y Michael Roberts*. Highland Systems, Inc.
<http://www.highsys.com/products/Bluetooth%20Mutual%20Interference.pdf>
- [11] **Bluetooth EDR Physical Layer modeling.** *Mikulka, Hanus*. 18th Conferencia Internacional de Radioelectronica , Abril 2008.
- [12] **Coexistence between Bluetooth and IEEE 802.11 CCK Solutions to Avoid Mutual Interference.** *A Kamerman*. IEEE 802.11-00/162, July 2000
- [13] **WPAN Coexistence Performance Evaluation: MAC Simulation Environment and Preliminary Results.** *N Golmie, F Mouveraux*. IEEE 802.15-00/066r0, Marzo 2000.
- [14] **Packet Error Rate of an IEEE 802.11 WLAN in the Presence of Bluetooth.** *S Shellhammer*. IEEE 802.15-00/133r0, Mayo 2000.
- [15] **Impact of Bluetooth on 802.11 Direct Sequence.** *G Ennis*. IEEE 802.11-98/319, Septiembre 1998.
- [16] **Extension of Bluetooth and 802.11 Direct Sequence Model.** *J Zyren*. IEEE 802.11-98/378, Noviembre 1998.
- [17] **Reliability of IEEE 802.11 WLANs in Presence of Bluetooth Radios.** *J Zyren*. IEEE 802.15-99/073r0, Septiembre 1999.
- [18] **Sistemas electrónicos de comunicaciones.** *Roy Blake*. Ed. CENGAGE Learning, 2004.
- [19] **Bluetooth Frequency Hop Selection Kernel Impact on Inter-Piconet Interference.** *Jason Ballagh*. Thesis for the degree of Master of Science in Electrical Engineering - Virginia Polytechnic Institute, 2003.
<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-05052003-171217/unrestricted/jebthesis.PDF>

- [20] **Signal Processing for Wireless Communications.** *Joseph Boccuzzi.* Ed. McGraw-Hill, 2007
- [21] **WiFi, Bluetooth, Zigbee and WiMAX.** *Houda Labiod, Hossam Afifi, Costantino De Santis.* Ed. Springer, 2007
- [22] **Bluetooth Revealed: The Insider's Guide to an Open Specification for Global Wireless Communications.** *Brent A. Miller, Chatschik Bisdikian.* Ed. Prentice Hall
- [23] **Contemporary Communication Systems Using MATLAB and Simulink.** *Proakis, Salehi, Bauch.* Thomson Brooks/Cole, 2004.