

Funcionamiento y pruebas de un sistema radio equipado con Bluetooth® EDR

Por Helen Mills, Agilent Technologies

Helen Mills es Product Manager (directora de productos) de la División de Productos Inalámbricos de Agilent Technologies. Se incorporó a Hewlett-Packard / Agilent Technologies, Inc. en 1996. Durante esos nueve años en HP y Agilent ha desempeñado diversos cargos relacionados con la planificación y marketing de productos tales como generadores de señales, analizadores de señales, medidores de potencia y equipos de prueba de conectividad inalámbrica. Actualmente es Product Manager para los equipos de pruebas de conectividad inalámbrica N4010A. Helen posee un Master en Ingeniería Electrónica y Eléctrica otorgado por la Universidad de Glasgow, Escocia.

La tecnología inalámbrica Bluetooth® ofrece un sistema de comunicación de corto alcance concebido para proporcionar conectividad de voz y datos entre dispositivos de información. Permite la conexión de redes punto a punto y punto a multipunto sin necesidad de implementar una infraestructura inalámbrica propiamente dicha. Dos o más dispositivos que comparten el mismo canal inalámbrico forman una red ad-hoc o picored (piconet). En la picored pueden operar activamente un dispositivo principal o maestro y hasta siete secundarios o esclavos [1]. A medida que la tecnología inalámbrica Bluetooth ha ido integrándose en diversos productos de consumo, también han ido apareciendo aplicaciones que requieren una mayor velocidad de transmisión de datos, como la emisión continua (streaming) de audio con calidad de CD y la transferencia e impresión de imágenes digitales. Asimismo, los usuarios de sistemas con conectividad inalámbrica de corto alcance están comenzando a exigir la posibilidad de ejecutar no una, sino múltiples aplicaciones de manera simultánea en la misma picored.

Con el fin de satisfacer dichas demandas, la tecnología inalámbrica Bluetooth ha seguido evolucionando, proporcionando recientes avances en materia de velocidad de transmisión de datos y prolongación de la vida útil de las baterías, gracias a la introducción de la tecnología Enhanced Data Rate (transmisión mejorada de datos), mayormente conocida como EDR. El sistema Bluetooth EDR es un complemento a la capa física de la especificación básica [2] que permite una velocidad efectiva de transmisión de datos entre dos y tres veces superior a la conseguida con versiones anteriores, al tiempo que mantiene su compatibilidad con las mismas. Gracias a este aumento de velocidad proporcionado por la tecnología EDR, los radios funcionan con un ciclo de trabajo

reducido, dando lugar a un menor consumo energético y a una mayor vida útil de las baterías del dispositivo inalámbrico. La tecnología EDR permite asimismo que múltiples aplicaciones puedan aprovechar de una manera más efectiva el ancho de banda disponible, obteniendo así un mayor rendimiento general.

Evolución de la tecnología Bluetooth

Los sistemas Bluetooth, definidos originalmente en la versión 1.0 (v1.0) de la especificación básica, funcionan en banda ISM (Industrial-Científica-Médica) sin licencia a 2,4 GHz. La transmisión de RF de bajo consumo proporciona comunicación entre dispositivos a distancias de entre 10 a 100 m. El sistema emplea un método de espectro ensanchado por saltos de frecuencia (FHSS) para acceso múltiple con mitigación de interferencias. La velocidad de salto nominal es de 1.600 saltos por segundo a través de 79 frecuencias de canal en la banda ISM.

La especificación básica fue modificada en la versión 1.2 (v1.2) con la introducción de la tecnología de saltos de frecuencia adaptables (AFH). Una de las razones del cambio fue la presencia de problemas de coexistencia entre los sistemas Bluetooth y 802.11 b/g WLAN. Gracias a la tecnología AFH, el sistema Bluetooth es capaz de medir la interferencia y evitar aquellos canales de frecuencia que pudieran afectar el rendimiento óptimo del sistema. De ser necesario, el sistema puede ajustar su número de canales utilizables de 79 hasta 20 [3]. Otro avance importante implementado en la v1.2 permite conseguir tiempos de conexión más rápidos. Las mejoras incorporadas en las funciones de consulta y paginación proporcionaron tiempos de conexión por debajo de 0,5 segundos, frente a los 4 ó 5 segundos obtenidos en dispositivos compatibles con la v1.0. Además, se

han conseguido otras mejoras en la calidad del enlace; utilizando retransmisión de datos cuando se producen errores y gracias a una mejora en el control de flujos mediante la introducción de nuevos tipos de paquetes, se ha conseguido mejorar la funcionalidad de los dispositivos v1.2 al tiempo que se ha mantenido la compatibilidad con las especificaciones de la v1.0.

La especificación básica del sistema ha sido actualizada recientemente mediante la introducción de tecnologías EDR en su versión 2.0 (v2.0+EDR) que permiten incluir sistemas de mayor velocidad de transmisión de datos [2]. Esta última especificación posee todas las características funcionales de la v1.2, además de incorporar dos nuevos sistemas de modulación implementados en la sección de carga útil del paquete. Estos tipos de paquetes EDR proporcionan velocidades máximas de transmisión de datos de 2 y 3 Mbps. El incremento en la velocidad máxima de transmisión por encima del valor básico de 1 Mbps se consigue al modular la portadora de RF mediante modulación diferencial por desplazamiento de fase (DPSK), lo que permite aumentar de dos a tres veces el número de bits por símbolo transmitido. Para mantener la compatibilidad con la v1.2 y proporcionar operación simultánea de radios v1.2 y v2.0+EDR en la misma picored, todos los dispositivos emplean los mismos código de acceso, cabecera y sistema de saltos de frecuencia.

Estructura de paquetes y formato de modulación

El sistema Bluetooth utiliza un sistema de duplexión por división en el tiempo (TDD) en el que el canal físico se subdivide en slots (intervalos) de tiempo. La duración del slot de tiempo depende de la velocidad de saltos de frecuencia, lo que da

lugar a una duración nominal de $625 \mu\text{seg}$. Los datos se transmiten entre el sistema principal y los secundarios en paquetes contenidos en los slots de tiempo. Todos los paquetes incluyen un código de acceso, una cabecera y una carga útil. El código de acceso se emplea para sincronización, compensación de DC offset e identificación de los paquetes en el canal físico. Los códigos de acceso se emplean también en funciones de paginación, consulta y aparcamiento de dispositivos en sistemas *Bluetooth*. La cabecera contiene información de control de enlace que incluye el tipo de paquete. La carga útil contiene voz y datos y puede también incluir información de control y corrección de errores, dependiendo del tipo de paquete transmitido.

Para mantener la compatibilidad con versiones anteriores de la especificación básica, se modula la información de código de acceso y cabecera en la portadora de RF utilizando un esquema de modulación FSK Gaussiano. Este sistema de modulación proporciona una velocidad máxima de transmisión de datos de 1 Mbps mediante la modulación de un bit por símbolo, lo que produce una velocidad de símbolo de 1 Ms/seg. Los datos de la carga útil modulan a la portadora de RF empleando un desplazamiento o desviación en la frecuencia de la portadora de un mínimo de 115 kHz. El 1 binario se representa mediante una desviación de frecuencia positiva, y el 0 binario, mediante una desviación de frecuencia negativa. El formato de modulación de la parte de la carga útil del paquete de velocidad de transmisión general también es GFSK. El paquete de velocidad de transmisión general se denomina ahora paquete de velocidad de transmisión básica en v2.0+EDR, para así diferenciar el sistema GFSK de 1 Mbps de los dos formatos de paquete EDR de mayor velocidad. La señal modulada mediante GFSK utiliza una conformación de pulsos

gaussiana para proporcionar eficiencia espectral que resulta de mantener un ancho de banda a -20 dB de 1 MHz.

En los sistemas EDR de mayor velocidad de transmisión de datos que se especifican en la v2.0+EDR, los datos de la carga útil modulan a la portadora de RF empleando uno de los dos sistemas posibles de modulación DPSK. El paquete EDR para transmisión a 2 Mbps, esencial para un dispositivo EDR, utiliza una carga útil modulada mediante desplazamiento de fase en cuadratura diferencial codificada $\Pi/4$ ($\Pi/4$ -DQPSK). Los paquetes EDR de 3 Mbps opcionales utilizan modulación por desplazamiento de fase diferencial (8DPSK). Como ejemplo de los dos formatos de modulación en un paquete EDR, la Figura 1 muestra una medida de la amplitud en relación al tiempo para una forma de onda EDR empleando modulación GFSK en el código de acceso y la cabecera, así como una modulación 8DPSK en la carga útil. Para esta forma de onda, la longitud del paquete es de aproximadamente $450 \mu\text{s}$, un valor que se encuentra den-

tro del slot de tiempo de $625 \mu\text{seg}$, especificado. La eficiencia espectral en un paquete EDR se consigue aplicando una conformación de pulsos en base a la raíz cuadrada del coseno alzado sobre la parte con modulación DPSK. Esta técnica de conformación de pulsos produce un ancho de banda a -20 dB de 1,5 MHz que es mayor que el ancho de banda que se obtiene con el formato de modulación GFSK. La FCC (Comisión de Comunicaciones Federales) ha aceptado el uso de radios *Bluetooth* EDR en la banda ISM de 2,4 GHz relajando el requisito de -20 dB de ancho de banda ocupado desde 1,0 MHz a 1,5 MHz.

Debido al cambio de modulación en el paquete EDR, se necesita más información de temporización y control para poder sincronizarse con el nuevo formato de modulación. Después de la cabecera de un paquete EDR hay un breve periodo que permite al dispositivo *Bluetooth* prepararse para el cambio de modulación a DPSK. Este breve periodo, o tiempo de guarda, está definido entre $4,75 \mu\text{seg}$. y $5,25 \mu\text{seg}$. El tiempo de guarda va seguido de una

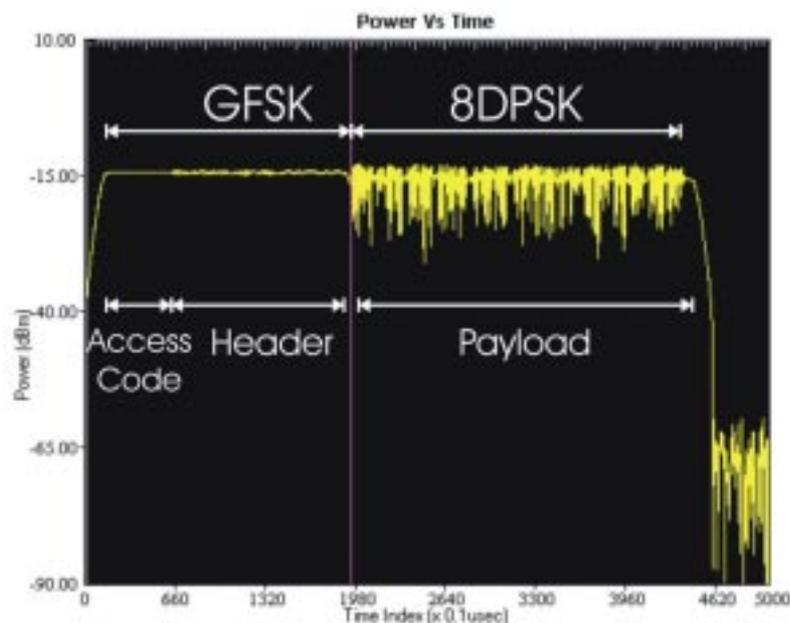
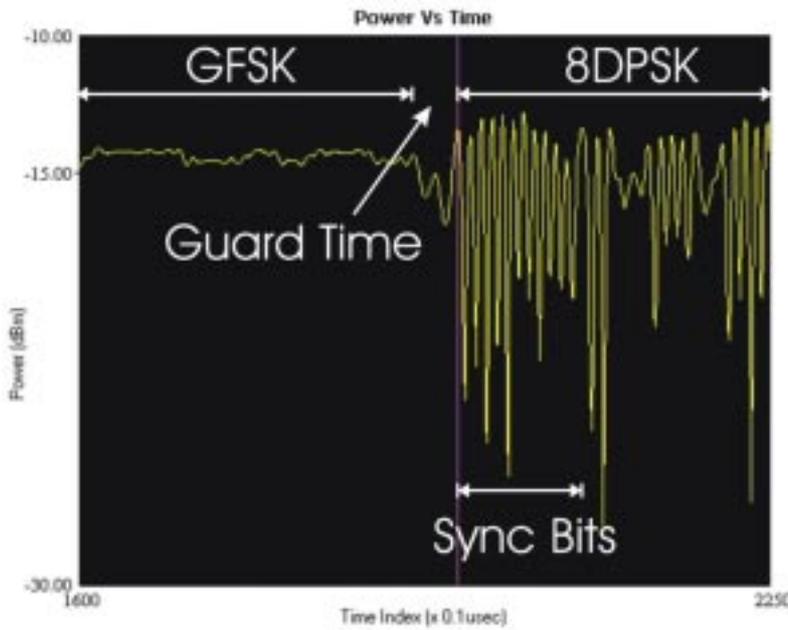


Figura 1. Medida de potencia frente a tiempo de un paquete EDR que muestra las secciones con modulación GFSK y 8DPSK del paquete.

Figura 2. Gráfico de forma de onda de potencia frente a tiempo que muestra la transición entre los sistemas de modulación GFSK y 8DPSK.



secuencia de sincronización que contiene un símbolo de referencia y diez símbolos DPSK. Esta secuencia es necesaria para sincronizar la temporización y fase de símbolo para uno de los dos tipos de modulación empleados en un paquete EDR. La Figura 2 muestra una medida de amplitud frente al tiempo para un paquete EDR en el intervalo que transcurre para que la modulación cambie de GFSK a 8DPSK. Esta figura muestra el tiempo de guarda de 5 μ seg. y los once bits de sincronización al comienzo de la carga útil EDR.

La señal con modulación de fase codificada diferencialmente que se utiliza en el sistema EDR ofrece la ventaja de poder desmodularse sin necesidad de calcular la fase de portadora. En este caso, la señal recibida en cualquier tiempo de símbolo dado se compara con la fase del símbolo precedente [4]. Como se ha indicado anteriormente, el formato de modulación codificado diferencialmente definido para la transmisión a 2 Mbps es $\Pi/4$ -DQPSK. La constelación $\Pi/4$ -DQPSK puede considerarse como la superposición de dos

constelaciones QPSK desplazadas 45 grados entre sí. Para cada tiempo de símbolo, las fases de símbolo se seleccionan alternativamente de una

constelación QPSK a la otra. De este modo, los símbolos sucesivos tienen una diferencia de fase relativa que coincide con uno de los cuatro ángulos $\pm\pi/4$ y $\pm3\pi/4$. Las transiciones de símbolo de una constelación a la otra garantizan que siempre haya un cambio de fase entre símbolos, lo que facilita la recuperación de reloj [4]. La Figura 3 muestra la constelación $\Pi/4$ -DQPSK para la parte EDR de un paquete. Esta figura muestra una medida obtenida de muchos símbolos que acaban formando los ocho puntos de constelación deseados.

Cabe destacar que durante un tiempo de símbolo específico, sólo hay disponibles cuatro puntos de constelación o transiciones, lo que produce la transmisión de dos bits por símbolo. Esta figura muestra la combinación de dos constelaciones QPSK distintas desplazadas 45 grados e identificadas A, B, C y D para una constelación y 1, 2, 3 y 4 para la otra.

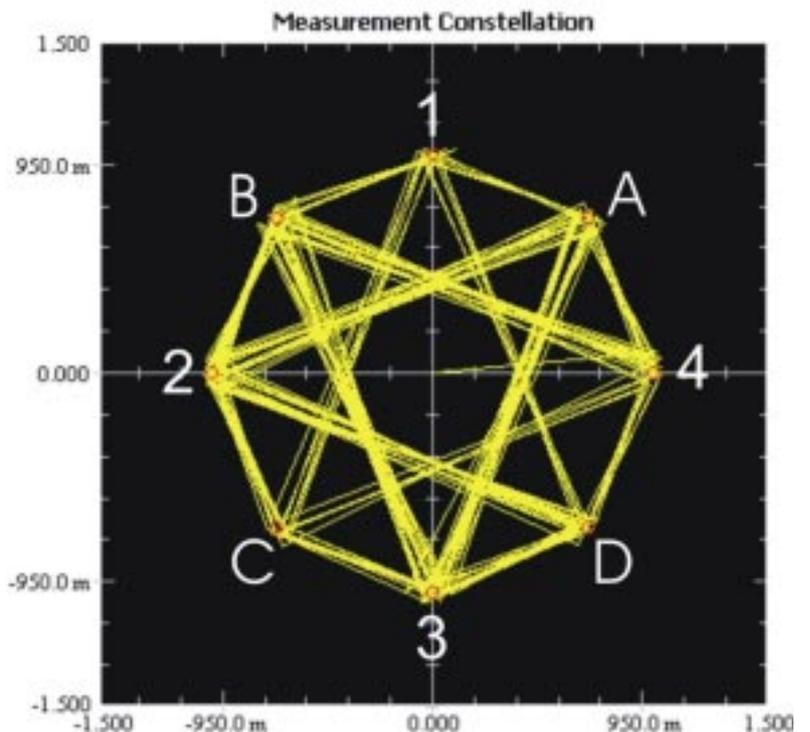


Figura 3. Constelación de medida de una carga útil EDR utilizando modulación $\Pi/4$ -DQPSK

El segundo formato de modulación EDR definido para la transmisión de 3 Mbps es 8DPSK. El incremento adicional en la velocidad de transmisión de datos se consigue añadiendo otros cuatro puntos de constelación para cada símbolo. El total de ocho puntos de constelación permite una transmisión de tres bits por símbolo, lo que supone multiplicar por tres la velocidad de transmisión de datos si se compara con el sistema de modulación GFSK. Este tipo de modulación ofrece muchas de las ventajas del $\Pi/4$ -DQPSK, incluido el uso de sistemas de desmodulación no coherentes. La desmodulación de un 8DPSK se produce examinando la diferencia de fase relativa entre símbolos sucesivos, lo que produce ángulos de fase de 0 , $\pm\pi/4$, $\pm\pi/2$, $\pm3\pi/4$ y π . Puesto que los ocho puntos de constelación o transiciones están disponibles entre los símbolos, es posible transmitir tres bits de datos por símbolo. El incremento en la velocidad de transmisión de datos no se produce sin ningún tipo de sacrificio, ya que una señal con modulación 8DPSK es más sensible al ruido. Esto se debe a que existe una menor separación entre los puntos de la constelación si se compara con las señales de $\Pi/4$ -DQPSK.

Procedimientos y escenarios de prueba de EDR

Con la introducción de la tecnología EDR en la especificación básica de *Bluetooth*, se han añadido medidas adicionales específicas de EDR al procedimiento de prueba de la capa de RF y a la especificación (TSS/TP) [5]. Estas nuevas medidas permiten realizar verificaciones provisionales de los dispositivos *Bluetooth* en funcionamiento sin bucle de retorno que pueden resultar muy útiles durante las primeras etapas de desarrollo de los radios. Las pruebas de EDR específicas para los transmi-

sores son: potencia relativa de transmisión, estabilidad de frecuencia de la portadora, precisión de modulación y codificación de fase diferencial. Las pruebas de EDR específicas para los receptores *Bluetooth* son: sensibilidad, nivel mínimo de tasa de error de bit (BER) y nivel máximo de entrada.

Escenarios de prueba para transmisores de EDR

La prueba de potencia relativa de transmisión de EDR verifica que la diferencia entre la potencia de transmisión media en la modulación GFSK y la potencia de transmisión media en la modulación DPSK se encuentra dentro del rango especificado de entre +4 y -1 dB. La potencia relativa se calcula a partir de la diferencia entre el valor de potencia media tomado a partir de un mínimo del 80% de la parte GFSK del paquete y el valor de potencia media tomado a partir de un mínimo del 80% de la parte DPSK. La Figura 4 muestra el valor de la potencia relativa de transmisión de una señal EDR empleando modulación $\Pi/4$ -DQPSK con la portadora de RF en la frecuencia de banda media de 2.441 MHz. Como puede verse en la Figura 4, los valores de la potencia media para las formas de onda GFSK y $\Pi/4$ -DQPSK son de -14,4 dBm y -16,22 dBm, respectivamente. La potencia relativa de transmisión resultante será de +1,82 dB y se encuentra dentro de la diferencia especificada de -1 y +4 dB.

La prueba de estabilidad de frecuencia de la portadora de EDR se empieza determinando el error de frecuencia central inicial en la cabecera GFSK. Las desviaciones de frecuencia en los bits lógicos 1 y 0 se miden y expresan como $\Delta\omega_1$ y $\Delta\omega_2$, respectivamente.

El error de frecuencia inicial se calcula como el error de frecuencia media entre los bits lógicos 1 y 0 y

se expresa como error de frecuencia inicial, $\Omega_i = [\Delta\omega_1 + \Delta\omega_2] / 2$. El error de frecuencia inicial está especificado en un valor entre ± 75 kHz.

El error de frecuencia en la parte EDR del paquete se corrige empleando este error de frecuencia inicial, Ω_i . A continuación, la forma de onda corregida se divide en 200 bloques de 50 símbolos de longitud. El error de frecuencia restante de cada bloque se expresa como ω_0 . El mayor error de frecuencia de bloque, Ω_o , está especificado en un valor entre ± 10 kHz. Por último, la especificación *Bluetooth* limita el valor máximo de la combinación de errores de frecuencia $\Omega_i + \Omega_o$ a un valor entre ± 75 kHz. Este valor representa la desviación máxima del error de frecuencia e incluye el error inicial en el código de acceso y la variación de frecuencia que puede producirse a lo largo de los bloques medidos. Como ejemplo de medida, la Figura 4 muestra la estabilidad de frecuencia de una forma de onda EDR. En este caso, la medida ofrece los resultados siguientes: estabilidad de la frecuencia inicial de -5,997 kHz, error de frecuencia del bloque de -0,857 kHz y combinación de errores de frecuencia de -6,854 kHz. Todos estos valores medidos se encuentran dentro de las especificaciones requeridas.

La prueba de precisión de modulación de EDR verifica la calidad de la modulación diferencial y sirve para resaltar los errores que producirían problemas en un receptor diferencial real. La precisión de modulación se prueba empleando un valor para la magnitud del vector de error diferencial (DEVm) que es similar al valor de la magnitud del vector de error (EVM) estándar especificado en otros sistemas de comunicaciones digitales [6]. El DEVm se define como la magnitud del error entre dos señales recibidas separadas en el tiempo por un símbolo. La medición del DEVm se realiza sobre una secuencia de sincronización y carga útil de

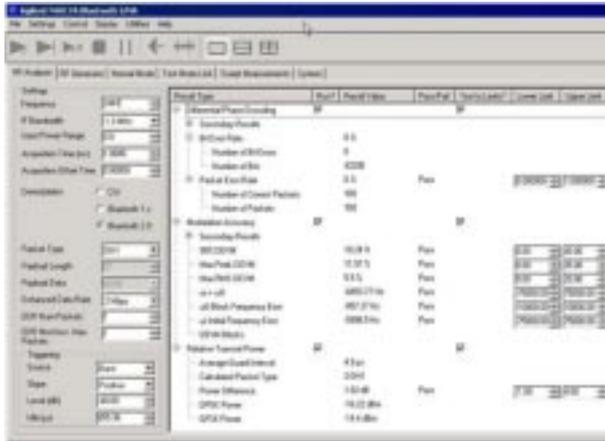


Figura 4. Medición de un paquete EDR utilizando modulación P/4-DQPSK.

200 bloques de 50 símbolos cada uno. La precisión de modulación se expresa como tres valores distintos: 99% DEVM, RMS DEVM y DEVM pico [1].

La Figura 4 muestra la precisión de modulación para la forma de onda EDR medida utilizando una modulación P/4-DQPSK. Los valores de 99% DEVM, DEVM pico y RMS DEVM para esta señal se miden y expresan en forma de porcentajes como 10,24%, 11,57% y 5,5%, respectivamente. Como puede observarse en la figura, todos los valores medidos de DEVM para esta forma de onda se encuentran dentro de las especificaciones requeridas.

La prueba de codificación de fase diferencial verifica la operación del modulador PSK diferencial utilizado en el transmisor. Para calcular la carga útil de EDR, el modulador debe asignar correctamente el flujo de datos binarios a una serie de ángulos de fase especificados en el plano complejo. La carga útil de EDR se modula con una secuencia de PRBS9 y se realiza una medida de tasa de errores de paquete en 100 paquetes. De acuerdo con la especificación, el 99% de los paquetes se recibirán sin errores de bit, es decir, con tasa de errores de paquete inferior al 1%. La Figura 4 muestra la tasa de errores de paquete para una forma de onda EDR medida al 0%, es decir, sin que se encuentren errores.

Escenarios de prueba para receptores de EDR

Las pruebas con receptores *Bluetooth* EDR requieren la medición de la tasa de error de bit (BER) empleando señales de prueba que contienen diversas perturbaciones de frecuencia y temporización. Todas las medidas de BER de los receptores se calculan en 16.000.000 bits y comparando los datos recibidos con la secuencia PRBS9 original transmitida por la fuente o el equipo de prueba.

La sensibilidad de EDR se mide empleando tres grupos de 20 paquetes alterados de manera que incluyen diferentes errores de temporización y desviaciones de frecuencia [5]. El primer grupo de paquetes no presenta perturbaciones.

El segundo grupo de paquetes contiene una desviación de frecuencia de la portadora de +65 kHz y un error de temporización de símbolo de +20 ppm.

El tercer grupo de paquetes contiene una desviación de frecuencia de la portadora de -65 kHz y un error de temporización de símbolo de -20 ppm. La tasa de error de bit (BER) del receptor deberá ser de 10^{-4} en estas condiciones.

El nivel mínimo de tasa de error de bit (BER) en EDR es una medida de BER con un nivel de potencia recibida de -60 dBm.

La BER se calcula comparando los datos recibidos con una secuencia PRBS9 transmitida. En estas condiciones, la BER está especificada como 10^{-5} .

La prueba de nivel máximo de entrada en EDR muestra la BER del receptor cuando el nivel de la señal de entrada es de -20 dBm. Esta prueba muestra el rendimiento del receptor con posible compresión de entrada cuando funcione a un alto nivel de potencia de entrada. La BER se especifica como 10^{-3} cuando se utiliza este nivel de potencia de entrada.

Conclusiones

La transición a la tecnología *Bluetooth* EDR estará condicionada por la necesidad de mayores velocidades de transmisión de datos y menor gasto energético que tienen los dispositivos portátiles multimedia del mercado.

La evolución de esta tecnología proporcionará escenarios de uso múltiple en los que numerosos dispositivos funcionarán de manera simultánea en la misma piconet. Además, está prevista la aparición de nuevos dispositivos portátiles que combinarán distintas interfaces inalámbricas, tales como GPRS y WiFi, con la tecnología *Bluetooth* EDR con el fin de suministrar una conectividad simultánea y perfectamente integrada a través de múltiples tipos de redes.

Referencias

- [1] "Bluetooth Enhanced Data Rate (EDR): The Wireless Evolution", Nota de aplicación de Agilent Technologies 5989-4204EN, noviembre de 2005.
- [2] Specification of the Bluetooth System, Version 2.0+EDR, Specification Volume 1 Architecture & Terminology Overview & Volume 2 Core System Package, noviembre de 2004
- [3] Philips Semiconductors White Paper, "How 802.11b/g WLAN and Bluetooth Can Play Together" Document 9397-750-13426, junio de 2004
- [4] J.G. Proakis, "Digital Communications", 3ª edición, McGraw-Hill, 1995
- [5] Radio Frequency Test Suite Structure (TSS) and Test Purposes (TP) System Specification 1.2/2.0/2.0+EDR, 21 de marzo de 2005, Rev. 2.0.E.3, Document Number RFTS/2.0.E.3
- [6] Digital Modulation in Communications Systems - An Introduction, Nota de aplicación de Agilent 1298, 5965-7160E, 14 de marzo de 2001