

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 745 717**

51 Int. Cl.:

**H04W 16/14** (2009.01)

**H04W 52/02** (2009.01)

**H04W 64/00** (2009.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.12.2005 E 15184190 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.07.2019 EP 2991393**

54 Título: **Dispositivo de nodo para una red de sensores inalámbricos**

30 Prioridad:

**22.12.2004 FI 20041653**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**03.03.2020**

73 Titular/es:

**WIREPAS OY (100.0%)**

**Visiokatu 4  
33720 Tampere, FI**

72 Inventor/es:

**HÄMÄLÄINEN, TIMO D.;  
HÄNNIKÄINEN, MARKO y  
KOHVAKKA, MIKKO**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

**ES 2 745 717 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Dispositivo de nodo para una red de sensores inalámbricos

**Campo técnico**

La solicitud se refiere generalmente a dispositivos de nodo para redes de sensores inalámbricos.

5 **Antecedentes de la invención**

Una red de sensores inalámbricos (WSN) es un caso especial de redes inalámbricas, incluyendo las características específicas de la misma en general requisitos muy estrictos para minimizar el tamaño físico y el consumo de potencia de los dispositivos de nodo, así como papeles especializados para los nodos: una gran mayoría de los nodos son sensores que recopilan información y la transportan a ciertos nodos de sumidero de datos, que son pocos en número y pueden actuar como pasarelas que pasan la información recopilada a otras redes y sistemas. Las redes de sensores inalámbricos tienen frecuentemente una naturaleza ad-hoc, que significa que los nodos pueden ir y venir o realizar itinerancia desde una parte de la red a otra, y la propia red debe adaptarse los cambios consecuentes en topología y conectividad, necesitando a menudo capacidad de encaminamiento de múltiples saltos. Las velocidades de caudal en redes de sensores son normalmente relativamente bajas, al menos en comparación con las velocidades de datos de nivel de Mbit/s de las redes de comunicaciones entre ordenadores. Por motivos de generalidad, los accionadores también pueden considerarse como nodos; es habitual entender que la palabra "sensor" en redes de sensores inalámbricos abarca ampliamente tanto sensores verdaderos como accionadores.

Las redes de sensores inalámbricos y sus nodos se conocen en general a partir de numerosas publicaciones de la técnica anterior. Una publicación, el documento US 2004/0100917 A1, desvela un procedimiento de elección de dispositivo coordinador, el fin de lo cual es asegurar que ninguna parte de una red de sensores inalámbricos ad-hoc se quede desconectada, así como para minimizar la cantidad global de energía necesaria para configurar comunicaciones dispuestas a través de la red. La solución desvelada en ese documento se basa en distribuir un mensaje de inicialización a través de la red, después del cual cada nodo aplica un retardo aleatorio antes de difundir un mensaje de "petición de estado de coordinador". Otra publicación, el documento US 2003/0152041 A1, describe ciertas características de nivel general de redes de sensores inalámbricos, que incluyen asignación jerárquica de nodos a una pluralidad de niveles de nodo así como mantener un nodo dormido todas las veces distintas a inicializar el nodo o a hacer que realice una tarea.

Una publicación de la técnica anterior, el documento US 2002/0044533 A1, menciona las desventajas de depender de la posición espacial conocida con precisión de cada nodo, que convencionalmente requiere que cada nodo comprenda un receptor de GPS (Sistema de Posicionamiento Global). Como una alternativa más ventajosa, dicha publicación presenta un sistema en el que cada nodo averigua el conjunto completo de los otros nodos con los que básicamente podría comunicar, pero únicamente mantiene comunicaciones activas con un subconjunto de los mismos, que conduce a una manera independiente de posición para configurar y mantener la topología de red. Otra publicación de la técnica anterior, el documento CA 2 311 245 A1, considera la división de nodos en dos niveles jerárquicos, de modo que cada nodo de nivel superior rige un grupo de nodos de nivel inferior vecinos, y únicamente son necesarias comunicaciones de "línea troncal" superiores entre nodos de nivel superior.

Una publicación de la técnica anterior, el documento WO 01/69279, desvela una red de sensores inalámbricos en la que cada nodo tiene su propio dispositivo de localización, y los nodos pueden intercambiar tanto información de localización como datos de reconocimiento. El sistema está concebido principalmente para fines de reconocimiento militar. Otra publicación de la técnica anterior, el documento WO 01/26329, que es un miembro de una familia muy grande de solicitudes de patente interrelacionadas, desvela un número muy grande de detalles que en el momento de la escritura de esta descripción ya se consideran que forman el estado generalmente conocido de la técnica de las redes de sensores inalámbricos. Otra publicación de la técnica anterior más es el documento US 6.208.247 B1, que se centra principalmente en la implementación física de dispositivos de nodo para redes de sensores inalámbricos.

El documento US 6 304 556 B1 muestra un procedimiento de descubrimiento de nodo vecino llevado a cabo en una red virtual inalámbrica ad-hoc y usando señales de baliza variables.

La fuente principal de dificultades en la ruta hacia el consumo de potencia minimizado en redes de sensores inalámbricos es tradicionalmente el protocolo de comunicaciones que determina la cantidad y naturaleza de las transmisiones inalámbricas entre los nodos. El hecho de que la red deba poderse adaptar dinámicamente a la aparición y desaparición de nodos así como otros cambios en la topología de red significa que el protocolo de comunicaciones debe incluir suficientes procedimientos para descubrir posibilidades actualmente disponibles para comunicar con otros nodos, así como rutinas para determinar el orden en el que los nodos actualmente conectados comunican entre sí. El protocolo de comunicaciones debería implicar un cierto grado de escalabilidad, que significa que debería facilitar las comunicaciones de energía eficiente independientemente de cuántos nodos hayan en la red. Adicionalmente el protocolo de comunicaciones debería asegurar algún nivel mínimo requerido de caudal, es decir cantidad de información que puede transmitirse a un destino deseado a través de la red en alguna unidad de tiempo. La parte más importante del protocolo de comunicaciones se cree que es la parte MAC (Control de Acceso al

Medio).

Los protocolos conocidos para redes de sensores inalámbricos incluyen el Sensor-MAC (también conocido como S-MAC), el Timeout-MAC (T-MAC) y el IEEE 802.15.4 la norma de Red de Área Personal Inalámbrica de Baja Velocidad (LR-WPAN). De estos, se ha descrito el S-MAC en la publicación científica W. Ye, J. Heidemann, y D. Estrin: "Medium access control with coordinated, adaptive sleeping for wireless sensor networks", ACM/IEEE Trans. Networking, vol. 12, Nº 3, págs. 493-506, junio de 2004. Utiliza una estructura de intervalos común en un esquema de MAC de Acceso Múltiple por Detección de Portadora (CSMA). Los nodos se planifican para reactivarse e ir a espera periódicamente, lo que reduce el consumo de energía significativamente en comparación con CSMA convencional. Un intervalo S-MAC consiste en una transmisión de sincronización de tipo baliza corta, un periodo activo de longitud fija (300 ms) para intercambio de datos, y un tiempo de espera hasta el final del intervalo. Cada nodo se reactiva en el comienzo de un intervalo y cualquier nodo que desee transmitir datos realiza acceso al canal CSMA/CA con una toma de contacto RTS/CTS (Petición Para Enviar / Liberación Para Enviar). La longitud del intervalo es un parámetro MAC predefinido y estático en el orden de 500 ms a 10 s. En la implementación más reciente, el protocolo S-MAC realiza exploración de la red de 10 s de duración cada 2 minutos. Evidentemente, la exploración de red consume una cantidad alta de energía.

La norma IEEE 802.15.4 LR-WPAN es un miembro de la familia del IEEE 802.15.X de normas WPAN y se ha descrito en "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)", IEEE Std 802.15.4 - edición del 2003. Utiliza acceso de canal CSMA/CA con uso opcional de estructura de supertrama, que es bastante similar a la estructura de intervalos S-MAC. Una red LR-WPAN consiste en coordinadores, que proporcionan servicios de sincronización y encaminan datos en una red, y dispositivos, que pueden comunicar con coordinadores. Los coordinadores controlan sus estructuras de supertrama transmitiendo balizas en el comienzo de cada supertrama. Una baliza se sigue por un Periodo de Acceso de Contienda (CAP), durante el cual los nodos de red pueden transmitir datos y peticiones a un coordinador usando CSMA/CA. El tipo de asignación especializada opcional Intervalos de Tiempo Garantizados (GTS) después de CAP reduce la contienda y latencia. El CAP y el GTS se siguen opcionalmente mediante un periodo inactivo hasta una siguiente baliza durante la que los nodos pueden pasar al modo en espera. El periodo de baliza y la longitud de supertrama son variables entre 15,4 ms a 252 s, que posibilita un equilibrio entre latencia y consumo de energía. Los nodos LR-WPAN realizan exploración de red periódicamente a través de un conjunto de canales de RF. Cada canal se recibe para un intervalo de baliza o hasta que se ha recibido un número especificado de balizas. El tiempo de exploración del peor caso es por encima de 67 minutos, cuando se explora el intervalo de baliza máximo y todos los 16 canales especificados para la banda de frecuencia de 2,4 GHz. Esto equivale a la energía de varios millones de transmisiones de baliza. Evidentemente, la energía consumida para exploración de red puede ser muy alta.

Un desarrollo adicional a LR-WPAN anteriormente descrito se conoce como el ZigBee y se describe en línea en el sitio web oficial de la alianza ZigBee (<http://www.zigbee.org>). Incluye definiciones de capa de red y de seguridad y perfiles de aplicación y soporta listas de control de acceso, temporizadores de refresco de paquetes y ciertas normas de cifrado.

Otra sugerencia de protocolo es el Control de Acceso al Medio de Auto-Organización para Redes de Sensores (SMACS), descrito en la publicación científica K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, y G. J. Pottie: "Protocols for self-organization of a wireless sensor network" IEEE Personal Communications, vol. 7, Nº 5, págs. 16-27, octubre de 2000. Posibilita a los nodos descubrir sus vecinos, desde enlaces, y establecer planificaciones para transmisión y recepción sin la necesidad de nodos maestros. Una red usa topología entre pares con Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA), en la que cada enlace opera en diferentes canales de RF. El protocolo SMACS se basa en nodos inalámbricos fijos. Sin embargo, el protocolo tiene una extensión para gestión de movilidad mediante un algoritmo de Escucha Clandestina-Y-Registro (EAR), que posibilita la interconexión de nodos móviles en el campo de nodos inalámbricos fijos. SMACS posibilita eficiencia de energía bastante alta debido a los intervalos de intercambio de datos planificados. Las desventajas son altos requisitos de rendimiento para cada nodo y el soporte para movilidad únicamente limitada.

La Arquitectura de Grupo Unido (LCA) es una solución que se ha conocido ya durante aproximadamente veinte años. Se describió en primer lugar en la publicación científica D. Baker, y A. Ephremides: "The architectural organization of a mobile radio network via a distributed algorithm", IEEE Trans. Communications, vol. 29 Nº 11, págs. 1694-1701, noviembre de 1981. Mejora la escalabilidad organizando la red en un conjunto de grupos, teniendo cada uno una cabecera de grupo, que actúa como un controlador local. Los otros nodos son nodos normales, o nodos de pasarela, que ambos están en alcance de comunicación directa con la cabecera del grupo. LCA utiliza MAC de Acceso Múltiple por División en el Tiempo (TDMA) con intervalos de tiempo especializados para cada nodo. La transferencia de datos regular se suspende periódicamente mediante una fase de control para realizar un algoritmo de agrupación distribuido, durante el que se detectan los nodos vecinos y se elige la función de nodo lógico. En LCA, los nodos registran y mantienen información acerca de su entorno inmediato, que hace al protocolo bastante bien escalable. La desventaja es que LCA utiliza una estructura de trama de TDMA global, que requiere un reloj global. Adicionalmente puesto que los nodos únicamente conocen sus grupos vecinos, no se soporta el encaminamiento de múltiples saltos.

Otro protocolo conocido más es la Jerarquía de Agrupación Adaptativa de Baja Energía (LEACH) descrito en la

publicación científica W. Heinzelman, A. Chandrakasan, y H. Balakrishnan: "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks", IEEE Trans. Wireless Communications, vol. 1, Nº 4, págs. 660-670, octubre de 2002. Es un protocolo MAC de asignación especializada con topología agrupada. LEACH extiende la jerarquía de red mediante una estación base, que actúa como una raíz en una red. Las cabeceras de grupos y la estación base emplean únicamente comunicaciones directas. Por lo tanto, se utiliza una topología en estrella en dos niveles jerárquicos. El protocolo LEACH mejora la eficiencia de energía de red total permitiendo a la mayoría de los nodos transmitir a cortas distancias, y requerir que únicamente las cabeceras del grupo usen alta potencia de transmisión para comunicar con una estación base. En consecuencia, las cabeceras de grupo tienen una vida de batería más corta que otros nodos, que puede reducir el tiempo de vida de la red global. Para distribuir el consumo de energía más uniformemente, LEACH propone rotar cabeceras de grupo aleatoriamente. Una desventaja es que la escalabilidad de la red está limitada por la cobertura y el rendimiento de la estación base.

Todas las sugerencias de protocolo conocidas incluyen desventajas que hacen inadecuado para usarse como el protocolo de comunicaciones para la red de sensores inalámbricos de baja potencia final. Muchos de ellos simplemente requieren demasiadas transmisiones para calificar como soluciones verdaderamente de baja potencia. En otros, el tiempo que un nodo típicamente necesita para la exploración de la red es prohibitivamente largo. Un problema específico que surge en muchos protocolos avanzados de otra manera es que requieren usar hardware bastante complejo en cada nodo, por ejemplo para medir de manera repetitiva y almacenar múltiples valores de RSSI (Indicadores de Intensidad de Señal Recibida).

### Sumario de la invención

Un objetivo de la invención es retirar los inconvenientes mencionados anteriormente. Otro objetivo de la invención es presentar una solución de comunicaciones para una red de sensores inalámbricos que posibilita reducir el consumo de potencia global de los nodos a un nivel en el que no necesitan necesariamente ninguna batería u otra fuente de energía renovable o sustituible sino que puede recoger su energía requerida a partir de fuentes secundarias, como vibración, luz ambiental, diferencias de temperatura o similares. Otro objeto de la invención es presentar una solución de comunicaciones que posibilita gestión de red eficiente, por ejemplo, evitando tiempos de exploración de red prohibitivos. Otro objeto más de la invención es presentar una solución de comunicaciones que posibilita la selección de potencia de transmisión y/o determinación de distancia de transmisión sin tener que medir de manera repetitiva el nivel de potencia de señal recibida o cantidad explícita similar.

Para conseguir los objetos de la invención, se consideran varios aspectos y puntos de vista. Una disposición ventajosa para asignar recursos de comunicaciones se encuentra que consiste en una combinación de canalización de frecuencia y acceso de canal a intervalos de tiempo, significando lo último una combinación de MAC a intervalos y acceso múltiple por división en el tiempo y que implica adicionalmente una combinación de acceso aleatorio e intervalos reservables. La gestión de potencia está basada más ventajosamente en transmitir ciertas señales de baliza a al menos dos niveles de potencia en serie, de modo que un dispositivo de recepción pueda deducir cuál es el mínimo nivel de potencia requerido para transmisión a través de una cierta conexión inalámbrica. Se reduce la exploración de red innecesaria transmitiendo las denominadas balizas en reposo, que indican tiempo a un tiempo de recepción útil posterior. Se proporcionan posibilidades para circular el turno de actuación en el papel de mayor demanda de potencia entre los nodos de red.

La invención se aplica a un dispositivo de nodos de una red de sensores inalámbricos, estando caracterizado el dispositivo de nodos por las características indicadas en la parte caracterizadora de la reivindicación independiente 20 dirigida a un dispositivo de nodos.

Una red de sensores inalámbricos tiene una topología que se asemeja a un grupo de estrellas interconectadas. Un número de subnodos se comunica con un nodo de cabecera, constituyendo por lo tanto un grupo. Las comunicaciones entre grupos tienen lugar a través de conexiones entre los nodos de cabecera de los grupos. Cada grupo tiene una frecuencia de comunicaciones específica de grupo para su uso al transmitir información entre los subnodos y el nodo de cabecera del grupo. Se aplica un esquema de acceso múltiple por división en el tiempo específico de grupo en cada grupo, que contiene tanto intervalos de acceso aleatorio como intervalos reservables. Adicionalmente existe una frecuencia de señalización específica de red para su uso al transmitir señales de baliza de red.

Existen dos tipos de señales de baliza. Cada nodo de cabecera transmite señales de baliza de red en la frecuencia de señalización específica de red de acuerdo con un cierto horario. Adicionalmente cada nodo de cabecera transmite señales de baliza de grupo en la frecuencia de comunicaciones específica de grupo de acuerdo con un cierto horario. Más ventajosamente una transmisión de baliza consiste en al menos dos apariciones de una trama de baliza en serie, transmitiéndose cada aparición a un nivel de potencia diferente (pero predeterminado). Un nodo de recepción averigua cuál es el nivel de potencia de transmisión más bajo en el que puede recibir aún la trama de baliza apropiadamente, y usa este hallazgo para estimar la distancia entre él y el nodo que emitió la transmisión de baliza, y/o el nivel de potencia por defecto que debería usar para transmitir información en la dirección inversa a ese nodo.

Cada grupo tiene un denominado ciclo de acceso, que es un periodo de tiempo de aparición de manera repetitiva

durante el que tiene lugar un cierto periodo de comunicaciones activas (basado en TDMA) y un periodo en reposo relativamente largo. Esta división en un periodo de comunicaciones y periodo en reposo se conoce generalmente como MAC a intervalos. Si un nuevo subnodo quisiera unirse a un cierto grupo o si el nodo de cabecera de otro grupo quisiera establecer una conexión con el nodo de cabecera de dicho cierto grupo, debe realizar en primer lugar exploración de red, es decir recibir continuamente o de acuerdo con algún horario de recepción hasta que conozca la temporización y frecuencia usadas para la transmisión en dicho cierto grupo. Un periodo de recepción continuo requerido puede hacerse relativamente largo, si el periodo en reposo es continuo y ocupa una mayor parte del ciclo de acceso. Es ventajoso transmitir "balizas en reposo" durante el periodo en reposo, que anuncian al menos cuándo tendrá lugar el siguiente periodo de comunicaciones. Si cada nodo de cabecera transmite balizas a intervalos regulares ("periodo de baliza"), la recepción continua para la duración de un periodo de baliza debería asegurar que se averiguará la temporización y frecuencia de todos los grupos vecinos. Un nodo de cabecera puede preferir realizar exploración de red para la duración de un periodo de baliza completo, mientras un subnodo (o un nodo de cabecera con bajas reservas de energía) únicamente necesita recibir continuamente hasta que recibe la siguiente transmisión de baliza, sea una transmisión de baliza real o una en reposo. En cualquier caso un límite de tiempo máximo útil para la exploración de red es un periodo de baliza.

Para operar como un nodo de cabecera, un dispositivo de nodo debe tener más capacidades extensivas que las que son necesarias para operar como un subnodo. Por lo tanto, parecería ser lógico proporcionar dos tipos de dispositivos de nodo, de los cuales alguno se uniría únicamente a una red de sensores inalámbricos como subnodos mientras que otros tomarían las responsabilidades de los nodos de cabecera. Por otro lado, puesto que operar como un nodo de cabecera consume más energía que operar como un subnodo, y puesto que los recursos de la energía disponible pueden ser más o menos iguales para todos los dispositivos de nodo (especialmente si los nodos recogen energía de su entorno), es ventajoso si los nodos pueden circular la responsabilidad del nodo de cabecera entre ellos mismos. Esto es posible únicamente si existe un "exceso" de nodos que pueden operar como un nodo de cabecera. Una red de sensores inalámbricos puede consistir en una mezcla de dos tipos de nodos, o como alternativa de nodos de un tipo que únicamente pueden operar como nodos de cabecera si se requiere.

Las características novedosas que se consideran como características de la invención se exponen en particular en las reivindicaciones adjuntas. La propia invención, sin embargo, tanto en cuanto a su construcción como su procedimiento de operación, junto con objetos adicionales y ventajas de la misma, se entenderá mejor a partir de la siguiente descripción de realizaciones específicas cuando se leen en relación con los dibujos adjuntos.

Las realizaciones ejemplares de la invención presentadas en esta solicitud de patente no se han de interpretar para imponer limitaciones a la aplicabilidad de las reivindicaciones adjuntas. El verbo "comprender" se usa en esta solicitud de patente como una limitación abierta que no excluye la existencia también de características no indicadas. Las características indicadas en las reivindicaciones dependientes son mutuamente combinables de manera libre a menos que se indique explícitamente de otra manera.

### **Breve descripción de los dibujos**

- La Figura 1 ilustra topología ejemplar de una red de sensores inalámbricos,
- La Figura 2 ilustra características de protocolo en una red de sensores inalámbricos,
- La Figura 3 ilustra un ciclo de acceso y una estructura de supertrama,
- La Figura 4 ilustra la división esquemática de energía consumida para diversos fines,
- La Figura 5 ilustra ciertas consideraciones relacionadas con optimización de velocidad de baliza,
- La Figura 6 ilustra ciertas otras consideraciones relacionadas con optimización de velocidad de baliza,
- La Figura 7 ilustra ciertas otras consideraciones más relacionadas con optimización de velocidad de baliza,
- La Figura 8 ilustra estructuras de trama en una red de sensores inalámbricos,
- La Figura 9a ilustra aspectos de exploración de red,
- La Figura 9b ilustra aspectos de asociación de nodo,
- La Figura 10 ilustra transferencia de datos en una red de sensores inalámbricos,
- La Figura 11 ilustra dispositivo de nodo ejemplar de acuerdo con una realización de la invención,
- La Figura 12 ilustra arquitectura de software en un dispositivo de nodo de acuerdo con una realización de la invención,
- La Figura 13 ilustra ciertos nodos de cabecera que toman parte en minimización de latencia de datos y
- La Figura 14 ilustra horarios de transmisión de los nodos de la Figura 13.

### **Descripción detallada de la invención**

La siguiente descripción analizará diversos aspectos de la presente invención en más detalle.

#### **TOPOLOGÍA DE RED**

La Figura 1 es una ilustración gráfica ejemplar de la topología de una red 100 de sensores inalámbricos. Hay un número de nodos que actúan como nodos de cabecera, mostrados como círculos negros, como los nodos de cabecera 101 y 111. Cada nodo de cabecera tiene uno o más subnodos 102 o 112, mostrados como círculos blancos pequeños, que comunican directamente con el nodo de cabecera. Juntos un nodo de cabecera y los

subnodos que comunican directamente con dicho nodo de cabecera constituyen un grupo 103 o 113. Las comunicaciones entre grupos tienen lugar a través de conexiones entre pares entre los nodos de cabecera. Se soportan múltiples saltos y se posibilita básicamente las comunicaciones entre un par arbitrariamente seleccionado de nodos en la red.

5 Algunos de los nodos pueden actuar como nodos de sumidero, que significa que son usuarios de información (mientras los otros nodos son principalmente productores de información) y pueden proporcionar conexiones de pasarela a otros sistemas y/u otras redes. Los nodos de sumidero se muestran como círculos blancos grandes, como el nodo 104 de sumidero. Es ventajoso - aunque no obligatorio - que un nodo de sumidero actúe como un  
10 concentrador de datos que recopila información producida mediante subnodos de tipo sensor y la transporta a una unidad de procesamiento central. Es posible que un nodo de sumidero realice peticiones a la red y recopile únicamente aquella información en la que un accionador, un usuario u otra parte esté actualmente interesado. Para limitar la congestión en trayectorias de transferencia que conducen a nodos de sumidero es ventajoso crear en la red una tendencia intrínseca para agregar datos. Un nodo de sumidero no se le impide producir información; en otras  
15 palabras la división en nodos productores de información y nodos usuarios de información no es necesario que sea definitiva. Adicionalmente debería observarse que los nodos de sumidero no son necesarios para la operación de la red de sensores inalámbricos; es posible también que un nodo de sumidero se ponga únicamente en la red de vez en cuando para recopilar información acumulada.

A diferencia de las celdas de sistemas de radio celulares, un grupo no se pretende que tenga un área de cobertura definida; ni que haya un objeto particular para proporcionar cobertura geográfica extensiva o continua. La capacidad de las comunicaciones es únicamente necesaria en áreas donde hay nodos, y por otro lado los nodos están adaptados para proporcionar junto con las comunicaciones requeridas capacidad por sí mismos sin configuración exterior. El número de subnodos en cualquier grupo puede variar dinámicamente, pueden configurarse nuevos grupos, pueden disolverse o dividirse grupos antiguos, y "la red troncal" de conexiones entre nodos de cabecera  
20 puede cambiar su topología dependiendo de cuáles de los dispositivos de nodo se elijan para actuar como nodos de cabecera. Una red de sensores inalámbricos por lo tanto se auto-configura y es dinámicamente adaptativa a cambios tales como aparición y desaparición de nodos de cabecera y subnodos, cambios en las localizaciones físicas de los nodos, cambios en las condiciones de propagación de señal entre los nodos y así sucesivamente. Se encuentran diferencias adicionales a los sistemas de radio celulares en el protocolo MAC, que se describirá en más  
25 detalle más adelante.

Con respecto a las capacidades y funcionalidad de los dispositivos de nodo, se puede suponer que hay los denominados Dispositivos de Funcionalidad Reducida (RFD), que pueden actuar únicamente como subnodos, así como Dispositivos de Funcionalidad Completa (FFD), que pueden actuar como subnodos o como nodos de cabecera. Las designaciones "RFD" y "FFD" son específicas a la norma del IEEE 802.15.4 LR-WPAN, por lo que su  
35 uso en este punto debería considerarse que ilustra un paralelismo ejemplar, sin requerir que los RFD y FFD de una red deberían ser exactamente los mismos que en dicha norma. Lo que un FFD debe tener como capacidades adicionales a aquellas de los RFD incluyen principalmente encaminamiento y agregación de datos, que se describirán en más detalle más adelante. Al menos un FFD debe existir en cada grupo. Si hay más, los FFD pueden circular la responsabilidad de actuar como el nodo de cabecera del grupo. Como una última alternativa todos los  
40 dispositivos de nodo en la red pueden ser FFD.

#### CONTROL DE ACCESO AL MEDIO EN LA PILA DE PROTOCOLO

Una pila de protocolo ventajosa que se sugiere para su uso en una red de sensores inalámbricos consiste en cinco capas como se presenta en la Figura 2. En la parte inferior de la pila está una capa 201 física, que proporciona los procedimientos de intercambio de bits a través del medio inalámbrico. En la parte superior de la misma está la capa  
45 202 MAC, que se describe en más detalle más adelante. Hacia arriba de la capa 202 MAC hay una capa 203 de encaminamiento, que gestiona datos de múltiples saltos que se reenvían entre nodos de cabecera. La capa 203 no se usa en un subnodo. Una capa 204 de transporte realiza fragmentación de datos en transmisión y desfragmentación en recepción, y normalmente también se le da la tarea de soportar comunicación de extremo a extremo entre una fuente de datos y un destino. Una capa 205 de aplicación, que en redes de sensores está estrechamente relacionada con una aplicación de sensor, depende de la función lógica de un nodo. En un subnodo,  
50 la capa de aplicación consiste en funciones de adquisición de muestra y preprocesamiento. En un nodo de cabecera se incluyen funciones de fusión de datos y distribución de recursos.

Los detalles de la capa 202 MAC se presentan en el lado a la derecha de la Figura 2. Los Puntos de Acceso de Servicio (SAP) presentan las interfaces funcionales para acceder a servicios de protocolo MAC y a la capa física.  
55 Los procedimientos 211 de gestión se ejecutan bajo demanda para formar y mantener la topología de red y gestionar la transferencia de datos. La señalización de gestión vertical con las capas de encaminamiento 203 y física 201 se maneja mediante un SAP 212 de Gestión (MSAP) y un SAP 213 de Gestión Física (PMSAP) respectivamente. Las funciones asociadas a procesamiento de datos de usuario se agrupan en el control 214 de trama, control 215 de cola, control 216 de error y acceso 217 de canal. Una capa superior (encaminamiento 203) se accede a través de un SAP 218 de Datos (DSAP) y el transeptor de la capa 201 física a través del SAP 219 de Datos Físico (PDSAP). Una implementación ejemplar de la funcionalidad 216 de control de error es una CRC  
60

(Comprobación de Redundancia Cíclica) de 16 bits de descarte con acuses de recibo positivo únicamente y retransmisión si se ha solicitado acuse de recibo pero no se obtiene antes del agotamiento de un límite tiempo predeterminado.

5 Las tramas de MAC se crean (en transmisión) y desensamblan (en recepción) mediante la función de ensamblaje de trama, que gestiona también el direccionamiento. Las cabidas útiles de datos de usuario se disponen en colas de acuerdo con sus prioridades. La función 216 de control de error realiza detección de error, acuses de recibo y retransmisiones. La función 217 de acceso de canal controla transmisiones y recepciones de trama en canales de RF usando funciones de temporización de ciclo de acceso y asignación de frecuencia. Una función de ajuste de potencia selecciona nivel de potencia de TX alto o bajo de acuerdo con la distancia de transmisión. Las prioridades de trama se controlan mediante la función de prioridades de acceso.

10 Incluso si el concepto tradicional del modelo OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos) supone que las capas de protocolo son relativamente independientes entre sí, de modo que únicamente comunican entre sí a través de interfaces inter-capa bien definidas, para minimizar el consumo de potencia es más ventajoso considerar la pila de protocolo como una totalidad. Las decisiones más cruciales que afectan directamente al ahorro de energía se realizan con respecto a la capa MAC, por lo que las otras capas deberían diseñarse de modo que puedan adaptarse a y utilizar las peculiaridades de la capa MAC en la mayor medida posible. Por ejemplo, debería crearse tan poco tráfico de control como sea posible por las otras capas de protocolo, y tal tráfico de control debería adaptarse a sí mismo a la velocidad de datos, retardo, tamaño de trama y otras restricciones impuestas por la capa MAC. Las limitaciones afectarán especialmente al protocolo de encaminamiento. No es posible cambiar continuamente y actualizar tablas de encaminamiento largas. Las rutas óptimas a todos los destinos posibles no pueden mantenerse continuamente en la memoria de todos los nodos de cabecera. Se usará más ventajosamente un protocolo de encaminamiento reactivo, que almacena en memoria la siguiente dirección de salto para cada destino necesario.

ESTRUCTURA DE CICLO E INTERVALO DE ACCESO

25 Una unidad básica de tiempo en el horario de transmisión de un grupo es el ciclo de acceso. De acuerdo con la Figura 3, el ciclo 301 de acceso consiste en una supertrama 302 y un periodo 303 en reposo. La longitud relativa en tiempo de la supertrama 302 se ha exagerado por razones de claridad gráfica en la Figura 3; aunque la longitud del ciclo 301 de acceso es un parámetro de sistema y puede variar dependiendo del caudal deseado y valores de retardo, la supertrama 302 ocupa típicamente una porción relativamente más pequeña de la supertrama de la Figura 3. Como un ejemplo, la longitud del ciclo 301 de acceso puede ser algo entre 1 y 10 segundos, mientras que una longitud sugerida para la supertrama 302 es 260 ms.

30 La supertrama 302 comprende un número de intervalos. La realización no limita el número de intervalos en la supertrama, pero un valor ventajoso se ha encontrado que es 13 intervalos, cada uno de los cuales es de 20 ms de longitud en la supertrama de 260 ms de duración ejemplar. El primer intervalo 311 de la supertrama es un intervalo de baliza de grupo, en el que el nodo de cabecera del grupo transmite una señal de baliza de grupo. De los intervalos restantes, ha sido ventajoso designar algunos intervalos como intervalos de acceso aleatorio o basados en contienda, mostrados en tachado sencillo en la Figura 3, de los cuales el intervalo 312 es un ejemplo. Puesto que el protocolo ALOHA es un ejemplo muy bien conocido de la transmisión basada en contienda sencilla, dichos intervalos pueden denominarse intervalos ALOHA. Un número ejemplar de intervalos ALOHA es cuatro. Los intervalos restantes, de los cuales el intervalo 313 es un ejemplo, son intervalos reservables. Aunque la realización que se considera que es la más ventajosa incluye tanto intervalos ALOHA como intervalos reservables en la supertrama, la realización básicamente no excluye incluso supertramas que únicamente tuvieran intervalos de uno de estos tipos, además del intervalo de baliza de grupo. Los intervalos reservables son mejores que los intervalos ALOHA en términos de eficiencia de energía, puesto que únicamente necesitan recibirse intervalos reservables asignados, que habla en favor de tener más intervalos reservables que intervalos ALOHA en la supertrama. Es imposible predecir fiablemente la aparición de transmisiones en los intervalos ALOHA, que significa que deben recibirse como una totalidad.

50 Un uso planeado de los intervalos ALOHA y reservables implica mapear tráfico de alta prioridad a intervalos de tiempo reservables en el protocolo MAC, que posibilita fiabilidad y un ancho de banda constante. Para tráfico de prioridad normal, se usan los intervalos de tiempo ALOHA. Los intervalos ALOHA no necesitan reserva, y las colisiones de tramas pueden tener lugar debido a la contienda con otros nodos. Los acuses de recibo y las retransmisiones MAC rápidas pueden utilizarse para ambas clases de tráfico, que proporciona un equilibrio entre fiabilidad y consumo de energía. La prioridad de tráfico y clases de fiabilidad y su mapeo en intervalos de tiempo se presenta en la siguiente tabla.

Prioridad de tráfico y clase de fiabilidad	Intervalos de tiempo		Acuses de recibo	
	reservable	ALOHA	activado	desactivado
Alta prioridad, alta fiabilidad	X		X	
Alta prioridad, fiabilidad normal	X			X
Prioridad normal, alta fiabilidad		X	X	
Prioridad normal, fiabilidad normal		X		X

Las tramas de datos están dispuestas en dos colas para tráfico de alta prioridad y normal. Las tramas en colas están ordenadas de acuerdo con sus clases de fiabilidad, de manera que una clase de alta fiabilidad adelanta a una clase de fiabilidad normal. También, los intervalos de tiempo ALOHA pueden utilizarse para tráfico de alta prioridad, cuando una cola de tráfico de alta prioridad se desborda. Los intervalos de tiempo reservables se asignan a nodos de acuerdo con prioridades de nodo. Se supone que los nodos de cabecera transmiten datos más importantes que los subnodos, y tienen una alta prioridad de nodo. Una prioridad de nodo normal se asigna típicamente a los subnodos.

Básicamente sería posible decidir que la señal de baliza de grupo se transmite en alguna otra localización en la supertrama que en su mismo comienzo. Sin embargo, comenzar la supertrama con la señal de baliza de grupo tiene ciertas ventajas. Es fácil para los otros nodos sincronizarse a sí mismos a la estructura de intervalo de la supertrama cuando comienza con la señal de baliza de grupo. Adicionalmente puesto que la señal de baliza de grupo contiene preferentemente la información más reciente acerca de las asignaciones de intervalo con respecto a los intervalos reservables, es bueno para los otros nodos recibir esta información antes de la aparición de los intervalos usados para intercambiar datos.

Además se ha encontrado ventajoso considerar cada intervalo como que consiste en una primera mitad y una segunda mitad. Con respecto al intervalo 311 de baliza de grupo, la primera mitad 321 se usa para transmitir una trama de baliza de grupo a un primer nivel de potencia (en este punto un nivel de potencia alto) y la segunda mitad 322 se usa para transmitir una copia esencialmente idéntica de la misma trama de baliza de grupo a un segundo nivel de potencia (en este punto un nivel de potencia bajo). El uso de diferentes niveles de potencia está relacionado con determinar la distancia entre nodos y la potencia de transmisión requerida para otras transmisiones, que se describirá en más detalle más adelante. Las mitades de los intervalos ALOHA e intervalos reservables se asignan para transmisión de enlace ascendente y enlace descendente. En este caso ejemplar la primera mitad 323 de un intervalo 313 reservable es la mitad del enlace ascendente, y la segunda mitad 324 es la mitad del enlace descendente respectivamente.

Haciendo que las mitades de enlace ascendente y enlace descendente (o más generalmente: instantes de transmisión de enlace ascendente y enlace descendente) se sigan entre sí muy rápido y en este orden facilita seleccionar la potencia de transmisión para la transmisión del enlace descendente basándose en una potencia de transmisión usada para la transmisión de enlace ascendente. Un nodo que hace una transmisión de enlace ascendente seleccionará su potencia de transmisión de enlace ascendente basándose en cómo de bien pueda recibir señales de baliza desde el nodo al que está transmitiendo, como se describirá en más detalle más adelante. La potencia de enlace ascendente seleccionada se anuncia más ventajosamente en un campo de encabezamiento incluido en la transmisión de enlace ascendente. El nodo que recibe la transmisión de enlace ascendente lee el valor de dicho campo de encabezamiento y selecciona la potencia de transmisión de enlace descendente correspondiente. La cercanía en tiempo del par de transmisión enlace ascendente-enlace descendente asegura que las condiciones de propagación de señal probablemente han permanecido esencialmente iguales.

Adicionalmente la cercanía en tiempo de los intervalos de enlace ascendente y enlace descendente juntos - así como el hecho de que la longitud de intervalo sugerida es más larga que el tiempo real que toma transmitir una trama - posibilitan un posible esquema de retransmisión rápida, en el que un acuse de recibo negativo (o la ausencia de un acuse de recibo positivo incluso si se pidió uno) para una transmisión de enlace ascendente desencadena una repetición inmediata de la transmisión de enlace ascendente durante el resto del tiempo que está realmente originalmente asignado para la transmisión de enlace descendente. Si es posible aumentar la potencia de transmisión, es normalmente ventajoso usar potencia de transmisión superior para la repetición inmediata que la que se usó para la transmisión de enlace ascendente original.

Usar intervalos de enlace descendente no es siempre necesario; al menos si la tarea principal de una red es transportar datos bastante unidireccionalmente desde subnodos a la dirección de los sumideros. Sin embargo, mantener información de encaminamiento necesita en muchos casos que la transmisión de enlace descendente sea al menos posible, aunque la capacidad de enlace descendente no necesita ser simétricamente igual a la capacidad de enlace ascendente. Adicionalmente para acuses de recibo de comunicación fiables después son necesarias tramas de datos. En tales casos es ventajoso combinar el acuse de recibo y posibles datos de enlace descendente en una trama común. Por lo tanto, la parte de enlace descendente no reduce la utilización de canal y eficiencia de energía significativamente. La creación de enlaces de datos de enlace descendente bajo bases de demanda reduciría más probablemente la eficiencia de energía mucho más. Además, la utilización de canal eficiente no es un asunto principal en las WSN, puesto que las velocidades de datos son muy bajas.

Un nodo que debería recibir datos en un intervalo reservable o que debería comprobar un intervalo ALOHA para averiguar, si contiene una transmisión, no necesita necesariamente mantener su receptor encendido durante la duración total del intervalo. Si se encuentra una transmisión, el receptor puede apagarse inmediatamente después de que se ha recibido completamente una trama (suponiendo que la longitud del intervalo sea mayor que la longitud de trama). Puesto que cada nodo está adaptado más preferentemente a realizar sus transmisiones en el mismo comienzo de un intervalo, con respecto a un intervalo vacío es suficiente que el nodo de recepción escuche la duración de una cierta ventana de tiempo antes de que pueda deducir que no provienen transmisiones. La longitud de dicha ventana de tiempo puede expresarse como  $t + p$ , donde  $p$  es el tiempo que toma transmitir una trama y  $t$  es

un tiempo adicional marginal usado para compensar errores de sincronización y tolerancias de cristal oscilante. Por ejemplo, pueden usarse los valores de  $t = 100$  microsegundos y  $p = 256$  microsegundos. Puede hacerse un cálculo de equilibrio coste y energía: usando un oscilador de cristal más preciso (y más caro) puede seleccionarse un valor más pequeño de  $t$ , que reduce consumo de energía.

5 Además de transmitir señales de baliza de grupo y emitir transmisiones de enlace descendente en los intervalos apropiados de la supertrama 302, un nodo de cabecera transmite señales de baliza de red en un canal de red. Para requerir únicamente que el nodo de cabecera tenga un único transmisor de radio, es ventajoso planificar la transmisión de las señales de baliza de red para que tengan lugar durante el periodo 303 en reposo. En la realización ejemplar de la Figura 3 un nodo de cabecera transmite una denominada señal 331 de baliza de red activa una vez durante cada ciclo 301 de acceso. En este punto la transmisión de la señal 331 de baliza de red activa se planifica para que tenga lugar en el mismo fin de cada ciclo de acceso, de modo que la señal 331 de baliza de red activa sucederá inmediatamente mediante la transmisión de la señal de baliza de grupo en el comienzo de una supertrama. Adicionalmente el nodo de cabecera transmite un número de denominadas señales 332 de baliza de red en reposo durante el resto del periodo 303 en reposo. En este punto el número de señales de baliza de red en reposo por ciclo de acceso es uno, pero podría ser cero o más de uno. El periodo 333 de baliza es la longitud de tiempo entre el comienzo de una señal de baliza de red y el comienzo de la siguiente señal de baliza de red. Si el nodo de cabecera transmite señales de baliza de red a intervalos exactamente constantes, el periodo 333 de baliza es una constante bien definida, y su inversa puede denominarse la velocidad de baliza. Si las balizas de red se transmiten a intervalos variables, puede calcularse un periodo de baliza medio y una velocidad de baliza media correspondiente.

#### USAR TRANSMISIONES DE BALIZA EN REPOSO PARA AHORRAR POTENCIA

Se puede analizar el fin de las denominadas transmisiones de baliza en reposo (ejemplificadas anteriormente a través de las señales de baliza de red en reposo) en más detalle. Una suposición común con respecto a redes inalámbricas es que mantener el número de transmisiones por ciclo de tiempo tan pequeño como sea posible conduce a ahorros mayores en energía. Sin embargo, esto no es completamente cierto. Hacer un cierto número de transmisiones de baliza "innecesarias" ayuda a mantener el tiempo requerido para exploración de red corto, que puede dar como resultado ahorrar mucha más energía que la que se consumirá haciendo dichas transmisiones. Al contrario de la creencia común, un transceptor de radio consume fácilmente más potencia en recepción que en transmisión. Un dispositivo de nodo ejemplar de acuerdo con una realización de la invención consume 20,07 mW de potencia en transmisión a un nivel de potencia de -20 dBm, 30,68 mW en transmisión a 0 dBm y 44,98 mW en recepción, cuando el microcontrolador del dispositivo de nodo está en modo activo. Adicionalmente se tiene que tener en mente que las transmisiones de baliza son breves y tienen lugar de acuerdo con una planificación bien definida, mientras la exploración de red es esencialmente continua y dura un tiempo imprevisto hasta que produce un resultado o tiene lugar un límite de tiempo, y que potencialmente existen muchos más subnodos que necesitan realizar exploración de red que nodos de cabecera que hacen transmisiones de baliza.

La Figura 4 ilustra una división esquemática de la energía que un nodo consume en comunicaciones inalámbricas en energía 401 de arranque, energía 402 de intercambio de datos y energía 403 de mantenimiento de red. De estos, la energía 401 de arranque consiste en exploración de red y recepciones de baliza para detectar nodos en un alcance así como asociación de red, que significa el intercambio de transmisiones requeridas para conectar el nodo a la red. El intervalo 411 de tiempo durante el que se consume la energía 401 de arranque puede designarse como el periodo de arranque de nodo. La energía 402 de intercambio de datos consiste en transmisiones y recepciones que se requieren para transportar los datos de cabida útil de capa superior y acuses de recibo. La energía 403 de mantenimiento de red se gasta en transmitir y recibir señales de baliza así como realizar exploración de red periódica para actualizar información de topología de red. El periodo 412 en el que el nodo gasta la energía 402 de intercambio de datos y la energía 403 de mantenimiento de red es el tiempo de vida del nodo, durante el que el nodo está disponible para participación activa en operación de red.

Las dimensiones verticales de los bloques 401, 402 y 403 son ejemplares y no hacen referencia a ningún significado cuantitativo o información acerca de la energía o potencia real. El consumo de potencia global es fácilmente el más alto durante el periodo 411 de arranque de nodo, puesto que una vez que el nodo ha adquirido suficiente conocimiento acerca de los horarios de comunicaciones y niveles de potencia requeridos, puede aplicar de manera eficaz estrategias de ahorro de energía durante el tiempo de vida 412 del nodo.

Las importancias relativas de la energía 401 de arranque, la energía 402 de intercambio de datos y la energía 403 de mantenimiento de red al presupuesto de energía de toda una red dependen de la naturaleza de la red. En una red altamente dinámica con tiempos de vida de nodo muy cortos puede ser incluso que la energía 401 de arranque sea la que domine. Sin embargo, en casos típicos los tiempos de vida de los nodos pueden ser meses o incluso años, caso en el que la importancia relativa de la energía 401 de arranque permanece insignificante.

Para modelar matemáticamente el consumo de energía de una red se necesitan ciertas definiciones. La energía  $E_x$  usada para transmitir una trama de datos es

$$E_{tx} = L_f E_l + \left( T_{st} + \frac{L_f}{R} \right) P_{tx} \quad , \quad (1)$$

donde

$L_f$  = longitud de trama en bits

$E_l$  = energía necesaria para intercambiar un bit de datos entre el controlador de nodo y el transceptor

5  $T_{st}$  = longitud en tiempo de un periodo transitorio de arranque del transceptor

$R$  = velocidad de datos de radio en bits/segundo y

$P_{tx}$  = consumo de potencia en modo de transmisión, cuando también el controlador de modo está en modo activo.

Se espera que el consumo de potencia medio durante el periodo de arranque del transceptor sea el mismo que  $P_{tx}$ . Si hay múltiples valores posibles para el nivel de potencia de transmisión, estos afectan directamente a  $P_{tx}$ , que a su vez se observa como múltiples valores de  $E_{tx}$ . Por motivos de ejemplo, se supone que hay un nivel de potencia de transmisión alto y un nivel de potencia de transmisión bajo, dando como resultado diferentes valores  $E_{tx(alto)}$  y  $E_{tx(bajo)}$ . La energía de recepción de trama  $E_{rx}$  es

10

$$E_{rx} = \left( T_{st} + T_i + \frac{L_f}{R} \right) P_{rx} + L_f E_l \quad , \quad (2)$$

donde

15  $T_i$  = longitud en tiempo de un periodo de escucha en reposo y

$P_{rx}$  = consumo de potencia en modo de recepción, cuando también el controlador de nodo está en modo activo.

Si la exploración de red siempre da como resultado recibir satisfactoriamente la siguiente señal de baliza disponible, el tiempo de exploración de red del peor caso es esencialmente igual a la inversa de la velocidad de baliza  $f_b$  (se supone que un nodo de cabecera siempre realizará exploración de red para todo el periodo de baliza, mientras un subnodo puede dejar de explorar inmediatamente después de haber encontrado un grupo adecuado, donde "adecuado" significa que el nodo de cabecera del grupo está suficientemente cerca y el grupo no aparece altamente cargado de manera prohibitiva). Por lo tanto se puede expresar la energía de exploración de red  $E_{ns}$  como

20

$$E_{ns} = \left( T_{st} + \frac{1}{f_b} \right) P_{rx} \quad . \quad (3)$$

Realmente la expresión anterior es una aproximación, porque no tiene en cuenta la energía usada para transferir los datos recibidos desde el transceptor de radio a una unidad de procesamiento del nodo. La diferencia es insignificante, sin embargo, puesto que el transceptor debe estar en modo en reserva (y no en modo de recepción) mientras se transfieren los datos a la unidad de procesamiento. El tiempo que toma cargar una trama de datos recibidos es aproximadamente 1 ms.

25

Para el fin de los siguientes cálculos se supone que las operaciones de intercambio de datos tienen prioridad superior que las transmisiones de baliza, de modo que la energía de intercambio de datos no se ve afectada por la velocidad de baliza. Una secuencia de arranque de nodo consiste en exploración de red (que puede dar como resultado recibir varias señales de baliza de red hasta que se encuentre un grupo adecuado, pero se supone que está limitado a un periodo de baliza), recepción de baliza de red, recepción de baliza de grupo, transmisión de trama de asociación y recepción de acuse de recibo. Se supone que la trama de asociación se va a transmitir en el nivel de potencia de transmisión bajo anteriormente mencionado. La expresión para una energía de arranque de nodo  $E_s$  es por lo tanto

30

$$E_s = E_{ns} + 3E_{rx} + E_{tx(bajo)} \quad . \quad (4)$$

Esto muestra que la energía de arranque de nodo es inversamente proporcional a la velocidad de baliza  $f_b$ . Con los valores ejemplares de  $L_f = 256$  bits,  $E_l = 2,3$  nJ/bit,  $T_{st} = 250$   $\mu$ s,  $R = 1$  Mbps,  $P_{tx(alto)} = 30,68$  mW,  $P_{tx(bajo)} = 20,07$  mW,  $T_i = 300$   $\mu$ s y  $P_{rx} = 44,98$  mW se obtiene una energía de arranque de nodo de 4,6 mJ para una velocidad de baliza de 10 Hz y 45 mJ para una velocidad de baliza de 1 Hz.

40

Las operaciones de mantenimiento de red se realizan continuamente durante todo el tiempo de vida de la red. Por lo tanto, es más conveniente considerar el consumo de energía sobre periodos de 1 s de operación, que equivale a consumo de potencia medio. Una potencia de mantenimiento de red media  $P_m$  se define como una suma de la potencia de exploración de red  $P_{ns}$  y potencia de intercambio de baliza  $P_b$ . Además la energía de exploración de red,  $P_{ns}$  depende de la velocidad requerida de las operaciones de exploración de red que posibilita encaminamiento de datos adecuado en la red. Esto depende de la dinámica de la red y se define como intervalo de exploración de red  $T_s$ . Como los nodos de cabecera usan distancias de comunicación más largas y encaminamiento de datos más

45

complejo, se supone que realizan exploración de red más frecuentemente que los subnodos. Por lo tanto, el intervalo de exploración de red se define por separado para nodos de cabecera ( $T_{s(h)}$ ) y subnodos ( $T_{s(s)}$ ).  $P_{ns}$  se promedia por nodo, que tiene en cuenta el número  $n_s$  de subnodos por cada nodo de cabecera. Por lo tanto, se obtiene la potencia de exploración de red mediante

$$P_{ns} = \frac{E_{ns}}{1+n_s} \left( \frac{1}{T_{s(h)}} + \frac{n_s}{T_{s(s)}} \right) . \quad (5)$$

Para obtener resultados tangibles, se puede fijar  $T_{s(h)}$ ,  $T_{s(s)}$  y  $n_s$  a algunos valores ejemplares, como 100 s y 500 s respectivamente para los intervalos de exploración de red y  $n_s =$  cuatro subnodos por cada nodo de cabecera. Adicionalmente se supone que la longitud  $T_{ac}$  de un ciclo de acceso es 4 s. En la Figura 5, la curva 501 ilustra la potencia de exploración de red  $P_{ns}$ , que disminuye rápidamente a medida que la velocidad de baliza  $f_b$  aumenta. Se obtiene una disminución desde 160  $\mu$ W a 16  $\mu$ W a medida que la velocidad de baliza aumenta desde 1 Hz a 10 Hz.

La potencia de intercambio de baliza se consume mediante transmisiones y recepciones de baliza. Además de las balizas de red transmitidas a la velocidad  $f_b$ , se transmiten balizas de grupo una vez por ciclo de acceso, la longitud del cual es  $T_{ac}$ . Por simplicidad, se supone que las balizas de grupo se van a recibir desde un nodo de cabecera únicamente. Como se ha indicado anteriormente, por razones de control de potencia es aconsejable transmitir siempre tramas de baliza dos veces, en primer lugar usando el nivel de potencia superior y posteriormente el inferior. Por lo tanto la potencia  $P_b$  consumida por el intercambio de baliza puede modelarse como

$$P_b = \frac{E_{tx(alto)} + E_{tx(bajo)}}{1+n_s} \left( f_b + \frac{1}{T_{ac}} \right) + \frac{2E_{rx}}{T_{ac}} . \quad (6)$$

La variación de  $P_b$  con  $f_b$  se representa también en la Figura 5 como la curva 502. En contraste a la potencia de exploración de red, la potencia de intercambio de baliza  $P_b$  puede minimizarse minimizando  $f_b$ . La potencia de intercambio de baliza  $P_b$  disminuye desde 71  $\mu$ W a 23  $\mu$ W a medida que  $f_b$  disminuye desde 10 Hz a 1 Hz. Como se observa en la figura, la potencia de mantenimiento de red  $P_m$ , que se representa como la curva 503, tiene un mínimo (77  $\mu$ W) en la velocidad de baliza de 5,6 Hz. A velocidades de baliza bajas por debajo de 1 Hz,  $P_m$  típicamente dobla a medida que la velocidad de baliza se reduce a la mitad. El efecto se invierte a velocidades de baliza altas por encima de 10 Hz.

A continuación, se considera el efecto del intervalo de exploración de red y el número de subnodos por nodo de cabecera en consumo de potencia de mantenimiento. Evidentemente, el aumento del intervalo de exploración de red reduce la potencia para exploración de red y desplaza la  $P_m$  mínima a velocidades de baliza inferiores. Como un ejemplo cuando  $f_b$  es 1 Hz,  $P_m$  aumenta desde 55  $\mu$ W a 833  $\mu$ W a medida que  $T_{s(h)}$  disminuye desde 500 s a 20 s. Por otro lado, el aumento de  $n_s$  reduce la potencia media por nodo consumida para transmisiones de baliza. Como los subnodos tienen típicamente intervalos de exploración de red más largos que los nodos de cabecera, el consumo de potencia de exploración de red también se reduce. Cuando  $f_b$  es 1 Hz, el aumento de  $n_s$  desde 0 a 8 reduce  $P_m$  desde 500  $\mu$ W a 150  $\mu$ W.

Un consumo de potencia de nodo media en una red de sensores inalámbricos sin exploración de red puede ser, por ejemplo, en el orden de 100  $\mu$ W. Por lo tanto, el consumo de potencia de mantenimiento de red tiene un efecto muy significativo en todo el tiempo de vida de la red. A continuación se aplica la suposición acerca del tiempo de vida de nodo largo (es decir, la energía de arranque permanece insignificante al consumo de energía de nodo total). La velocidad de baliza óptima  $f_b^*$  se determina minimizando la potencia de mantenimiento de red con respecto a la velocidad de baliza. Una función de optimización puede escribirse como

$$P_m = \frac{P_{rx} \left( T_{st} + \frac{1}{f_b} \right)}{1+n_s} \left( \frac{1}{T_{s(h)}} + \frac{n_s}{T_{s(s)}} \right) + \frac{E_b \left( f_b + \frac{1}{T_{ac}} \right)}{1+n_s} + \frac{2E_{rx}}{T_{ac}} , \quad (7)$$

donde  $E_b = E_{tx(alto)} + E_{tx(bajo)}$ . Puede observarse que existe un único mínimo en  $f_b^*$  que se obtiene ajustando  $dP_m/df_b = 0$  en (7). Esto produce

$$f_b^* = \sqrt{\frac{P_{rx}}{E_b} \left( \frac{1}{T_{s(h)}} + \frac{n_s}{T_{s(s)}} \right)} . \quad (8)$$

Por lo tanto, la velocidad de baliza óptima se determina mediante los parámetros de red  $T_{s(h)}$ ,  $T_{s(s)}$  y  $n_s$ , y los parámetros de radio  $E_b$  y  $P_{rx}$ .

La Figura 6 presenta la variación de  $f_b^*$  con  $T_{s(h)}$ , con valores de  $n_s$  como 0 (curva 601), 1 (curva 602), 4 (curva 603) y 8 (curva 604). La relación  $T_{s(s)} / T_{s(h)}$  se fija a 5. Para los parámetros dados, la velocidad de baliza óptima  $f_b^*$  varía entre 2 - 21 Hz. El aumento de los subnodos por un nodo de cabecera eleva la velocidad de baliza óptima. Aunque esto aumenta el consumo de potencia del nodo de cabecera, el consumo de potencia de red global se reduce debido a operaciones de exploración de red más cortas.

La Figura 7 presenta  $f_b^*$  como una función de  $T_{s(h)}$ , ya que la relación  $T_{s(s)} / T_{s(h)}$  equivale a 2 (curva 703), 5 (curva 702) y 10 (curva 701). Evidentemente, la reducción de la relación  $T_{s(s)} / T_{s(h)}$  aumenta la velocidad de baliza óptima, puesto que las operaciones de exploración de red se realizan más frecuentemente. Cuando  $T_{s(h)}$  es 100 s y  $T_{s(s)} / T_{s(h)}$  se reduce desde 10 a 2, la velocidad de baliza óptima aumenta desde 5,5 Hz a 9,2 Hz.

Como una conclusión de esta subsección se puede observar que la velocidad de baliza de una red de sensores inalámbricos tiene un efecto muy significativo en el consumo de potencia de mantenimiento, que se define como la suma de potencia de intercambio de baliza y potencia de exploración de red. La velocidad de baliza se optimiza con respecto al intervalo de exploración de red requerido determinado mediante la dinámica de la red y el algoritmo de encaminamiento de datos. Las estimaciones representan que la potencia de mantenimiento de red varía desde por debajo de 100  $\mu$ W a incluso varios milivatios, para que la velocidad de baliza tenga la influencia más significativa. Para el caso ejemplar anteriormente analizado, la velocidad de baliza óptima en aplicaciones típicas y una red razonablemente estable es de aproximadamente 5 Hz. Para una red dinámica que requiere exploración de red frecuente, la velocidad de baliza óptima está en el orden de 20 Hz. La función de optimización utilizada no considera las colisiones en el canal de red, que se hacen notables a velocidades de baliza superiores y redes densas. Por lo tanto, es razonable preferir velocidades de baliza por debajo de 10 Hz. De manera más importante los hallazgos con respecto a optimización de la velocidad de baliza son genéricos y pueden aplicarse a soluciones de red de sensores inalámbricos previamente conocidas, tales como la norma LR-WPAN así como los protocolos S-MAC y T-MAC. Como una norma general, en soluciones como LR-WPAN las balizas adicionales transmitidas durante el periodo inactivo del coordinador reducirían eficazmente el tiempo de exploración de red, si el intervalo de baliza fuera de otra manera largo, por encima de 1 s. En redes densas y grandes, una velocidad de baliza óptima sería un poco inferior que en el análisis anterior debido a la probabilidad de colisión superior.

#### SINCRONIZACIÓN DE TIEMPO

Aunque los grupos son asíncronos con respecto entre sí, una capacidad para ensanchar una referencia de tiempo a nivel de red entre los nodos es especialmente ventajosa si los valores de medición u otros datos debieran indicarse en el tiempo, que ayuda a evitar confusiones cuando los datos de medición que se originan desde diferentes fuentes o han recorrido a través de diferentes rutas se fusionan y agregan. Por ejemplo, realizar indicaciones de tiempo hace posible deducir la velocidad y dirección de movimiento de un objetivo en movimiento que produce resultados de medición en diversos nodos de sensor en diferentes instantes de tiempo. Esto puede requerir adicionalmente información acerca de las localizaciones de al menos algunos de los nodos; el conocimiento de localización se consigue fácilmente, por ejemplo, programando ciertos nodos fijos para conocer sus coordenadas y anunciarlos en sus mensajes de datos al nodo o nodos de sumidero.

Un requisito natural para sincronización de tiempo es que debe conseguirse con un mínimo número posible de mensajes de control transmitidos y recibidos, es decir, con una mínima energía posible consumida al distribuir la referencia de tiempo.

De acuerdo con una realización, las señales de baliza de red y las señales de baliza de grupo se usan para propagar una referencia de tiempo a través de la red de sensores inalámbricos con una precisión deseada, tal como un microsegundo. Se supone que existe un nodo en la red que tiene excepcionalmente buen acceso a tiempo de referencia externo preciso. Típicamente ese nodo es un nodo de sumidero, o puede ser un nodo de referencia de tiempo especializado equipado con un reloj preciso, un receptor de GPS o fuente de tiempo similar.

Las señales de baliza de red y las señales de baliza de grupo pueden tener diferentes papeles en propagar la referencia de tiempo. De acuerdo con una sugerencia, una trama de baliza de red contiene un tiempo completo absoluto expresado con, por ejemplo, 48 bits, que con la resolución ejemplar de un microsegundo significaría un tiempo expresable global que abarca aproximadamente nueve años. Una trama de baliza de grupo puede contener un denominado tiempo corto, que únicamente incluye un número (tal como 16 bits, que significa tiempo de 65 milisegundos que abarca con una resolución de un microsegundo) de los bits menos significativos del tiempo completo. La indicación de tiempo contenida en una trama de baliza debería expresar el tiempo en el que se transmitió esa trama de baliza.

Además de la propia indicación de tiempo, es ventajoso incluir en la transmisión de baliza un indicador de cómo de precisa se cree que es la referencia de tiempo. Un indicador sencillo es un campo de saltos de tiempo, el valor del cual es cero en el nodo que actúa como una fuente de tiempo de referencia y aumenta con uno en cada nodo que reenvía la referencia de tiempo. Un indicador más elaborado puede incluir también una indicación de cuánto tiempo ha pasado desde que el nodo de transmisión recibió una referencia de tiempo desde algún lugar cercano a la fuente de tiempo de referencia, puesto que tiene lugar desviación en todos los cristales que actúan como relojes locales en los nodos. Si un nodo tiene múltiples transmisiones de referencia de tiempo recibidas desde las que elegir, debería

seleccionar siempre la que en el indicador indica la mejor precisión posible de la referencia de tiempo.

Al menos están disponibles dos alternativas básicas para su uso como la estrategia para poner una referencia de tiempo recibida en uso. De acuerdo con una alternativa sencilla un nodo simplemente recibe una transmisión de baliza, lee la indicación de tiempo y - al menos si el indicador de precisión satisface algún criterio de aceptación - toma simplemente la referencia de tiempo en uso como un indicador del tiempo exacto en el que se recibió la señal de baliza. Incluso si tomar la referencia de tiempo en uso incluye añadir algún retardo por defecto, esta alternativa sencilla dará como resultado inevitablemente alguna imprecisión de temporización, puesto que el tiempo que toma para la transmisión propagarse a través del aire y a través del hardware de transmisión y de recepción, incluyendo el procesamiento de MAC, no se conoce con exactitud. Sin embargo, la precisión conseguida en muchos casos es suficiente, si la red no incluye ninguna aplicación que dependiera de sincronización exacta.

De acuerdo con una alternativa más elaborada y más precisa, un primer nodo transmite una referencia de tiempo en una baliza de grupo en un tiempo  $t_0$ . Un segundo nodo recibe esta baliza de grupo e indica el tiempo de recepción como  $t_1$  de acuerdo con su propio reloj. El segundo nodo almacena los tiempos  $t_0$  y  $t_1$  pero no actualiza aún su propio reloj de acuerdo con la referencia de tiempo. En un intervalo de transmisión de enlace ascendente el segundo nodo transmite una trama de datos al primer nodo en un tiempo  $t_2$ , que el segundo nodo almacena de nuevo. El primer nodo indica la recepción de dicha trama de datos como  $t_3$  y envía un número de bits menos significativos de la indicación de tiempo  $t_3$  al segundo nodo en una trama de acuse de recibo. Ahora el segundo nodo conoce todos los tiempos  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$  y puede calcular un tiempo de propagación  $t_{propagación}$  como sigue:

$$t_{propagación} = \frac{(t_1 - t_0) + (t_3 - t_2)}{2} \quad (9)$$

Ahora el segundo nodo puede actualizar su propio tiempo  $t$  como sigue:

$$t = t + (t_0 - t_1) + t_{propagación} \quad (10)$$

Se puede observar que los retardos de transferencia son típicamente más cortos de 1 milisegundo. Por lo tanto para transferir el tiempo  $t_3$  en una trama de acuse de recibo debería ser suficiente reservar algo como de 12 a 16 bits; 12 bits significarían un rango de tiempo posible de  $\pm 2$  ms, mientras 16 bits son suficientes para  $\pm 32$  ms. Un máximo de 16 bits reservados para este fin no es una reserva excesiva desde una trama. Sin embargo, si se selecciona este principio para distribuir la referencia de tiempo, debería realizarse una reserva de este tipo para tramas de enlace descendente. Para evitar complicaciones es ventajoso hacer que todos los nodos de una red de sensores inalámbricos siempre apliquen el mismo principio seleccionado para distribuir la referencia de tiempo.

Si la fuente de tiempo de referencia original fue un nodo de sumidero, la referencia de tiempo típicamente se propaga hacia abajo en la jerarquía de red similar a árbol en una dirección inversa en comparación con la propagación de datos hacia arriba a través del nodo de sumidero. Si la trayectoria óptima (obtenida desde factores como energía global, carga de nodo de cabecera, calidad de enlace) entre un nodo X y el nodo de sumidero es larga y dicho nodo X necesita una referencia de tiempo más precisa, puede obtenerla desde un nodo cercano equipado con GPS (o que pueda específicamente de otra manera) escuchando regularmente las transmisiones de (red o grupo) señal de baliza de ese nodo. El nodo X debe por lo tanto permanecer consciente acerca de la temporización y frecuencia de tanto el nodo equipado con GPS como ese nodo de cabecera adyacente a través del que transmite datos hacia el nodo de sumidero. Para mantener el consumo de energía global al mínimo no es aconsejable aumentar la exploración de red.

#### ESTRUCTURAS DE TRAMA

La Figura 8 ilustra una estructura 800 de trama ventajosa que puede usarse para transmisiones en una red de sensores inalámbricos. Utilizar un formato de trama de longitud fija reduce ligeramente la eficiencia de energía del transceptor en comparación con una posibilidad alternativa de permitir que la longitud de trama varíe dependiendo del número de bits real a transmitirse. Sin embargo, las tramas de longitud fija simplifican la gestión de memoria y la decodificación de encabezamientos, y mejoran la robustez del esquema de TDMA.

Una selección ejemplar de tipos de trama específica 13 tipos de trama, que se mapean en tres formatos de trama MAC. Un tipo de trama de baliza de red usa un formato de trama de baliza de red. En correspondencia, un tipo de trama de baliza de grupo usa un formato de trama de baliza de grupo. Todos los otros tipos de trama (es decir, datos, asociación, reserva de intervalo, acuse de recibo, asociación y reserva de intervalo combinados, acuse de recibo y reserva de intervalo combinados, datos y asociación combinados, datos y reserva de intervalo combinados, datos y acuse de recibo combinados, datos y asociación y reserva de intervalo combinados, y datos y acuse de recibo y reserva de intervalo combinados) usan un formato de trama de datos. Agregar datos, asociación, acuses de recibo y reservas para tramas comunes debería usarse siempre que sea posible, si únicamente debido a la energía transitoria requerida para arrancar un transceptor es del mismo orden de magnitud que la energía requerida para la propia transmisión. Dicha agregación ayuda también a minimizar retardos producidos por cambios de topología en la red, puesto que los datos pueden transmitirse inmediatamente con el mensaje de control apropiado (tal como un

mensaje de asociación o de reserva de intervalo). Agregar se usa también más ventajosamente mediante nodos de cabecera que transportan mensajes de datos sencillos (tal como resultados de medición) desde varios subnodos hacia un nodo de sumidero, de modo que las cabidas útiles y los datos de identificación de nodo adecuados se combinan en tramas comunes si es posible.

5 Todas las tramas son de 32 bytes de largo, que consisten en un encabezamiento 801 físico, encabezamiento 802 MAC, encabezamiento 803 específico de tipo, cabida útil 804, relleno 805 (si se requiere) y un final 806. Las longitudes ejemplares para dichos campos son 40 bits para el encabezamiento 801 físico, 64 bits para el encabezamiento 802 MAC, 136 bits juntos para el encabezamiento 803 específico de tipo, cabida útil 804 y relleno 805, así como 16 bits para el final 806.

10 Un encabezamiento 801 físico consiste en una secuencia 811 de preámbulo (por ejemplo, 8 bits) para sincronización de bits de transceptor, y una dirección 812 de red (por ejemplo, 32 bits) usada para distinguir tramas reales de ruido de fondo y para identificar una única red de sensores inalámbricos. Un encabezamiento 802 MAC comienza con un código 821 de tipo de trama (por ejemplo, 4 bits). Un campo 822 de potencia de TX (por ejemplo, 4 bits) especifica la potencia de transmisión usada para la trama actual. Los campos de dirección incluyen una dirección 823 de grupo de destino (por ejemplo, 16 bits), una dirección 824 de nodo de destino (por ejemplo, 8 bits), una dirección 825 de grupo de fuente (por ejemplo, 16 bits) y una dirección 826 de nodo de fuente (por ejemplo, 8 bits). Un campo 827 de longitud de cabida útil (por ejemplo, 8 bits) finaliza el encabezamiento 802 MAC.

15 Los formatos de un encabezamiento 803 específico de tipo y una cabida útil 804 dependen del tipo de trama. La cabida útil sin uso se rellena mediante el relleno 805 para mantener la longitud de trama fija. La longitud del relleno 805 puede obtenerse desde el campo 827 de longitud de cabida útil del encabezamiento 802 MAC. En el final de cada trama, se usa un final 806 para detección de error.

20 El encabezamiento específico de tipo de una trama de datos comienza con un campo 831 de prioridad (por ejemplo, 1 bit), que describe el nivel de prioridad de datos de cabida útil. Un campo 832 de tipo nodo (por ejemplo, 1 bit) define si el nodo de transmisión es un subnodo o un nodo de cabecera. Se pide un acuse de recibo para una trama de datos actual mediante un campo 833 de petición de ack (por ejemplo, 1 bit). Un campo 834 de estado de ack (por ejemplo, 1 bit) es para realizar acuse de recibo de una trama de datos anterior. Si se usa un campo de estado de ack más largo, o si el bit de estado de ack en el campo 834 solo solicita al dispositivo de recepción buscar un mensaje de acuse de recibo en la parte de cabida útil de la trama, o si se consigue el acuse de recibo enviando tramas de acuse de recibo específicas, el acuse de recibo puede incluir también un número de secuencia u otro identificador de la trama de datos que se realiza acuse de recibo. Una cabida útil de trama de datos contiene datos 841 de usuario transferidos entre capas de protocolo superiores.

25 El encabezamiento específico de tipo para balizas de red y de grupo comienza con un campo 835 de frecuencia (por ejemplo, 8 bits) que define el canal de RF del grupo. Un campo 836 de energía (por ejemplo, 8 bits) define la reserva de energía del nodo de cabecera. La carga del grupo, resultante del número de subnodos asociados, actividad de encaminamiento de datos, y agregación de datos, se especifica mediante un campo 837 de carga (por ejemplo, 8 bits). De acuerdo con información de energía y carga, los nuevos subnodos pueden seleccionar el nodo de cabecera más adecuado. Una cabida útil en tramas de baliza es específica de tipo. Una cabida útil de baliza de red contiene un campo 842 (por ejemplo, 32 bits) para anunciar el tiempo a la siguiente baliza de grupo, por ejemplo en resolución de 100  $\mu$ s. Por lo tanto, otros nodos pueden volver al modo en espera hasta el comienzo de una siguiente supertrama. Adicionalmente la cabida útil de baliza de red contiene un campo 843 (por ejemplo, 48 bits) para distribuir la referencia de tiempo completa, así como un campo 844 (por ejemplo, 8 bits) para transmitir un indicador de precisión de tiempo. Una cabida útil de baliza de grupo especifica una longitud 845 de ciclo de acceso (por ejemplo, 32 bits) en resolución de 100  $\mu$ s para mantener sincronización de grupo, posibles ciclos 846 en espera (por ejemplo, 8 bits) para suspender temporalmente la comunicación en un grupo, una referencia 847 de tiempo corta (por ejemplo, 16 bits), un indicador 848 de precisión de tiempo (por ejemplo, 8 bits) y una tabla 849 de asignación de intervalo de tiempo reservable (por ejemplo, 64 bits), que especifica reservas de intervalos actuales.

## PROCEDIMIENTOS DE GESTIÓN

30 Los procedimientos de gestión de una red de sensores inalámbricos especifican mecanismos para soportar auto-configuración de red y conservación de energía. Los mecanismos incluyen exploración de grupo, estimación de distancia, formación de red, asociación de grupo, reserva de intervalo y ciclos de espera. Los primeros cuatro de estos se muestran esquemáticamente como partes de las figuras 9a y 9b.

35 Un procedimiento de exploración de grupo se usa cuando un nodo necesita descubrir un grupo vecino para asociación o reenvío de datos. En la Figura 9a el procedimiento de exploración de grupo se ilustra como las etapas 901 a 906. Después de haber iniciado la exploración en la etapa 901, un nodo escucha al canal de red en el bucle que consiste en las etapas 902 y 903, intentando recibir balizas de red desde grupos vecinos. El consumo de energía para explorar es significativo, puesto que el transceptor está en la escucha en reposo y en el modo RX durante un largo tiempo. Dependiendo de la configuración, la exploración puede finalizarse después de un periodo de baliza de red ("modo temporizado"), tiempo durante el que se reciben balizas de red desde todos los grupos vecinos con una alta probabilidad. Por lo tanto el nodo se ha pasado a través de las etapas 902, 905 y 903 al menos

una vez antes de finalizar en la etapa 904. La otra alternativa es detener la exploración inmediatamente después de que se ha encontrado un grupo adecuado (es decir, se haya recibido una baliza de red en reposo o activa), que en la Figura 9a corresponde a un paso desde la etapa 905 a la etapa 906.

5 La Figura 9b ilustra el proceso de asociación con un nodo de cabecera. Para robustez, un subnodo debería asociarse con su nodo de cabecera más cercano. Después de comenzar en la etapa 911 el nodo que desea asociarse escucha la frecuencia de grupo que ha leído desde una baliza de red previamente recibida. También el momento para comenzar el procedimiento de asociación de grupo se ha determinado leyendo el valor apropiado desde una baliza de red previamente recibida. Únicamente si no sucediera la recepción de una baliza de grupo, tiene lugar un paso a través de las etapas 912 y 913 a una nueva exploración de grupo en la etapa 914. De otra manera el nodo detiene la recepción en la etapa 915 inmediatamente después de haber recibido satisfactoriamente una baliza de grupo.

10 Una medición de RSSI no se incluye típicamente por defecto en transceptores de baja potencia; ni es recomendable puesto que aumentaría la complicación del receptor y consumo de potencia. Como se ha indicado antes, de acuerdo con una realización de la invención, todas las balizas en el protocolo sugerido se transmiten dos veces usando diferentes niveles de potencia de transmisión (por ejemplo 0 dBm y -20 dBm), que producen diferentes rangos de transmisión. Si ambas balizas se considera que se han recibido satisfactoriamente en la etapa 916, un nodo estima que está en proximidad cercana de un nodo de cabecera, y selecciona la potencia de transmisión inferior para sus propias transmisiones de acuerdo con la etapa 917. De otra manera un nodo está lejos de un nodo de cabecera y la comunicación tiene lugar con la potencia de transmisión superior de acuerdo con la etapa 918. En el último caso mencionado un subnodo comienza también a descubrir si está disponible un nodo de cabecera más cercano de acuerdo con la etapa 919. Si se encuentra otro nodo de cabecera, conceptualmente tiene lugar un salto de vuelta a la etapa 916. Sin embargo, es posible también que haya disponibles únicamente nodos de cabecera "distantes", por lo que el nodo puede necesitar contenerse a sí mismo con comunicación con uno de ellos en el nivel de potencia de transmisión superior. En ese caso, es aconsejable realizar una exploración de red de vez en cuando, a una velocidad que puede ser superior que en casos donde un nodo de cabecera cercano ya está disponible, para averiguar si hay algún otro nodo de cabecera con el que el nodo pudiera comunicar en el nivel de potencia de transmisión inferior.

15 Es posible usar más de dos niveles de potencia de transmisión, transmitiendo más de dos tramas de baliza - cada una a diferentes niveles de potencia - en cada transmisión de señal de baliza, o usar selección cíclica de niveles de transmisión de baliza de modo que una primera transmisión de señal de baliza comprendería dos tramas de baliza a niveles de potencia 1 y 2 respectivamente, la siguiente transmisión de señal de baliza comprendería dos tramas de baliza a niveles de potencia 3 y 4 (o 1 y 3) respectivamente, la siguiente a niveles de potencia 5 y 6 (o 1 y 4) respectivamente y así sucesivamente hasta que se hubieran usado todos los niveles de potencia. Los nodos de recepción estimarían su distancia y nivel de potencia de transmisión requerida de acuerdo con la transmisión de baliza de nivel más bajo que pudieran recibir satisfactoriamente.

20 Cuando un nodo se activa por primera vez realiza el procedimiento de exploración de grupo. Un FFD puede establecer un propio grupo y hacerse un nodo de cabecera, o asociarse con un grupo existente y hacerse un subnodo. La decisión depende de la carga y el estado de energía de los grupos encontrados, y también la distancia estimada a ellos. La decisión se muestra esquemáticamente como las etapas 920, 921 y 922 en la Figura 9b.

25 40 Un RFD puede, evidentemente, asociarse únicamente con un grupo existente, puesto que no puede operar como un nodo de cabecera. Un establecimiento de grupo en la etapa 921 consiste en la selección de una dirección de grupo y un canal de RF de grupo, de acuerdo con la información obtenida desde grupos vecinos. Una vez que se ha establecido un grupo, otros nodos y grupos existentes pueden asociarse con él, y formar la conectividad de red global.

45 Se requiere una asociación de grupo para intercambiar datos con un nodo de cabecera de grupo. Un subnodo puede asociarse únicamente con un grupo, mientras un nodo de cabecera necesita asociarse con varios grupos vecinos para formar conectividad de múltiples saltos eficaz. Un nodo se asocia después de recibir balizas de grupo transmitiendo una petición de asociación de grupo en un intervalo ALOHA en la etapa 923. Si un nodo de cabecera recibe y acepta la petición, transmite un acuse de recibo y una dirección de nodo en la parte de enlace descendente del intervalo. Recibir el acuse de recibo en el nodo de asociación es como se muestra en la etapa 924 en la Figura 9b. Puesto que la red está preparada para tener alta dinámica, no se usan las peticiones de disociación de red separadas. Un nodo se disocia automáticamente de un grupo, si un nodo de cabecera no puede recibir datos desde un nodo durante un número de ciclos de acceso. Dicho número es un parámetro disponible para selección mediante el diseñador de la red y puede ser, por ejemplo, diez.

50 55 Un nodo puede reservar un intervalo de tiempo reservable transmitiendo una petición de reserva de intervalo en un intervalo de tiempo ALOHA. Si un nodo de cabecera recibe la petición, normalmente transmite un acuse de recibo en la parte de enlace descendente del intervalo (aunque un nodo solicitante puede solicitar específicamente que no se transmita acuse de recibo, de manera similar como en cualquier otro caso donde un nodo desea llevar el ahorro de energía al máximo incluso no habiendo de mantener su propio receptor para recibir acuses de recibo). La asignación de intervalo apropiada, si se ha de dar una, vendrá en la siguiente señal de baliza de grupo desde ese nodo de

60

cabecera. Los intervalos reservables se asignan de acuerdo con niveles de prioridad pedidos, mientras los prefieran los nodos de cabecera. La asignación se especifica en balizas de grupo, y se actualiza en cada ciclo de acceso. Si un nodo de cabecera no puede recibir datos en un intervalo reservable apropiado durante cuatro ciclos de acceso, o el intervalo está asignado a un nodo de prioridad superior, la reserva de intervalo anterior se elimina automáticamente. Un nodo de cabecera puede establecer un grupo completo a un estado en reposo para uno o más ciclos de acceso usando el campo de ciclos en espera en una baliza de grupo. Durante los ciclos en espera, toda la comunicación en un grupo se suspende temporalmente. Los ciclos en espera permiten ahorro de energía adicional a costa de aumentar el retardo de transferencia.

El canal de red está típicamente predeterminado. Bajo condiciones que contienen interferencias serias es posible predeterminar un número de canales de red, uno de los cuales se selecciona y se usa siempre que permanezca posible. La responsabilidad de decidir la selección entre un número de canales de red predeterminado, así como la responsabilidad de determinar cuándo es el momento para cambiar el canal de red, típicamente recae en un único nodo importante, que normalmente es también un nodo de sumidero. Cuando un nuevo nodo se une a una red el canal de red del cual puede ser cualquiera de un número de posibles canales, explora a través de los posibles canales de red hasta que encuentra uno donde las transmisiones de baliza de red están disponibles para recepción, y continúa usando (y explorando) ese canal de red siempre que parezca que está operativo.

El principio seleccionado para exploración de red es muy importante desde el punto de vista de consumo de energía. La red de sensores inalámbricos utiliza periodos de actividad cortos y tiempos de espera largos. Los grupos son asíncronos con respecto entre sí y operan en diferentes frecuencias, que necesitan averiguar los horarios de transmisión y frecuencias de nodos vecinos. Escuchar sus señales de baliza de red en un canal de red de acuerdo con la descripción anterior es mucho más eficiente en energía que algunas prácticas de la técnica anterior, en las que un nodo debe escuchar a través de todas las posibles frecuencias el tiempo suficiente para escuchar algún tráfico o balizas.

Básicamente es posible sustituir la división de frecuencia entre grupos con división de código, en la que todos los grupos usarían una frecuencia de transmisión común pero diferentes códigos de ensanchamiento específicos de grupo (y/o específicos de nodo) para evitar colisiones inter-grupo. Sin embargo, puesto que CDMA requiere sincronización extensiva y arquitectura de transceptor un poco más complicada, se espera que sea una alternativa factible únicamente para algunas aplicaciones muy específicas.

#### TRANSFERENCIA DE DATOS

Un protocolo de comunicaciones para una red de sensores inalámbricos que comprende grupos debe especificar mecanismos para intercambiar datos de usuario en comunicaciones intra-grupos (es decir entre nodos que pertenecen al mismo grupo) e inter-grupos (entre nodos que pertenecen a diferentes grupos). Un subnodo o un nodo de cabecera de fuente está asociado con un nodo de sumidero o de destino, que más típicamente es un nodo de cabecera. El intercambio de datos se realiza durante la supertrama de grupo de destino y el tiempo en reposo de grupo de fuente, y usando ALOHA o intervalos de tiempo reservables. Para compartir recursos de red más por igual entre nodos, los subnodos pueden utilizar preferentemente únicamente un intervalo de tiempo por ciclo de acceso, consiguiendo por lo tanto 132 bits por caudal de ciclo de acceso. Para permitir comunicación inter-grupo eficiente, la utilización de intervalos de nodos de cabecera no está limitada. Por lo tanto, el caudal máximo con ocho intervalos de datos reservables es de 1056 bits por ciclo de acceso.

Las comunicaciones inter-grupo desde un subnodo a través del nodo de cabecera 1 al nodo de cabecera 2 con un ejemplo de un procedimiento de reserva de intervalo se presentan en la Figura 10. Un bloque tachado ilustra la transmisión y un bloque blanco la recepción. La fila más baja de bloques ilustra la actividad de radio del nodo de cabecera 1, la fila más superior de bloques ilustra la actividad de radio del nodo de cabecera 2 y la fila media de bloques ilustra la actividad de radio del subnodo. El tiempo continúa desde la izquierda a la derecha en el dibujo. El nodo de cabecera 1 y el nodo de cabecera 2 operan en los canales de grupo 9 y 5, respectivamente. La señalización de red se realiza en el canal 1. Los designadores 1001, 1002 y 1003 de referencia designan el ciclo de acceso, periodo de supertrama y periodo en reposo respectivamente del grupo de nodo de cabecera 1. De manera similar los designadores 1011, 1012 y 1013 de referencia designan el ciclo de acceso, periodo de supertrama y periodo en reposo respectivamente del grupo del nodo de cabecera 2. Ambos nodos de cabecera transmiten balizas de red en reposo dos veces en sus ciclos de acceso. Las longitudes relativas de los periodos de tiempo en la Figura 10 no son a escala.

Un subnodo 1, anteriormente asociado con el nodo de cabecera 1, recibe las transmisiones 1021 de baliza de grupo del nodo de cabecera 1 y transmite datos usando un intervalo 1022 ALOHA y un tipo de trama de datos puro. El nodo de cabecera 1 responde transmitiendo un acuse de recibo en la parte 1023 de enlace descendente del mismo intervalo ALOHA. Suponiendo que el nodo de cabecera 1 no conoce aún la temporización de un nodo o grupo de siguiente salto adecuado, comienza una comunicación inter-grupo mediante la exploración 1031 de grupo. La exploración se completa cuando las balizas 1032 de red en reposo se reciben desde el nodo de cabecera 2, que es el destino seleccionado (siguiente salto). A continuación, habiendo leído la temporización apropiada desde las balizas 1032 de red en reposo recibidas, el nodo de cabecera 1 recibe las balizas 1041 de grupo en el canal 5 y transmite una trama de tipo datos y asociación y reserva de intervalo combinados usando un intervalo 1042 ALOHA.

El nodo de cabecera 2 responde mediante una trama 1043 de acuse de recibo que contiene la dirección de nodo que asigna al nodo de cabecera 1. Enviar los datos de inmediato en dicha trama combinada mejora la eficiencia de energía global y minimiza retardos en comparación con un caso donde el nodo de asociación debería realizar asociación en primer lugar y comenzar a transmitir datos únicamente posteriormente.

- 5 En la siguiente supertrama del grupo de nodo de cabecera 1, una trama 1051 de datos se recibe desde el subnodo 1, y se realiza acuse de recibo en 1052. Se supone que el subnodo no pidió un intervalo reservable, por lo que la trama 1051 de datos viene de nuevo en un intervalo ALOHA. Ahora el nodo de cabecera 1 ya es un nodo asociado del grupo de nodo de cabecera 2, por lo que únicamente necesita recibir balizas de grupo desde el nodo de cabecera 2 en 1061, y transmitir una trama de datos en un intervalo 1062 de tiempo reservable. El nodo de cabecera 2 responde con un acuse de recibo 1063.

10 Como se observa en la figura, la comunicación inter-grupo no aumenta significativamente el ciclo de trabajo del nodo de cabecera de destino, que simplifica la gestión de energía. En conjunto, el tiempo activo de un transceptor en un nodo de cabecera está en el orden de poco porcentaje de la longitud de un ciclo de acceso, mientras que para un subnodo está en el orden de poco por mil. Un nodo de cabecera de fuente se carga mediante la exploración de grupo. Sin embargo, el consumo de energía se reduce mediante las balizas de red en reposo. Después de la asociación de grupo, la comunicación inter-grupo es eficiente en energía. La comunicación intra-grupo no se altera, puesto que la comunicación inter-grupo se realiza en tiempo de reposo de grupo. También, el ciclo de trabajo de subnodo es bajo, requiriendo únicamente tres recepciones y una transmisión por ciclo de acceso.

#### ENCAMINAMIENTO

- 20 El protocolo de encaminamiento a seleccionarse depende ligeramente de la información preliminar que esté disponible con respecto a la naturaleza topológica esperada de la red de sensores inalámbricos. El siguiente ejemplo está basado en suposiciones de acuerdo con las que la red únicamente contiene relativamente pocos sumideros en comparación con el número global de nodos, y los mensajes desde los sumideros hacia los otros nodos son muy raramente específicos de nodo sino que normalmente se refieren a toda la red o a alguna sección de la misma. Se prefiere un principio de encaminamiento reactivo, de acuerdo con el que el protocolo de encaminamiento únicamente soporta almacenar información de encaminamiento con respecto a ciertos destinos que es necesario que se conozcan. Cada nodo únicamente necesita mantener una tabla de encaminamiento de siguiente salto, en lugar de memorizar rutas completas a destinos. Para un subnodo la tabla de encaminamiento de siguiente salto es particularmente sencilla, puesto que el siguiente salto a cualquier sitio es la conexión al nodo de cabecera del grupo.
- 25 Se prefieren los números de secuencia de tramas y soporte de encaminamiento multitrayectoria, de modo que es posible mejorar la fiabilidad de encaminar datos importantes pasándolos a través de trayectorias alternativas.

30 De acuerdo con una alternativa ejemplarmente sencilla, un nodo de sumidero que está interesado en lecturas de temperatura desde el área de cobertura de la red envía una petición para temperaturas en una trama de datos que contiene también un identificador del nodo de sumidero de envío. La petición continúa a través de la red de acuerdo con el principio de inundación. Para evitar bucles y duplicados la trama contiene un número de secuencia. Cada nodo de cabecera reenvía la petición a todos los otros nodos que pueden escuchar excepto desde los que proviene. Un contador de salto se actualiza en la trama que contiene la petición: cuando un nodo de cabecera empieza a reenviar una petición que recibe, aumenta el valor del contador de salto en uno.

35 Cada nodo que recibe dicha petición almacena el valor del contador de salto en recepción, el identificador del nodo originador (sumidero) y el del nodo desde el que se recibió la petición más recientemente. Por lo tanto un registro en una tabla de encaminamiento consiste en un identificador de destino, un identificador de siguiente salto y un contador de salto. Si el nodo de cabecera recibe más tarde una copia de la misma petición con un valor de cuenta de salto superior, descarta la última petición sin reenviarla. En correspondencia si el nodo de cabecera recibe una copia de la misma petición con un valor de cuenta de salto inferior, borra el registro anterior de la tabla de encaminamiento y lo sustituye con uno que contiene el recuento de salto y el identificador de nodo de transmisión obtenido desde la última recepción. En el momento de diseñar el protocolo de encaminamiento es posible también definir que (al menos si los recuentos de salto de las dos copias recibidas son más cercanos entre sí que un límite predefinido) el nodo de cabecera de recepción realiza un registro basándose en ambas copias recibidas de la petición, registros que pueden usarse a continuación más tarde para encaminamiento multitrayectoria.

40 La inundación de la red con la petición se extinguirá por sí misma cuando todos los nodos de cabecera la hayan recibido y reenviado. Cuando un nodo que se conoce a sí mismo para incluir un sensor de temperatura recibe la petición, obtiene una lectura de temperatura y transmite - de acuerdo con la información en su tabla de encaminamiento - una trama que contiene su identificador de fuente, la lectura de temperatura, localización posible (con referencia a otros nodos) y posiblemente una indicación de tiempo hacia el nodo de sumidero que realizó la petición. Observando los contenidos de estas transmisiones de dirección inversa los nodos de cabecera que se localizan en la trayectoria de encaminamiento hacia el nodo de sumidero apropiado pueden producir de nuevo registros a sus tablas de encaminamiento, conteniendo dichos registros entradas de siguiente salto con respecto al nodo desde el que se originó la lectura de temperatura. De vez en cuando el nodo de sumidero puede transmitir nuevas peticiones para obtener toda la información de encaminamiento actualizada.

DISPOSITIVO DE NODO PROTOTIPO

La Figura 11 ilustra la arquitectura de un dispositivo 1101 de nodo ejemplar de acuerdo con una realización de la invención. Un subsistema 1104 informático está adaptado para ejecutar el protocolo MAC, los protocolos superiores y algoritmos de aplicación dependen del rendimiento y memoria disponibles. Una implementación física ejemplar del subsistema informático comprende una unidad 1141 de microcontrolador Xemics XE88LC02, que consiste en un núcleo de procesador CoolRisc 816, un ADC 1132 de 16 bits, memoria de programa interna de 22 kB y memoria de datos de 1 kB. Una memoria 1142 externa, por ejemplo una memoria de solo lectura programable eléctricamente borrrable (EEPROM), proporciona un almacenamiento de datos no volátil. La velocidad de ejecución de instrucción máxima de dicha MCU ejemplar es 2 MHz.

Un subsistema 1105 de comunicaciones comprende un transceptor 1151 de RF, una antena 1152 y la parte de MCU 1141 que ejecuta los protocolos de comunicación. Una implementación física ejemplar del subsistema 1105 de comunicaciones utiliza un transceptor de 2,4 GHz NordicVLSI nRF2401. Una velocidad de datos de transmisión ejemplar es 1 Mbps. El transceptor 1151 tiene integrado reconocimiento de patrón y funciones de CRC de 16 bits, y una memoria intermedia de datos para transmisión y recepción. El reconocimiento de patrón se usa más ventajosamente para detectar una dirección de red. La CRC del transceptor de radio facilita significativamente la carga de trabajo del control de error de la MCU, puesto que únicamente necesitan implementarse en software los mecanismos de acuse de recibo y retransmisión.

Un subsistema 1103 de detección aprovecha más ventajosamente el uso del ADC 1132 interno y de la MCU 1141. Dicho ADC tiene típicamente etapas de pre-amplificación y compensación de desplazamiento, que aumenta precisión de muestreo. Una tasa de muestreo máxima típica que usa resolución de 16 bits es alrededor de 2 kHz. La MCU 1141 puede usarse para implementar un controlador de ADC y tareas de transmisión de muestra para la capa de aplicación. Como un sensor 1131 casi cualquier tipo de sensor puede usarse dependiendo de la aplicación.

El subsistema 1102 de potencia puede diseñarse de diversas maneras. El diseño ejemplar de la Figura 11 comprende una fuente 1121 de energía, que puede ser, por ejemplo, un circuito de recogida de energía ambiental basado en el fenómeno piezoeléctrico, o una célula fotovoltaica. Un regulador 1122 se usa para regular la fuente de alimentación proporcionada al resto del dispositivo de nodo. Aunque un regulador de modo de conmutación tendría eficiencia superior, un regulador lineal tal como un regulador de tensión lineal TPS71525 puede preferirse aún debido a su corriente en quietud inferior, ruido inferior, interferencias electromagnéticas inferiores y tamaño más pequeño. Como un almacenamiento temporal de energía y una reserva de demanda pico puede usarse una batería recargable o un supercondensador 1123. En un dispositivo prototipo se ha usado un condensador de 0,22 F.

Las dimensiones de dicho prototipo son 31 mm x 23 mm x 5 mm. El lado superior de una placa de circuito impreso en el prototipo contiene el transceptor, antena, EEPROM, sensor y conectores. La MCU y el regulador se montan en el lado inferior. Las mediciones de consumo de potencia del prototipo se presentan en la siguiente tabla.

Modo de MCU	Modo de ADC	Modo de sensor	Modo de radio	Potencia (mW)
Activo	Activo	Activo	Recibir datos	46,06
			Transmitir datos (Potencia: 0 dBm)	31,76
			Transmitir datos (Potencia: -20 dBm)	21,15
			Carga de datos	3,74
En espera	Apagado	Apagado	En espera	2,43
				2,41
				1,35
				0,019

El consumo de potencia mínimo es 19 µW, cuando el sistema está en el modo en espera, mientras que el máximo es 46,06 mW, cuando todos los componentes están activos, y el transceptor está en el modo RX. El consumo de potencia de la MCU es 1,33 mW a velocidad de reloj de 1,8 MHz. El transceptor de radio consume 33 veces la potencia de la MCU. La recepción de datos necesita casi dos veces la potencia de transmisión. En redes de sensores inalámbricos los consumos de potencia de los modos en espera y RX son los más importantes.

La Figura 12 ilustra una arquitectura de software ejemplar para un nodo como el anteriormente ilustrado en la Figura 11. Los servicios 1201 de sistema operativo básicos comprenden entre otros, una máquina 1202 de estado de control de nodo general, la operación de la cual se planifica mediante un temporizador 1203. La máquina 1202 de estado de control de nodo realiza llamadas de función MAC representadas como flechas. El conjunto 1204 de trama,

cola 1205 y controlador de radio 1206 (que incluye las funciones de TX de trama 1207 y RX de trama 1208) están asociados a datos y flujo de control. Las funciones de gestión en el lado derecho de la Figura 12 se ejecutan bajo demanda e incluyen estimación 1209 de distancia, exploración 1210 de grupo, asociación y disociación 1211 de grupo, asignación 1212 de intervalo y control 1213 de potencia de nodo. El controlador 1214 de ADC controla el muestreo de sensor y constituye una parte específica de las tareas 1215 de aplicación y encaminamiento de sensor, que en la pila de protocolo pertenecen a la capa de aplicación. El software puede desarrollarse usando cualquier herramienta de desarrollo disponible, tal como un Entorno de Desarrollo Integrado de Raisonance (RIDE). El software ejemplar desarrollado con dicha herramienta y un compilador A c816-gcc (ver. 2.8.0) con nivel de optimización 1 dieron como resultado un tamaño de implementación de nodo de cabecera MAC de 14 kB, que requiere 137 B de memoria de datos. Una versión de subnodo del software requiere 13 kB de memoria de programa y 109 B de memoria de datos. Los requisitos de memoria de datos no incluyen colas de trama.

#### CONSUMO DE POTENCIA Y RENDIMIENTO

En el trabajo de investigación, el consumo de potencia se estimó en una red de cinco nodos donde dos subnodos (subnodo 1, subnodo 2) están asociados con un nodo de cabecera 1. El nodo de cabecera 1 recibe tramas de datos desde ambos subnodos. Las tramas de datos recibidas se concatenan en una trama de datos, que se encamina al nodo de cabecera 3 mediante un nodo de cabecera 2. Las tramas de datos se transmiten en intervalos de tiempo reservables. La estimación incluye el subnodo 1, el nodo de cabecera 1, y el nodo de cabecera 2. Los procedimientos de asociación de grupo y reserva de intervalo se excluyen.

Puesto que la comunicación inter-grupo tiene lugar en el tiempo en reposo de grupo, longitudes de ciclo de acceso más cortas de 1 s no son convenientes. La longitud de ciclo de acceso máxima se establece a 10 s. El periodo de baliza de red se fija a 250 ms. Durante un ciclo de acceso, el subnodo 1 recibe dos balizas de grupo, y transmite una trama de datos, y opcionalmente recibe un acuse de recibo desde el nodo de cabecera 1. Los nodos de cabecera transmiten balizas de red y de grupo, reciben intervalos ALOHA y asignan intervalos de tiempo reservables, y reenvían datos a un nodo de cabecera vecino. Los acuses de recibo se usan para cada trama de datos.

En los consumos de potencia estimados el subnodo 1 consiguió el consumo de potencia más bajo. Usando el ciclo de acceso de 10 s más largo, el subnodo 1 consume 31  $\mu\text{W}$  con acuses de recibo, y 27  $\mu\text{W}$  sin acuses de recibo, mientras que los consumos de potencia del nodo de cabecera 1 y del nodo de cabecera 2 son 171  $\mu\text{W}$  y 166  $\mu\text{W}$ , respectivamente. Cuando se usa el ciclo de acceso de 1 s más corto, el consumo de potencia del subnodo 1 aumenta a 140  $\mu\text{W}$  con acuses de recibo, y 103  $\mu\text{W}$  sin acuses de recibo. Al mismo tiempo los consumos de potencia del nodo de cabecera 1 y del nodo de cabecera 2 son 574  $\mu\text{W}$  y 526  $\mu\text{W}$ , respectivamente.

Como una comparación, un consumo de potencia real medido desde un prototipo de un subnodo 1 es desde 36  $\mu\text{W}$  a 134  $\mu\text{W}$  con acuses de recibo, y desde 22  $\mu\text{W}$  a 97  $\mu\text{W}$  sin acuses de recibo. Los consumos de potencia del nodo de cabecera 1 y del nodo de cabecera 2 son desde 312  $\mu\text{W}$  a 850  $\mu\text{W}$ , y desde 283  $\mu\text{W}$  a 855  $\mu\text{W}$ , respectivamente. Los consumos de potencia de los nodos de cabecera son superiores que los estimados. Esto se produce por las actividades de MCU y receptor superiores que las modeladas debido a gestión de temporización bastante compleja e imprecisión de sincronización. Estas no pueden modelarse con precisión en las estimaciones. Sin embargo, la estimación de consumo de potencia del subnodo 1 es precisa. A medida que la longitud de ciclo de acceso aumenta, el subnodo 1 se acerca rápidamente al consumo de potencia del modo en espera.

El caudal entre los dos nodos se ha analizado como una función de la longitud de ciclo de acceso, a medida que el número de intervalos de tiempo reservables utilizados se aumenta desde 1 a 8. Se consigue caudal más alto usando la longitud de ciclo de acceso de 1 s más corta. Como cada trama de datos lleva datos de usuario de 132 bits, el caudal máximo usando 8 intervalos de tiempo reservables es 1056 bps. Debido a los intervalos de enlace descendente, el caudal es simétrico en ambas direcciones, consiguiendo caudal total máximo de 2112 bps. El caudal desde un subnodo al nodo de cabecera varía desde 13,2 bps a 132 bps, a medida que la longitud del ciclo de acceso se reduce desde 10 s a 1 s y únicamente se permite un intervalo de tiempo reservable. Debería observarse que al contrario de suposiciones anteriores, no es aconsejable transmitir datos a baja velocidad de bits si se ha de ahorrar energía. Bastante al contrario, las transmisiones - especialmente transmisiones de baliza que pretenden recibirse mediante un gran número de nodos receptores - deberían hacerse a una velocidad de transmisión relativamente alta (tal como 1 Mbps) de modo que el tiempo para mantener encendidos los receptores de los nodos de recepción puede mantenerse tan corto como sea posible.

Un retardo de protocolo medio para transferir una trama de datos entre dos nodos es aproximadamente una mitad de la longitud de ciclo de acceso, cuando el caudal ofrecido está por debajo del caudal del protocolo MAC estimado. En este caso, las colas del protocolo MAC se vacían en cada supertrama.

La estimación puede extenderse a redes mayores con cuatro grupos, teniendo cada uno siete subnodos asociados. Los datos se reenvían entre los grupos a un sumidero usando tres intervalos de datos reservables por grupo. Cinco subnodos en cada grupo se asignan en intervalos de tiempo reservables, mientras que los restantes dos subnodos por grupo son tramas de transmisión en intervalos de tiempo ALOHA. Los acuses de recibo se usan para cada trama de datos. El periodo de baliza de red es 250 ms. Por simplicidad, no se consideran las colisiones y los errores de trama en la estimación. Los consumos de potencia de los subnodos y nodos de cabecera se estiman en función de

los caudales conseguidos.

Se determinan caudales de una dirección desde el subnodo al nodo de cabecera, y entre nodos de cabecera. Los caudales máximos para un subnodo y un nodo de cabecera son 132 bps, y 396 bps, mientras que la potencia de consumo 140  $\mu\text{W}$  y 977  $\mu\text{W}$ , respectivamente.

5 Suponiendo que un subnodo obtiene muestras de 16 bits a tasa de muestreo de 1 Hz, se requiere un caudal de 16 bps desde un subnodo a un nodo de cabecera. De acuerdo con resultados medidos desde prototipos, esto da como resultado longitud de ciclo de acceso de 8,2 s y consumo de potencia de subnodo de 34  $\mu\text{W}$  para el caudal requerido. El consumo de potencia del nodo de cabecera usando la misma longitud de ciclo de acceso es 230  $\mu\text{W}$  consiguiendo un caudal de 48 bps para reenvío de datos. Por lo tanto, el consumo de potencia medio para un nodo es 59  $\mu\text{W}$ . Debido al gran número de subnodos, la agregación de datos debería aplicarse en los nodos de cabecera. Como se requiere retardo de transferencia por salto de 2 s, la longitud de ciclo de acceso se reduce a 4 s. Esto da como resultado caudal máximo de 33 bps y consumo de potencia de 50  $\mu\text{W}$  para los subnodos. El caudal de nodo de cabecera y consumo de potencia son 99 bps y 340  $\mu\text{W}$ . El consumo de potencia medio por un nodo aumenta a 86  $\mu\text{W}$ . Esta energía puede obtenerse a partir de una batería de litio con tamaño de 1  $\text{cm}^3$  que dura ligeramente sobre un año.

La energía puede recogerse también, por ejemplo, a partir de una diferencia de temperatura de 5,5  $^{\circ}\text{C}$  usando un generador termoeléctrico con tamaño de 1  $\text{cm}^2$ , a partir de la vibración de pequeñas máquinas, por ejemplo la carcasa de un horno microondas usando un generador piezoeléctrico con tamaño de 1  $\text{cm}^3$ . En su totalidad, el consumo de potencia verificado de un subnodo es tan bajo como 27  $\mu\text{W}$ , cuando se usa una longitud de ciclo de acceso de 10 s sin acuses de recibo. Esto da como resultado aproximadamente 5 s de retardo de transferencia y caudal de 13,2 bps desde un subnodo a un nodo de cabecera, que satisface los requisitos de la mayoría de las aplicaciones WSN. El caudal total máximo en dos direcciones usando intervalos de tiempo reservables es 264 bps entre un subnodo y un nodo de cabecera, y 792 bps entre nodos de cabecera.

#### CIRCULAR LA RESPONSABILIDAD DE NODO DE CABECERA

25 Actuar como un nodo de cabecera consumirá notablemente más energía que como un subnodo. Por otro lado, el número medio de subnodos por nodo de cabecera tiene un efecto en la velocidad óptima para realizar transmisiones de baliza: cuanto más alto sea el número medio de subnodos, más frecuentemente deberían realizarse las transmisiones de baliza (véase  $n_s$  en la ecuación 8). Por lo tanto, incluso a primera vista sería aconsejable tener únicamente el número mínimo absoluto de nodos de cabecera en una red de sensores inalámbricos, aumentar el número medio de subnodos por nodo de cabecera puede conducir a una situación donde la velocidad de transmisión de baliza predeterminada ya no sea óptima. Adicionalmente si uno de los nodos de cabecera falla en una red de este tipo, la ausencia de rutas redundantes para comunicaciones inter-grupo requerirá cantidades relativamente grandes de exploración de red mediante un número de nodos antes de que se haya establecido de nuevo la conectividad completa.

35 Un límite inferior al número de nodos de cabecera se consigue cuando la distancia entre nodos de cabecera adyacentes se hace demasiado larga dando como resultado comunicaciones inter-grupo no fiables, que con los transceptores de 2,4 GHz NordicVLSI nRF2401 anteriormente mencionados significa aproximadamente 10 metros en condiciones interiores, o que los nodos de cabecera ya no puedan encaminar el caudal esperado desde los subnodos al sumidero o sumideros incluso si agregaran datos en transmisión.

40 Existen dos enfoques básicos. En primer lugar, es posible hacer el grupo de velocidad de transmisión de baliza específico, de modo que cada nodo de cabecera decide dinámicamente su propia velocidad de transmisión de baliza basándose en el número de subnodos actualmente asociados con él. Si este es el caso, a continuación - considerando únicamente el consumo de energía - es incluso aconsejable programar cada FFD de modo que no actuará como un nodo de cabecera únicamente si puede evitarlo. Sin embargo, no es aconsejable permitir a ningún nodo de cabecera disminuir su velocidad de transmisión de baliza por debajo de un valor nominal que determina el periodo de baliza nominal la longitud del cual debería ser suficiente para recibir al menos una señal de baliza de red desde cualquier nodo de cabecera suficientemente cerca de sus balizas de red a recibir. Las secciones densas de la red ( $> 1$  nodo /  $\text{m}^2$ ) pueden beneficiarse enormemente de hacer velocidad de baliza superior a dicho valor nominal, puesto que los ahorros globales conseguidos en energía de exploración de red requerida son mucho mayores que la energía adicional gastada en las transmisiones de baliza. Un límite superior para la velocidad de baliza se encuentra cuando las colisiones entre señales de baliza de red desde diferentes nodos de cabecera se hacen demasiado comunes.

Una segunda alternativa es determinar de antemano un cierto número nominal de subnodos que cada nodo de cabecera debería tener en su grupo, y fijar la velocidad de transmisión de baliza basándose en dicho número nominal de subnodos. Como una consecuencia de esta segunda alternativa, si un nuevo FFD lee las indicaciones de carga desde transmisiones de baliza de nodos vecinos de cabecera y notifica que parecen todas ya tener un número nominal completo de subnodos, empieza a actuar como un nuevo nodo de cabecera en lugar de expresarse a sí mismo como un subnodo adicional a uno de los grupos previamente existentes. Incluso si los nodos de cabecera no están permitidos a cambiar la velocidad de baliza por su propia iniciativa, es posible definir la velocidad de baliza

para que sea un parámetro de red que un nodo de cabecera que ordene puede cambiar difundiendo un mensaje de cambio correspondiente a través de toda la red.

Un nodo de cabecera no está obligado a seguir su esfuerzo, si el consumo de energía requerido mediante la operación del nodo de cabecera amenaza con agotar sus recursos de energía por debajo de algún umbral predeterminado, o si la velocidad de consumo de energía supera la velocidad de reposición de energía correspondiente (es decir recogida) durante alguna duración de tiempo predeterminada. Un dispositivo de nodo de este tipo puede simplemente rechazar operar como un nodo de cabecera nunca más, y anuncia su retirada no realizando transmisiones de baliza nunca más. Los otros nodos alrededor de él notificarán que el grupo anterior no está operativo nunca más, y empezarán a buscar conexiones de sustitución. Eventualmente un FFD que operó previamente como un subnodo se indicará que puede recibir únicamente transmisiones de baliza al nivel de potencia de transmisión más alto, que significa que está relativamente lejos de todos los nodos de cabecera existentes, y decide cambiar al papel de un nodo de cabecera (más ventajosamente se ha programado para no hacerlo, o al menos retardar hacerlo siempre que sea posible, si sus propios recursos de energía parecen que son demasiado bajos). Anuncia su decisión haciendo una transmisión de baliza de grupo, después de la cual espera a otros nodos alrededor de él para enviar sus tramas de asociación. Un subnodo anterior puede decidir también hacerse un nodo de cabecera si notifica desde transmisiones de baliza de grupo que la carga de su grupo anterior se han hecho prohibitivamente alta.

Si ocurriera que dos FFD decidan exactamente de manera simultánea hacerse nuevos nodos de cabecera, sus transmisiones de baliza colisionarán. Teniendo que el canal de red contendrá únicamente las señales de baliza de red, que son muy cortas (2 x 256 microsegundos) en la disposición de transmisión de baliza sugerida, la probabilidad de una colisión es pequeña. Sin embargo, es deseable descartarla incluso más, es posible aprovechar el comportamiento determinístico de los nodos: una decisión para hacerse un nodo de cabecera se realizará cuando se cumplan ciertos criterios, que - con respecto al efecto de factores externos - tendrán lugar en un cierto instante de tiempo común. Se puede definir que después del momento en el que dicho criterio se satisfaga, cada subnodo anterior espera la duración de un retardo, la longitud del cual se selecciona aleatoriamente o se calcula con un algoritmo que tiene en cuenta la energía de nodo (cuanta más energía, retardo más corto), nodos de cabecera restantes conocidos para el nodo (cuantos menos nodos de cabecera restantes conocidos, retardo más corto; requiriendo sin embargo al menos un nodo de cabecera restante para escucharse para mantener la conectividad) y/o movilidad de nodo (si un nodo conoce por sí mismo que es altamente móvil, usa un retardo más largo). De esta manera es más probable que el nuevo nodo de cabecera será la elección óptima en términos de requisitos de energía así como escalado de red y topología.

#### CONGESTIÓN Y ESCALABILIDAD

Incluso si hay un número de diferentes canales de frecuencia desde los que elegir, en redes grandes puede ocurrir que un nuevo grupo simplemente ya no pueda encontrar una frecuencia libre. En ese caso puede tomar el canal de frecuencia en el que considera que hay la menor cantidad de tráfico existente. El periodo en reposo largo en los ciclos de acceso, junto con el hecho de que las señales de baliza de red se transmiten en una frecuencia separada, significa que una única frecuencia puede adaptar bien más de un grupo, siempre que el nodo de cabecera más reciente seleccione su periodo de supertrama para no solapar con aquellos de los nodos de cabecera anteriores.

Al contrario de una creencia común, usar TDMA para distribuir la capacidad de comunicaciones disponible no mantiene la solución de red para que sea escalable. La red tiene una topología en grupo, donde se aplica TDMA dentro de grupos (comunicación intra-grupo). La escalabilidad dentro de los grupos no es un problema, puesto que todos los miembros de grupo (subnodos) están en el alcance de una cabecera de grupo (nodo de cabecera). También, un nodo de cabecera controla el número de subnodos asociados con él. Además, los intervalos ALOHA permiten que un gran número de subnodos de baja actividad comuniquen con el nodo de cabecera bajo demanda.

Para comunicación inter-grupo el problema de la escalabilidad se resuelve distribuyendo el control de TDMA en la red. Las planificaciones de TDMA a nivel de red se evitan. Un nodo de cabecera que desea comunicar con otro nodo de cabecera se asocia con un grupo vecino de manera similar a los subnodos que operan allí.

#### MINIMIZAR LATENCIA DE DATOS EN UNA DIRECCIÓN

Si cada nodo de cabecera inicia el ciclo de acceso en su grupo en un momento arbitrario de tiempo, los momentos de inicio de ciclo de acceso (y por lo tanto, por ejemplo, momentos de transmisión de baliza de grupo) se distribuirán uniformemente a través del tiempo. Esto tiene sus ventajas: por ejemplo, ensanchar el uso de tiempo de transmisión ayuda a evitar colisiones y nivel fuera de la interferencia de radio experimentada por otros dispositivos electrónicos cercanos. Sin embargo, también da como resultado la consecuencia de que el retardo medio entre saltos inter-grupo es esencialmente una mitad de la longitud del ciclo de acceso. Si la red de sensores inalámbricos es grande y el ciclo de acceso es largo (es decir, 10 segundos), el retardo global resultante de generar datos en un subnodo para hacer los datos disponibles en un nodo de sumidero puede hacerse prohibitivamente largo. Este retardo, que viene del hecho de que cada nodo que reenvía los datos debe esperar solamente el siguiente momento de transmisión adecuado es comúnmente conocido como latencia de datos.

Una medida sencilla, pero efectiva, está disponible para minimizar la latencia de datos como se ilustra en las Figuras 13 y 14. La Figura 13 es un diagrama de topología de red simplificado donde se han omitido los subnodos. Se supone que un subnodo en el grupo de un primer nodo de cabecera 1301 genera datos, que deberían encaminarse a través del segundo y tercer nodos de cabecera 1302 y 1303 a un nodo 1304 de sumidero. Se supone además que se ha ejecutado un protocolo de encaminamiento, dando como resultado que cada uno del primer, segundo y tercer nodos de cabecera 1301, 1302 y 1303 ha almacenado un registro de siguiente salto apropiado para encaminar datos hacia el nodo 1304 de sumidero. El número relativamente pequeño de nodos de cabecera en una red de sensores inalámbricos típica asegura que en la mayoría de nodos de cabecera la tabla de encaminamiento tiene únicamente una única entrada para un siguiente salto hacia un nodo de sumidero.

De acuerdo con la Figura 14, cada nodo de cabecera ha temporizado su ciclo de acceso de modo que su propia supertrama, mostrada como un bloque blanco en la Figura 14, tiene lugar inmediatamente antes de la supertrama de ese otro nodo de cabecera que en una tabla de encaminamiento representa un siguiente salto hacia el nodo 1304 de sumidero. La actividad de transceptor que no pertenece a una propia supertrama de nodo de cabecera pero se refiere a comunicación con un nodo adyacente se ilustra como bloques tachados finos. Si el primer nodo de cabecera 1301 ha obtenido algún dato desde un subnodo en un intervalo de la supertrama que tiene lugar en primer lugar en la Figura 14, puede recibir una baliza 1401 de grupo desde el segundo nodo de cabecera 1302 inmediatamente de manera posterior así como reenviar los datos y recibir un acuse de recibo en la etapa 1402 aún durante la misma supertrama del segundo nodo de cabecera 1302. La misma rápida sucesión de recepción y reenvío de datos de baliza de grupo con acuse de recibo se repite en las etapas 1411 y 1412 así como 1421 y 1422 respectivamente. Una cadena de reenvío de datos similar se repite en las etapas 1403, 1404, 1413, 1414, 1423 y 1424.

El retardo de salto  $t_n$  es constante y equivale a la longitud de una supertrama. La latencia de datos total desde un subnodo a un nodo de sumidero equivale a una vez la longitud de la supertrama menos el número de saltos inter-grupo requerido, sumado con la longitud incompleta de una supertrama que tuvo antes de que el primer nodo de cabecera pudiera empezar a reenviar los datos. Anteriormente se ha analizado una longitud de supertrama ejemplar de 260 milisegundos, que es una figura de latencia de datos inter-grupo mucho más aceptable que una media de una mitad de un ciclo de acceso de 10 segundos. Con transceptores rápidos capaces de velocidad de transmisión de 1 Mbps es bastante posible acortar la longitud de intervalo a, por ejemplo, un milisegundo, que reduciría adicionalmente la latencia de datos en un decenio.

Como una limitación se ha de observar que el esquema de reducción de latencia anteriormente descrito únicamente funciona bien en una dirección de transmisión únicamente. En la dirección inversa maximiza bastante la latencia de datos, con un retardo inter-grupo constante de casi una longitud completa de un ciclo de acceso. Si se soporta encaminamiento multi-trayectoria, cada nodo de reenvío de datos debe seleccionar una entrada de siguiente salto preferida en la tabla de encaminamiento, con referencia a que optimiza su temporización de ciclo de acceso, o seleccionar un número de entradas de siguiente salto igualmente preferentes y temporiza su ciclo de acceso de modo que reenviar datos a cualquiera de los nodos de cabecera adyacentes correspondientes tendrá lugar después de un retardo que es tan pequeño como sea posible, tomando sus diferentes horarios de ciclo de acceso.

Ajustar la temporización de ciclo de acceso se maneja más elegantemente de modo que cuando un nodo de cabecera desea cambiar el momento de inicio de su ciclo de acceso, lo anuncia en una baliza de grupo una longitud de ciclo de acceso más corta o más larga que la normal, que es únicamente válida para la duración de un (o unos pocos) ciclo de acceso, después de lo cual la temporización es correcta y la longitud de ciclo de acceso normal puede invertirse. El comienzo excepcionalmente temprano o tardío de un ciclo de acceso inmediatamente siguiente naturalmente debe tenerse en cuenta también cuando se insertan valores a los campos "tiempo a siguiente baliza de grupo" para intervenir señales de baliza de red, si las hubiera.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo (101, 102, 104, 111, 112, 1101) de nodo para una red (100) de sensores inalámbricos, comprendiendo el dispositivo de nodo:

- 5 - un transceptor (1151) inalámbrico adaptado para intercambiar información con otros dispositivos de nodo en una frecuencia de comunicaciones de acuerdo con un esquema de acceso de canal con intervalo de tiempo, y
- una unidad (1141) controladora adaptada para controlar el transceptor (1151) inalámbrico, **caracterizado porque**
- 10 - la unidad (1141) controladora está adaptada para sintonizar selectivamente el transceptor (1151) inalámbrico a una primera frecuencia para recibir señales (311) de baliza de agrupación desde un nodo (101, 111) principal de una agrupación (103, 113) de la red de sensores inalámbricos y a una segunda frecuencia para recibir señales (331, 332) de baliza de red, en el que cada señal (311) de baliza de agrupación comprende tramas (321, 322) de baliza de agrupación y en el que cada señal (331, 332) de baliza de red comprende tramas (341, 342) de baliza de red,
- 15 - la unidad (1141) controladora está adaptada adicionalmente para detectar qué tramas (321, 322, 341, 342) de una señal (311, 331, 332) de baliza fueron recibidos con éxito, y para usar dicha detección para derivar una estimación de una distancia entre el dispositivo de nodo y un dispositivo que transmitió dicha señal de baliza,

en el que la señal de baliza es una señal (311, 331, 332) de baliza de agrupación o red.

2. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la unidad (1141) controladora está adaptada adicionalmente para seleccionar un nivel de potencia de transmisión para su uso en transmisiones realizadas por el dispositivo de nodo basándose en qué partes de la señal de baliza se recibieron con éxito.

3. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende:

- 25 - un subsistema (1105) de comunicaciones,
- un subsistema (1104) informático,
- un subsistema (1103) de detección, y
- un subsistema (1102) de potencia;

de los cuales dicho subsistema (1103) de detección comprende un sensor (1131) y un convertidor (1132) analógico a digital, dicho subsistema (1104) informático comprende una unidad (1141) microcontroladora y una memoria (1142) no volátil, dicho subsistema (1105) de comunicaciones comprende el transceptor (1151) inalámbrico y una antena (1152), y dicho subsistema (1102) de potencia comprende una fuente (1121) de energía, un regulador (1122), y un almacenamiento (1123) de energía recargable.

4. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 3, en el que dicha fuente (1121) de energía es una unidad de eliminación de energía y dicho almacenamiento (1123) de energía recargable es un súper condensador.

5. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 3, en el que dicho convertidor (1132) analógico a digital es interno a dicha unidad (1141) microcontroladora, que además comprende partes adaptadas para ejecutar protocolos de comunicaciones, perteneciendo dichas partes a dicho subsistema (1105) de comunicaciones.

6. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 1, en el que, para realizar al menos uno de asociación de agrupación y reenvío de datos, el dispositivo de nodo está adaptado para realizar escaneo de agrupación, que comprende sintonizar el transceptor inalámbrico a una tercera frecuencia, usada como frecuencia de señalización de red, y recibir al menos una señal (331, 332) de baliza de red transmitida por el nodo principal de la agrupación en la red de sensores inalámbricos.

7. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 6, en el que, cuando opera como un nodo (101, 111) principal, el dispositivo de nodo está adaptado para mantener el transceptor inalámbrico sintonizado a dicha frecuencia de señalización de red durante una duración máxima de un intervalo (333) de baliza de red para recibir varias señales (331, 332) de señalización de red de una serie de nodos (101, 111) principales adyacentes.

8. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el dispositivo de nodo está adaptado para responder a una situación en la que solo puede recibir con éxito una primera trama de baliza transmitida a un primer nivel de potencia de transmisión y no una segunda trama de baliza transmitida a un segundo nivel de potencia de transmisión inferior, comenzando la búsqueda de otros nodos de principales distintos del que dicha segunda trama de baliza no pudo recibirse con éxito.

9. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 8, en el que el dispositivo de nodo está adaptado para continuar dicha búsqueda de otros nodos principales durante la duración de un intervalo (333) de baliza de red y, en caso de que el dispositivo de nodo no pudiera recibir con éxito tramas de baliza de tales otros nodos principales durante dicho intervalo de baliza de red, entrar en modo de suspensión por un intervalo de tiempo y luego comenzar una nueva búsqueda de otros nodos de principales.

- 5 10. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el dispositivo de nodo está adaptado para responder a una situación en la que solo puede recibir con éxito una primera trama de baliza transmitida a un primer nivel de potencia de transmisión y no una segunda trama de baliza transmitida a un segundo nivel de potencia de transmisión seleccionando un nivel de potencia superior para realizar sus propias transmisiones inalámbricas distintas a en una situación en la que puede recibir con éxito tanto dicha primera trama de baliza transmitida a dicho primer nivel de potencia de transmisión como dicha segunda trama de baliza transmitida a dicho segundo nivel de potencia de transmisión bajo.
- 10 11. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 6, en el que el dispositivo de nodo está adaptado para asociarse alternativamente como un subnodo (102, 112) de la agrupación en la red de sensores inalámbricos a una agrupación existente, o establecerse él mismo como un nodo principal de una nueva agrupación, dependiendo de qué tan cargados parecían estar juzgando las agrupaciones existentes al cargar anuncios que el dispositivo de nodo ha recibido del nodo principal de dichas agrupaciones existentes.
- 15 12. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el dispositivo de nodo está adaptado para intentar cambiar de un estado de subnodo a un estado de nodo principal en la red de sensores inalámbricos en el cumplimiento de criterios predefinidos, y, como parte de dicho intento, esperar la duración de un retraso antes de transmitir una señal de baliza de red, siendo la duración del retraso inversamente proporcional a la cantidad de energía disponible para la operación del dispositivo de nodo.
- 20 13. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el dispositivo de nodo está adaptado para intentar cambiar de un estado de subnodo a un estado de nodo principal en la red de sensores inalámbricos en el cumplimiento de criterios predefinidos, y, como parte de dicho intento, esperar la duración de un retraso antes de transmitir una señal de baliza de red, la duración del retraso es directamente proporcional a al menos uno de varios nodos de cabecera existentes, transmisiones de baliza de red de las cuales el dispositivo de nodo es capaz de recibir, y grado conocido de movilidad del dispositivo de nodo.
- 25 14. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el dispositivo de nodo está adaptado para mantener una entrada de tabla de enrutamiento que indica un nodo de siguiente salto en una ruta hacia un nodo de sumidero.
- 30 15. Un dispositivo de nodo de acuerdo con la reivindicación 14, en el que el dispositivo de nodo está adaptado para actuar como un nodo principal en la red de sensores inalámbricos, tales actuando como un nodo principal que comprende establecer el tiempo de un ciclo de acceso que consiste en una súper trama de comunicaciones y un período de inactividad, y - para minimizar la latencia de datos en dicha ruta hacia un nodo sumidero - el dispositivo de nodo está adicionalmente adaptado para establecer la temporización de dicho ciclo de acceso de modo que dicha súper trama de comunicaciones finalice inmediatamente antes de una comunicación de supertrama perteneciente a un ciclo de acceso de dicho nodo de siguiente salto.

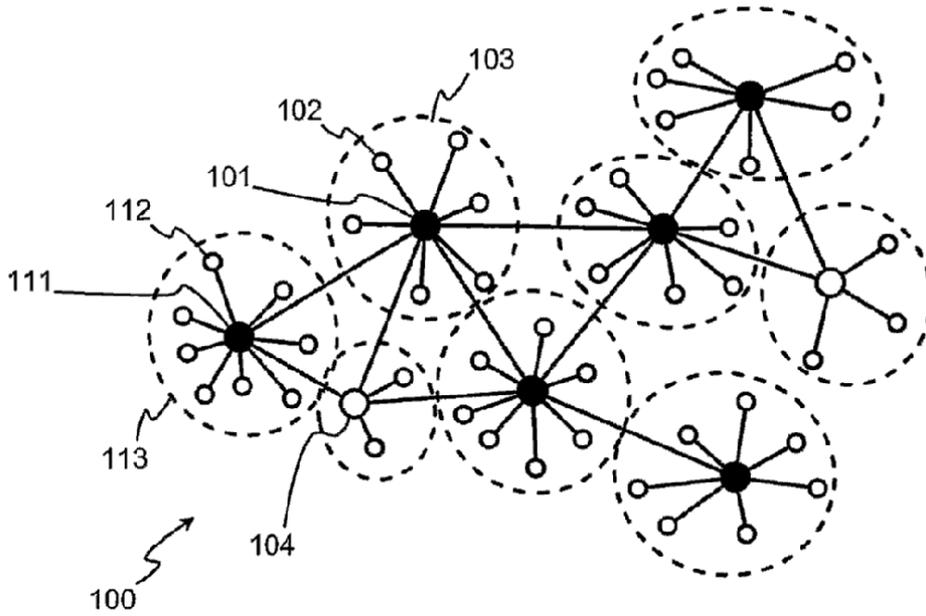


Fig. 1

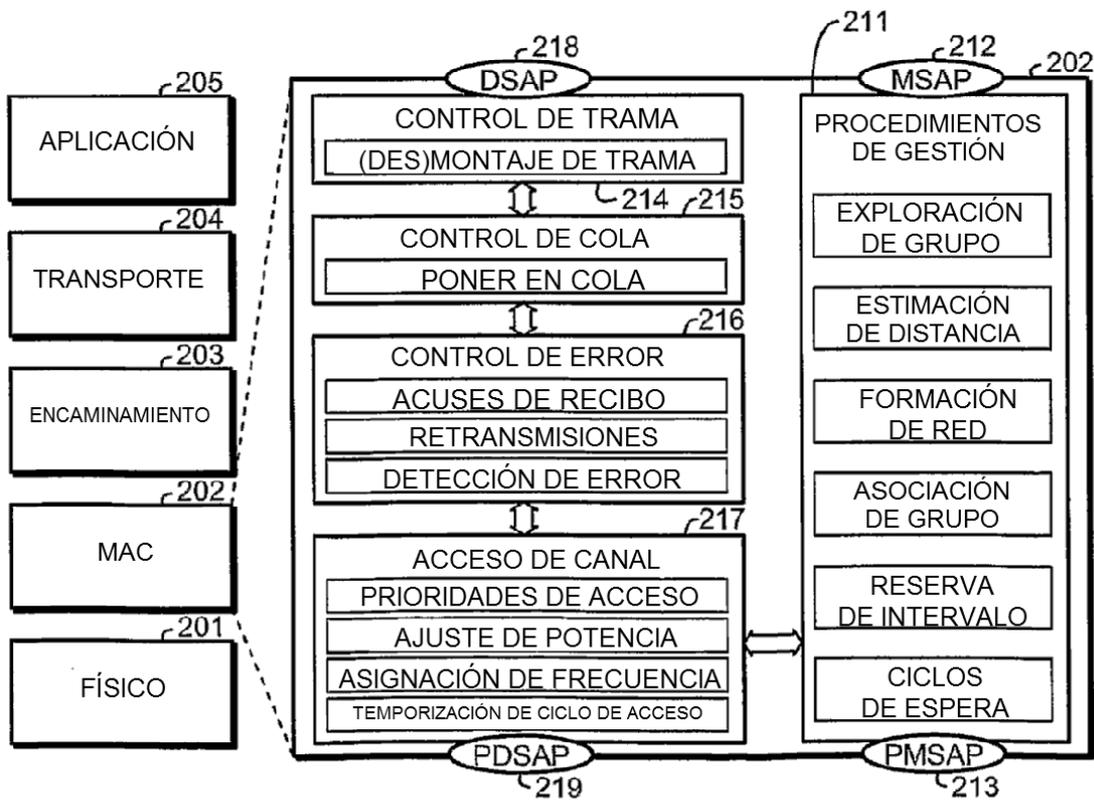


Fig. 2

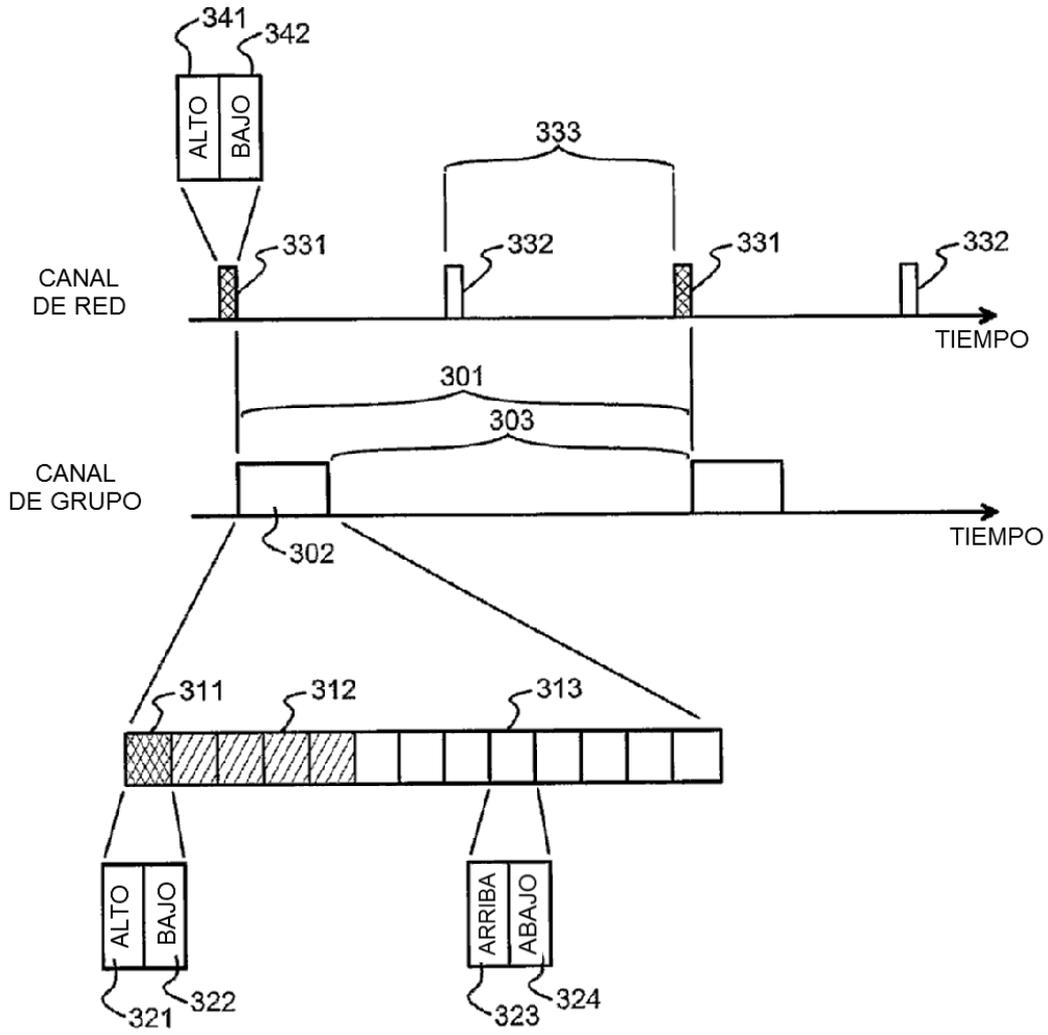


Fig. 3

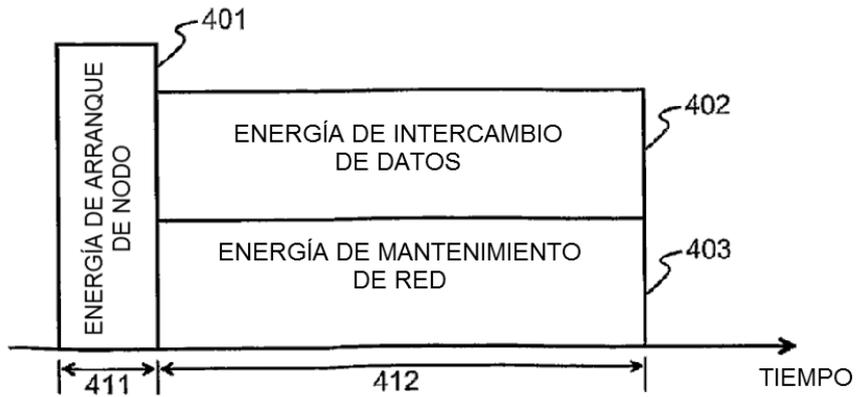


Fig. 4

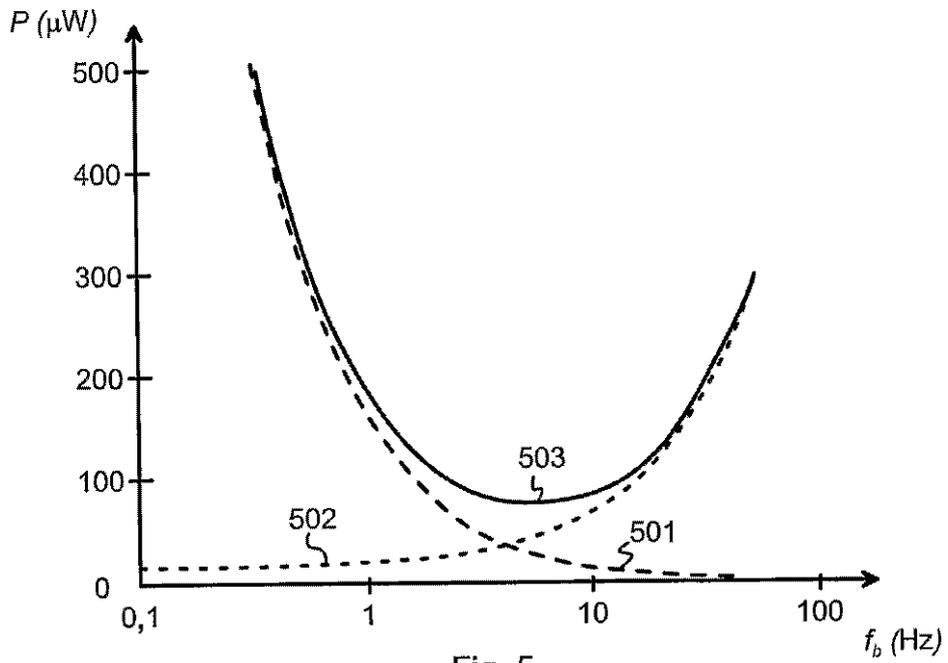


Fig. 5

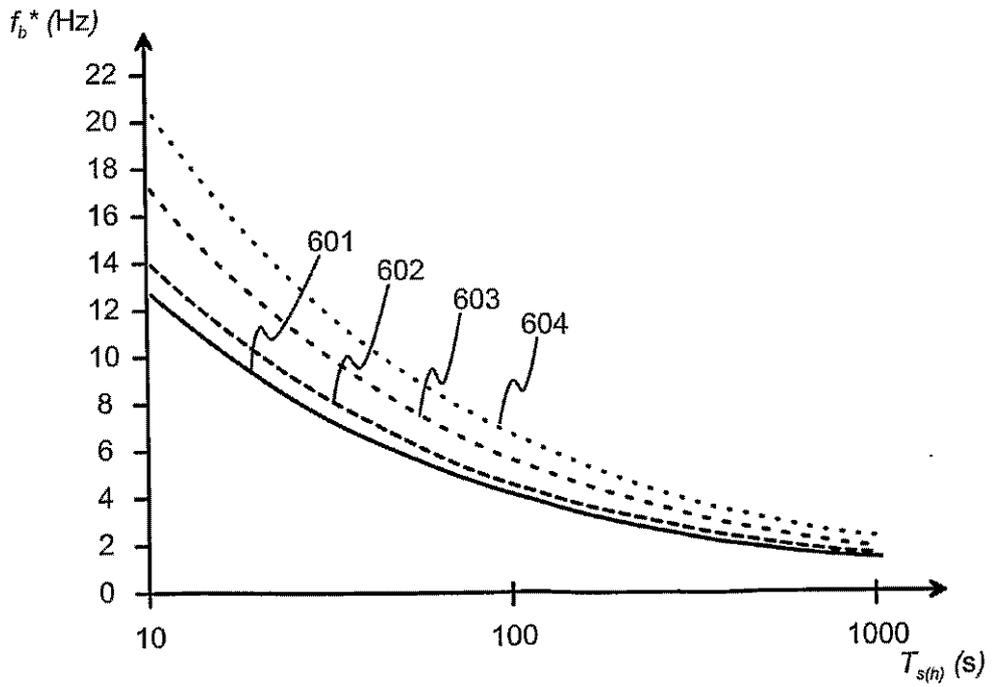


Fig. 6

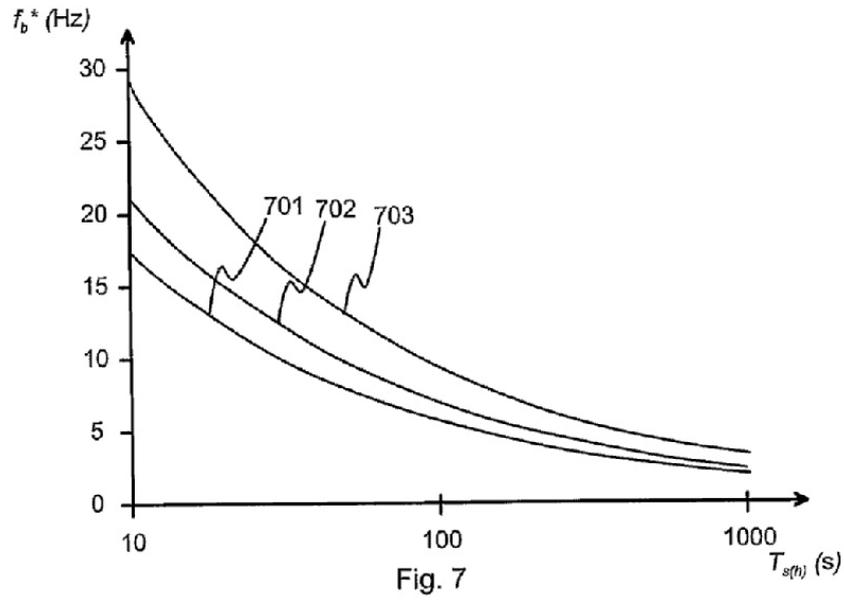


Fig. 7

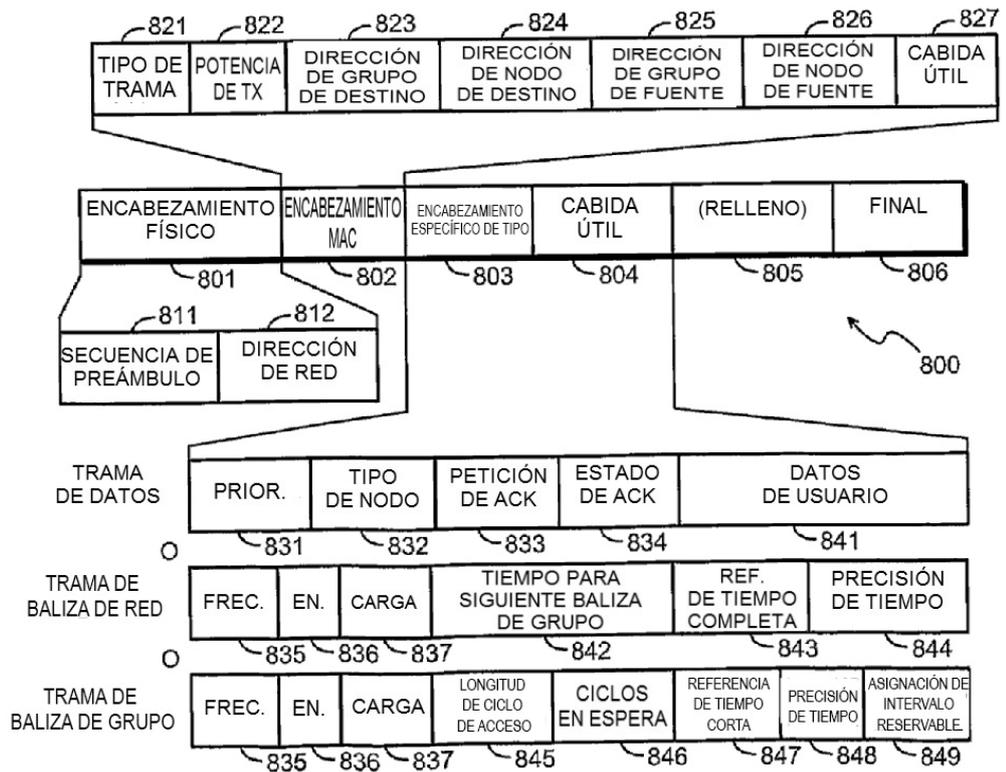


Fig. 8

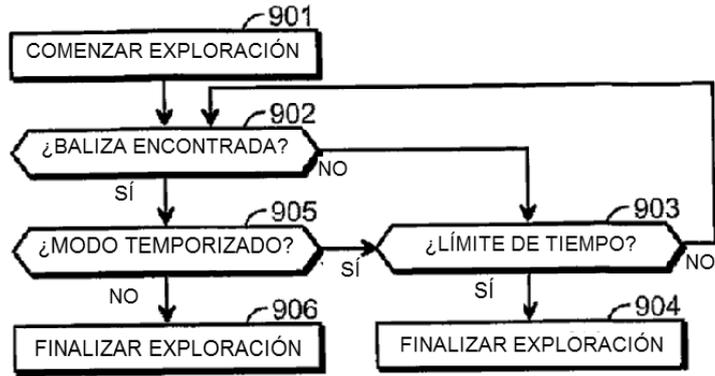


Fig. 9a

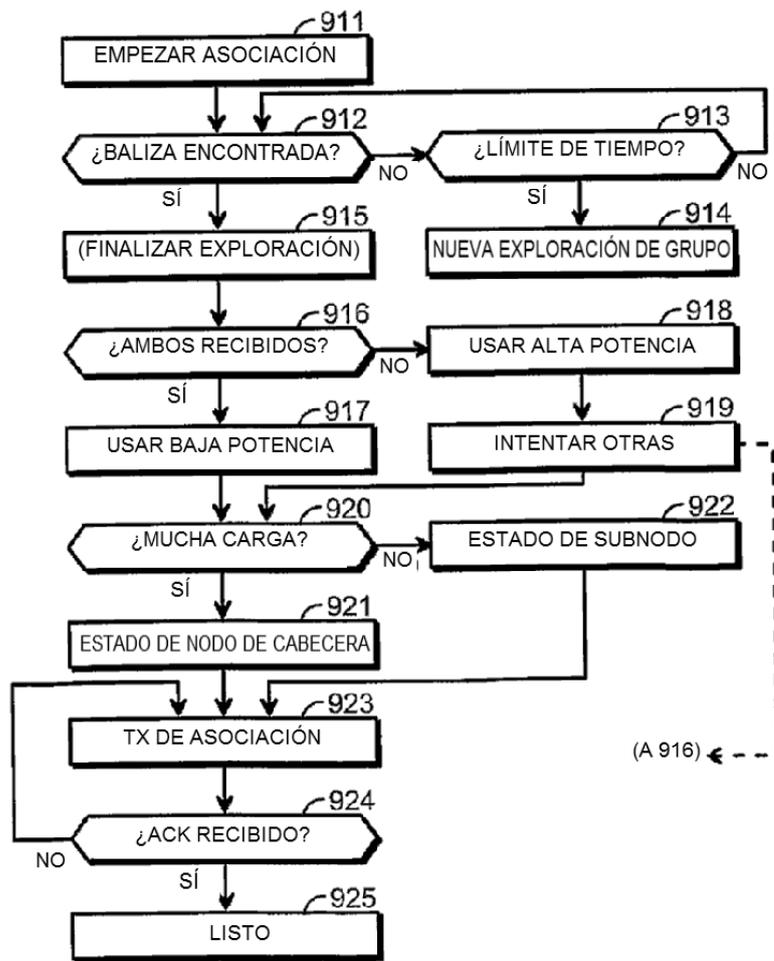


Fig. 9b

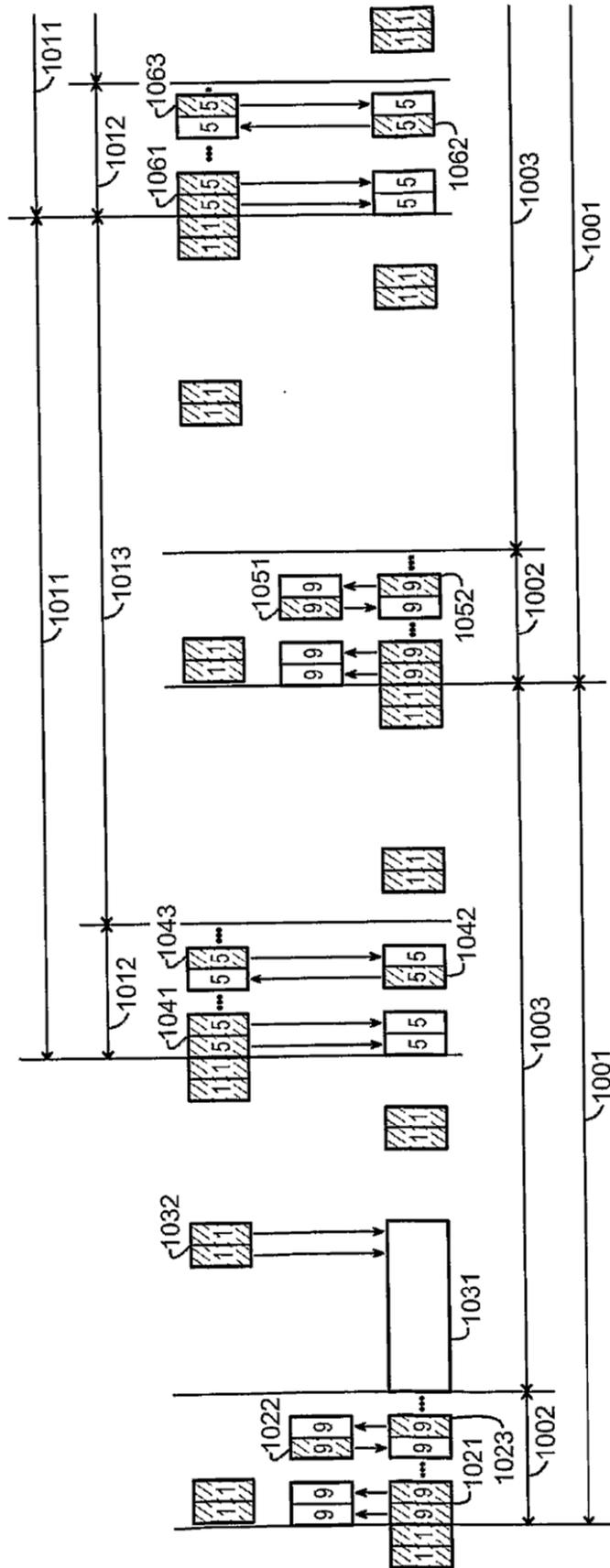


Fig. 10

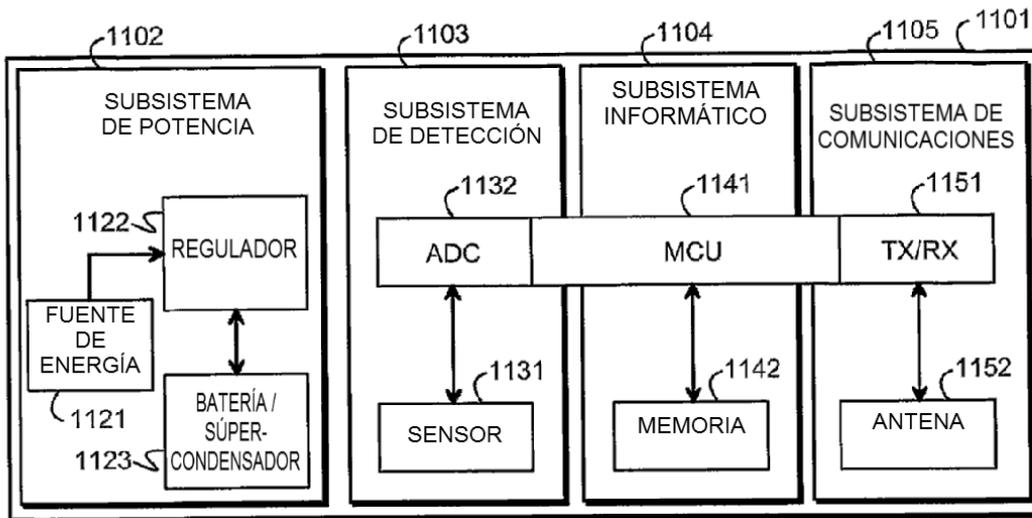


Fig. 11

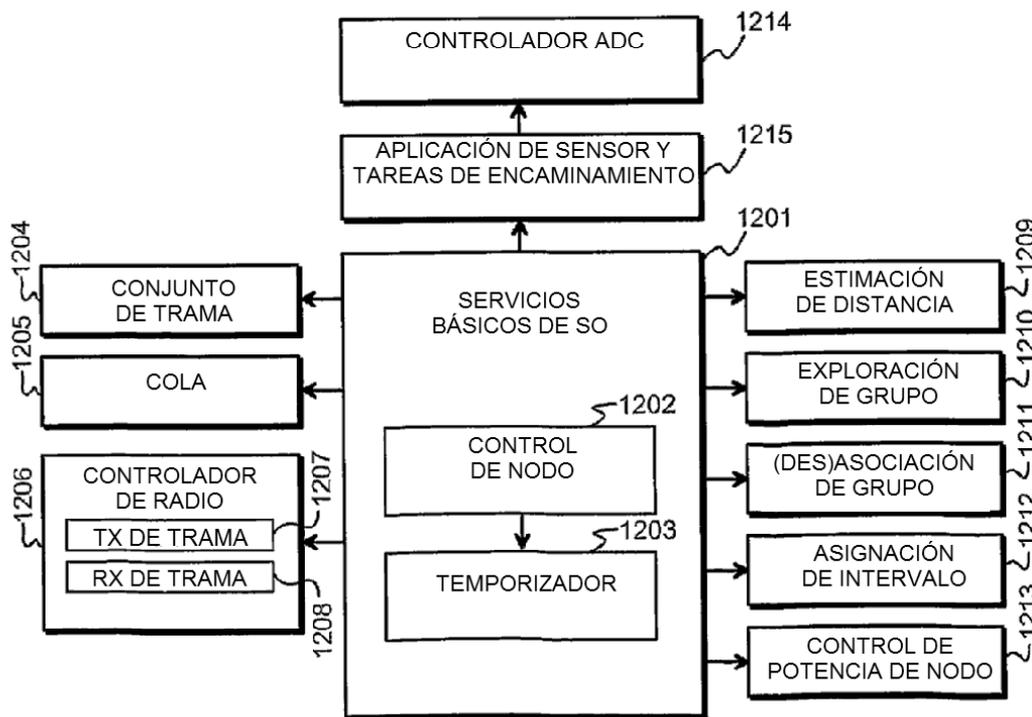


Fig. 12

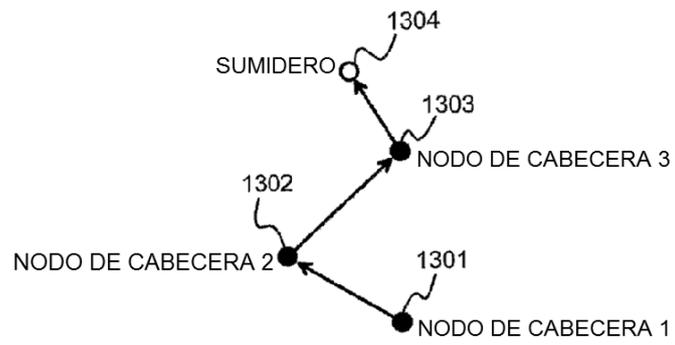


Fig. 13

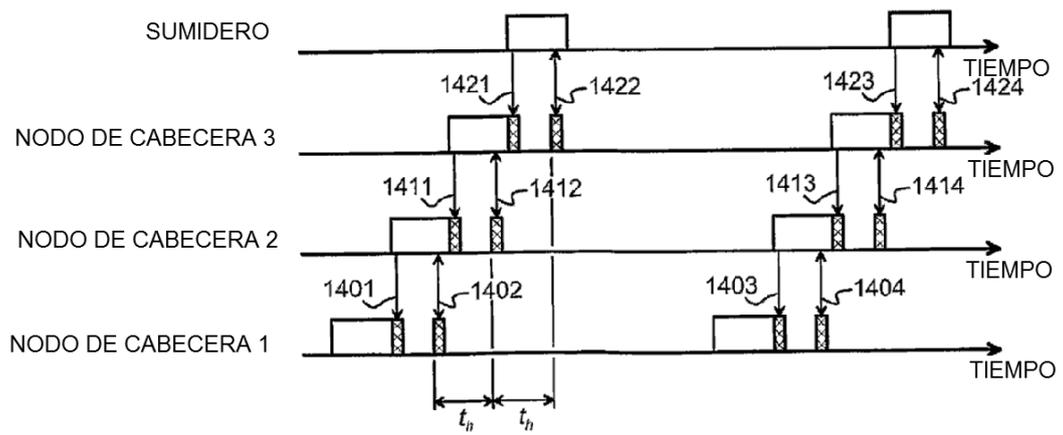


Fig. 14