

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 427 598**

51 Int. Cl.:

H04L 12/28 (2006.01)

H04W 52/28 (2009.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.10.2008** **E 08874984 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.05.2013** **EP 2359537**

54 Título: **Procedimiento para ajustar el funcionamiento de un nodo de enrutamiento de una red de comunicación inalámbrica asíncrona, nodo de red y red de comunicación que lo lleva a cabo**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
31.10.2013

73 Titular/es:

TELECOM ITALIA S.P.A. (50.0%)
Piazza degli Affari 2
20123 Milano, IT y
PIRELLI & C. S.P.A. (50.0%)

72 Inventor/es:

COLERI ERGEN, SINEM;
FISCHIONE, CARLO y
BOREAN, CLAUDIO

74 Agente/Representante:

PONTI SALES, Adelaida

ES 2 427 598 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

Procedimiento para ajustar el funcionamiento de un nodo de enrutamiento de una red de comunicación inalámbrica asíncrona, nodo de red y red de comunicación que lo lleva a cabo.

SECTOR DE LA INVENCION

- 5 **[0001]** La presente invención se refiere a un procedimiento para ajustar el funcionamiento de un nodo de enrutamiento de una red de comunicación inalámbrica asíncrona y a un nodo de red y una red de comunicación que lo lleva a cabo.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

- 10 **[0002]** Las redes WPAN [Redes de área personal inalámbricas] son conocidas desde hace algunos años; una red PAN [Red de área personal] puede ser definida como una red de ordenadores para la comunicación entre los dispositivos que hay cerca de una persona; una red WPAN es una Red PAN que utiliza las tecnologías de comunicación inalámbricas de corto alcance.

[0003] Una tecnología de comunicación que se utiliza muy a menudo para la implementación de un Red WPAN es la tecnología ZigBee.

- 15 **[0004]** Una de las principales y recientes aplicaciones de redes WPAN son las redes WSN [Red de Sensores inalámbrica].

[0005] En una red WPAN los componentes clave son los nodos de la red, también llamados dispositivos. En general, una red WPAN puede comprender una mezcla de red y los dispositivos impulsados por los dispositivos de batería; los dispositivos alimentados por baterías están diseñados para limitar su consumo de energía para asegurar una larga vida útil de sus baterías. Proporcionar un uso eficiente de la energía en redes WSN es particularmente importante con el fin de lograr un despliegue a largo plazo de las aplicaciones ya que los nodos de la red de sensores no pueden ser fácilmente recargados o reemplazados cuando la energía de su batería ha terminado.

20 **[0006]** El componente de un nodo de una red WPAN, que es el principal responsable del consumo de energía es el emisor-receptor de radio (tanto cuando se transmite como cuando se recibe), y la forma típica y eficaz de reducir el consumo de energía en una red WPAN asíncrona (una red en la que los nodos no tienen un reloj sincronizado y por lo tanto no transmiten y reciben de manera síncrona) es el uso de "ciclos de trabajo", es decir, permitiendo que el emisor-receptor de radio de los dispositivos operen intermitentemente durante cortos intervalos de tiempo, de esta manera, la funcionamiento de cada uno nodo es una secuencia periódica (tiempo de funcionamiento del emisor-receptor fijo) de un (corto) Intervalo despierto y un (largo) intervalo de latencia. Por supuesto, esto complica los protocolos de comunicación utilizados en las redes WPAN.

25 **[0007]** A partir de la técnica anterior, se conocen redes WSN asíncronas en las que todos (o casi todos) los nodos funcionan con baterías y por lo tanto, están diseñados para limitar el consumo de energía y protocolos MAC especiales en el que se usan para limitar el consumo de energía de los emisor-receptores de radio.

30 **[0008]** El artículo de J. Polastre y otros, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", SenSys 2004, noviembre de 2004, describe en detalle uno de estos protocolos MAC llamados "B-MAC", basados en "muestreo de preámbulo". De acuerdo con este protocolo, cuando un nodo emisor tiene datos para transmitir, se transmite un preámbulo que dura por lo menos tanto como el período de intervalo de latencia del nodo receptor (esta duración se conoce como "la duración del preámbulo"); cuando el nodo receptor despierta (esto sucede de acuerdo con un período denominado "intervalo de comprobación"), detecta el preámbulo y se mantiene despierto para recibir datos. En este artículo también menciona el uso de un conjunto de interfaces bidireccionales que permiten una aplicación para cambiar el "intervalo de comprobación" y la "longitud del preámbulo" con el fin de optimizar el consumo de energía, la latencia y el rendimiento y adaptarse a las condiciones cambiantes de la red.

35 **[0009]** El artículo de M. Buettner y otros, "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks", SenSys 2006, noviembre de 2006, describe en detalle otro de esos protocolos MAC llamado "X-MAC", basado en el "muestreo de preámbulo" y una secuencia de preámbulos de longitud fija corta. De acuerdo con este protocolo, cuando un nodo de origen tiene que transmitir un paquete de información, su transmisor transmite una serie de preámbulos cortos y de longitud fija, cada uno relativo a la dirección del nodo de destino; las pequeñas pausas entre preámbulos permiten que el receptor del nodo de destino se despierte (de acuerdo con su propio horario de funcionamiento interno), para detectar el preámbulo y para enviar una confirmación que detiene la secuencia de preámbulos e indica la disponibilidad del nodo de destino para recibir datos; los receptores que no son de destino que oyen los preámbulos de forma estroboscópica pueden volver a la latencia de inmediato, en lugar de permanecer despiertos durante la recepción de datos.

Este artículo también describe un algoritmo adaptativo que puede ser utilizado para ajustar dinámicamente los parámetros de ciclo de servicio con el fin de optimizar el consumo de energía por paquete, la latencia o ambos. El

artículo de Park y otros "Breath: A Self-Adapting Protocol for Wireless Sensor Networks in Control and Automation" SENSOR, MESH AND AD HOC COMMUNICATIONS AND NETWORKS, 2008. SECON '08, de Junio de 2008 describe un problema de optimización restringido, para el cual la función objetivo es el consumo de energía de red de los nodos de cúmulo y considera aspectos de capa física tales como el control de potencia y los ciclos de trabajo (ciclos de escucha/latencia)

[0010] Un enfoque diferente para reducir el consumo de energía se da a conocer en la patente de US 7.035.240; esta patente trata de un procedimiento y de la arquitectura de red para la implementación de una red eficiente energéticamente. La red incluye una pluralidad de nodos que recopilan y transmiten los datos que se enrutan en última instancia, a una estación base. Los nodos de la red forman un conjunto de grupos con un único nodo que actúa como un cúmulo de cabeza. El cúmulo de cabeza avisa a los nodos para que se unan a su cúmulo, programa la recolección de los datos dentro de un cúmulo, y luego transmite los datos a la estación base. Un clúster puede combinar inteligentemente los datos de los nodos individuales. Después de un período de funcionamiento, los cúmulos se reforman con un conjunto diferente de nodos que actúan como cabezas de cúmulo. La red proporciona un aumento de la vida útil del sistema mediante el equilibrio de la utilización de la energía de los nodos individuales.

RESUMEN DE LA INVENCION

[0011] El solicitante ha considerado que en redes de comunicaciones inalámbricas asíncronas, especialmente en redes WPAN / WSN, hay una necesidad de una mejor optimización del consumo de energía de los nodos de la red con respecto a los protocolos conocidos por las siguientes razones.

[0012] La solución conocida por la patente US7.035.240 se basa en un enfoque de alto nivel que requiere el equilibrio de carga y la agregación de datos en los nodos del clúster de cabeza de la red y proporciona una red síncrona dentro de cada cúmulo de la red basada en una programación TDMA [Acceso Múltiple de División de Tiempo].

[0013] Las soluciones conocidas a partir de los dos artículos mencionados anteriormente no tienen en cuenta el efecto de acceso aleatorio que es una función del tráfico de datos, los parámetros de MAC y la topología de la red y que es responsable de una gran parte del consumo de energía, en otras palabras, el modelo de consumo de energía es demasiado simplificado y no puede dar lugar a una verdadera reducción al mínimo.

[0014] La presente invención tiene por objeto mejorar las soluciones del estado de la técnica.

[0015] En particular, la presente invención aborda el problema de minimizar el consumo de energía en una red de comunicación inalámbrica de ciclo de trabajo asíncrono.

[0016] La idea básica detrás de la presente invención es el uso de un modelo de consumo de energía que tiene en cuenta el efecto de acceso aleatorio; de todos modos, con el fin de simplificar el modelo, la red se divide en una pluralidad de cúmulos de manera que cada uno de dichos cúmulos comprende un nodo de cúmulo de cabeza, a los efectos de esta división, un nodo de cúmulo de cabeza es un nodo de enrutamiento que se considera que sólo recibe los paquetes de datos de los otros nodos del cúmulo y los otros nodos del cúmulo son considerados nodos que sólo transmiten de paquetes de datos al nodo de cabeza de cúmulo - esto significa que de acuerdo con esta partición los cúmulos pueden superponerse parcialmente.

[0017] Con el fin de construir el modelo, el solicitante ha considerado que, cuando se intenta una transmisión dentro de un cúmulo por cualquiera de los nodos del cúmulo se encuentra una probabilidad de canal ocupado, que cuando la transmisión dentro de un cúmulo se lleva a cabo por cualquiera de los nodos del cúmulo se encuentra una probabilidad de comunicación de colisión, y que se transfiere un paquete de datos dentro de un cúmulo con una probabilidad de transferencia exitosa (que puede ser llamada "fiabilidad") y con un retraso medio de transferencia (que puede ser llamado "latencia"); además, el solicitante ha considerado la influencia del número de nodos de los cúmulos y de la velocidad media de generación de paquete de datos según la cual se transmiten los paquetes de datos por los nodos de los cúmulos. De acuerdo con el modelo propuesto en este documento, el consumo de energía de un cúmulo es principalmente una función de la probabilidad de canal ocupado, la probabilidad de comunicación de colisión, la duración del intervalo despierto y la duración del intervalo de latencia del nodo de cabeza de cúmulo; además, el consumo de energía es una función del número de nodos del cúmulo y la velocidad media de generación de paquete de datos.

[0018] La minimización del consumo de energía se lleva a cabo según unos valores predeterminados de la probabilidad de canal ocupado y de la probabilidad de comunicación de colisión y según una restricción predeterminada para la probabilidad de exitosa de transferencia y para el retraso medio de transferencia; de esta manera, se determinan unos valores óptimos de la duración del intervalo despierto y la duración del intervalo de latencia del nodo de cabeza de cúmulo. Una vez determinados estos valores óptimos, se configuran y se utilizan como parámetros de funcionamiento del nodo de cabeza de cúmulo.

[0019] La división de la red en una pluralidad de cúmulos puede fijarse y predeterminarse; como alternativa, puede ser una de las etapas que, según la presente invención puede llevarse a cabo sólo una vez o varias veces, por ejemplo periódicamente.

[0020] Es de señalar que, en general, los parámetros de funcionamiento de los distintos nodos de enrutamiento de la red serán diferentes.

5 **[0021]** La determinación de los parámetros óptimos de funcionamiento se puede repetir, por ejemplo, periódicamente, durante el funcionamiento de la red. Esto es ventajoso, por ejemplo, si la probabilidad de canal ocupado o la probabilidad de colisión de la comunicación o ambas cambian durante el funcionamiento de la red. Estas dos probabilidades se pueden determinar por cada nodo de encaminamiento de la red durante su funcionamiento, en particular, la probabilidad de canal ocupado se puede determinar mediante la recepción de las estimaciones de la probabilidad de canal ocupado realizadas por los otros nodos del mismo cúmulo y mediante el cálculo de un promedio o el máximo de las estimaciones recibidas.

10 **[0022]** Los valores óptimos de los parámetros de funcionamiento pueden ser determinados por cada nodo de enrutamiento de la red durante su funcionamiento; Los valores óptimos de los parámetros de operación pueden ser determinados por cada nodo de enrutamiento de la red durante su operación; con el fin de hacer esto de manera rápida y por medio de un hardware simple, esta determinación puede basarse en una tabla de valores calculados de antemano; esta tabla puede ser almacenada dentro de cada nodo de enrutamiento; este almacenamiento en los
15 nodos de enrutamiento puede llevarse a cabo por ejemplo por una estación base; esta estación base puede haber calculado todos los valores de la tabla o tablas antes de que la red comience a funcionar.

[0023] De acuerdo con aspectos adicionales, la presente invención se refiere a un nodo de red y una red de comunicaciones que implementa el procedimiento anterior que minimiza el consumo de energía.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

20 **[0024]** La presente invención se hará más evidentes a partir de la siguiente descripción que se considera junto con los dibujos adjuntos, en los que:

La figura 1 muestra una red de comunicación inalámbrica asíncrona sometida a ciclo de trabajo según la presente invención en el que se resaltan un primer cúmulo y un segundo cúmulo,

25 La figura 2 muestra diagramas de tiempo que explican el funcionamiento de un nodo fuente y un nodo de destino según un protocolo asíncrono de ciclo de trabajo MAC basado en un muestreo de preámbulo con múltiples preámbulos cortos,

La figura 3 muestra un diagrama de flujo que explica un procedimiento para estimar el canal ocupado probabilidad según la presente invención,

30 La figura 4 muestra un diagrama de flujo que explica un procedimiento para estimar la probabilidad de canal ocupado de acuerdo con la presente invención,

La figura 5 muestra una tabla de valores usada por un nodo de enrutamiento para determinar los parámetros de funcionamiento óptimos de acuerdo con la presente invención, y

La figura 6 muestra un diagrama de flujo que explica un procedimiento de utilización de la tabla de la figura 5 por un nodo de enrutamiento de acuerdo con la presente invención.

35 **[0025]** Debe entenderse que la siguiente descripción y los dibujos adjuntos no han de interpretarse como limitaciones de la presente invención, sino simplemente como ejemplos.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

40 **[0026]** La forma de realización de la presente invención que se describe a continuación se refiere a una red WPAN [Red de área personal inalámbrica], concretamente una red WSN [Red de Sensores inalámbrica] que emplea tecnología ZigBee, incluso si la presente invención puede aplicarse más en general a una red de comunicación inalámbrica asíncrona. El funcionamiento de un nodo de red está temporizado por medio de una señal de reloj propia, que se genera por un contador de tiempo (por lo general un temporizador local) como por ejemplo un cristal de cuarzo; el temporizador es utilizado por el nodo de red también para la medición de la duración de intervalos de tiempo. Como ya se ha explicado, una red se define como "asíncrona" si sus nodos no tienen un reloj sincronizado y
45 por lo tanto no transmiten y reciben de forma síncrona.

[0027] El funcionamiento de una red de comunicación inalámbrica asíncrona sometida a ciclos de trabajo es conocida y se describe, por ejemplo en el artículo ya citado de M. Buettner; adicionalmente, este artículo describe un protocolo MAC basado en la transmisión de una secuencia de preámbulos de longitud fija cortos, como es el caso de la realización de la presente invención que se describe a continuación.

50 **[0028]** La figura 1 muestra una red WSN según la presente invención y que incorpora una topología de malla ZigBee. Esta red comprende siete routers, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, y siete dispositivos finales, E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7.

[0029] La figura 2 muestra diagramas de tiempo que explican el funcionamiento de un nodo fuente SN (por ejemplo nodo E4) y un nodo de destino DN (por ejemplo nodo R3) cuando los datos se van a transmitir desde el nodo fuente SN hasta el nodo de destino DN en la red de la figura 1.

5 **[0030]** De acuerdo con un esquema de transmisión en "ciclo de trabajo", el nodo de destino DN se activa periódicamente para comprobar si hay datos para que él por ejemplo desde el nodo fuente SN, en caso afirmativo, que recibe los datos, si no, vuelve a dormir, lo que se repite periódicamente; el tiempo de permanencia en estado de latencia se denomina "tiempo de latencia" y corresponde a la duración de un intervalo de latencia R_s y el tiempo de permanencia en estado de vigilia se denomina "tiempo despierto" y corresponde a la duración de un intervalo despierto R_i .

10 **[0031]** En los protocolos MAC de "preámbulo de muestreo", cuando el nodo fuente tiene datos para transmitir al nodo de destino, se transmite una serie de paquetes de preámbulo cortos, que contienen cada uno el identificador del nodo de destino, o bien hasta que recibe un paquete de acuse de recibo desde el nodo de destino o se supera un "tiempo límite" TL que se corresponde con el tiempo de latencia máximo de un nodo de destino - en el ejemplo de la figura 2, un paquete de acuse de recibo ACK es recibido por el nodo fuente SN después de la transmisión de
15 solamente dos paquetes de preámbulo PRE1 y PRE2.

[0032] En general, si un nodo de destino se despierta y no detecta señales de radio en el canal de comunicación, se vuelve a dormir inmediatamente; si el nodo de destino recibe un paquete de preámbulo, pero no es el objetivo del paquete de preámbulo, se vuelve a dormir después de esta comprobación; si el nodo de destino recibe un paquete de preámbulo y es el objetivo de ese paquete preámbulo, que transmite un paquete de acuse de recibo al nodo
20 fuente después de la recepción del paquete de preámbulo. Después de la recepción del paquete de acuse de recibo, el nodo fuente transmite un paquete de datos al nodo de destino.

[0033] Los diagramas de la figura 2 muestran más detalles conectados a dicha comunicación; hay que destacar que la secuencia de los acontecimientos en la figura 2 es sólo una de las muchas posibilidades que pueden ocurrir durante el funcionamiento de la red de la figura 1.

25 **[0034]** Se envía una solicitud de transmisión RT a la capa MAC desde una capa superior del nodo fuente SN y una cantidad aleatoria de tiempo RB1 (llamada "random backoff") transcurre antes de que se detecte el canal de comunicación; la detección del canal se lleva a cabo durante un corto intervalo de tiempo CS1; en este momento, hay señales de radio en el canal de comunicación, es decir, el canal está ocupado (por lo general es utilizado por otro nodo de transmisión), por lo tanto, transcurre otra cantidad de tiempo aleatorio RB2 y luego se vuelve a detectar el canal durante un intervalo de tiempo CS2; ahora, el canal está disponible y por lo tanto un paquete de preámbulo
30 PRE1 es transmitido por el nodo de origen SN.

[0035] Después de la transmisión del paquete de preámbulo PRE 1, el nodo fuente SN pasa un intervalo de tiempo TO1 esperando para dar una respuesta desde el nodo de destino DN; en este caso, el intervalo de tiempo TO1 dura como un "tiempo de espera"; durante el intervalo de tiempo OT1, el nodo de destino DN no responde porque el nodo de destino DN estaba durmiendo cuando se transmitió el paquete de preámbulo PRE1.
35

[0036] Después del intervalo de tiempo OT1, como el nodo de destino DN no ha respondido, transcurre una cantidad de tiempo aleatoria RB3 antes de que se detecte el canal de comunicación durante un intervalo de tiempo CS3 (el canal se encuentra disponible) y un paquete de preámbulo PRE2 es transmitido por el nodo de origen SN; durante el periodo de tiempo aleatorio RB3, el nodo de destino DN se despierta (instante de tiempo t_{Aw} en la figura 2).

40 **[0037]** Después de la transmisión del paquete de preámbulo PRE2, el nodo fuente SN pasa un intervalo de tiempo TO2 esperando una respuesta del nodo de destino DN; en este caso, el tiempo de intervalo TO2 dura menos que el "tiempo de espera" porque el nodo de destino DN estaba despierto cuando se transmitía el paquete de preámbulo PRE2 y se respondía al nodo de origen SN.

[0038] Después de la recepción del paquete de preámbulo PRE2, el nodo de destino DN tarda una cantidad de tiempo aleatoria RB4 antes de detectar el canal de comunicación durante un intervalo de tiempo CS4 (el canal se encuentra disponible) y transmitir un paquete de reconocimiento ACK al nodo fuente SN.
45

[0039] Después de la recepción del paquete de reconocimiento ACK, el nodo fuente SN tarda una cantidad de tiempo aleatoria RB5 antes de detectar el canal de comunicación durante un intervalo de tiempo CS5 (el canal se encuentra disponible) y transmitir un paquete de datos DAT al nodo de destino DN.

50 **[0040]** Después de la transmisión del paquete de reconocimiento ACK, el nodo de destino DN simplemente espera el paquete de datos DAT y vuelve a la latencia (instante de tiempo t_{As} en la figura 2) después de haber recibido el paquete de datos DAT.

[0041] En los protocolos de "muestreo de preámbulo", la cantidad de tiempo utilizado en el acceso aleatorio para transmitir un paquete de datos es, en general, mucho mayor que la cantidad de tiempo utilizado en la transmisión (por ejemplo, según la norma IEEE 802.15.4 con el ajuste de parámetros por defecto, el máximo tiempo de retroceso antes de la transmisión de paquetes de datos es de 27.4 ms mientras que el tiempo de transmisión de un paquete
55

de datos de 56 bytes es de 1.79ms a 250 kbps); el acceso aleatorio depende del tráfico de datos, de los parámetros MAC y de la topología de la red; el acceso aleatorio provoca un consumo de energía; por lo tanto, un modelo de consumo de energía preciso también debe tener en cuenta el acceso aleatorio.

5 **[0042]** Para el modelo de consumo de energía de acuerdo con la presente invención, se supone que los nodos de la red se organizan en cúmulos; se puede aplicar el mismo modelo a cada cúmulo.

[0043] En una topología de cúmulos, los nodos se organizan en cúmulos con un nodo que actúa como nodo de cabeza de clúster (que es un nodo de enrutamiento); todos los nodos de los cúmulos (Excepto el nodo de cabeza de cúmulo) transmiten sus datos directamente al nodo de cabeza de cúmulo.

10 **[0044]** Si la red tiene una topología de "árbol", los nodos de cabeza de cúmulo reciben los datos de todos los otros nodos de los cúmulos (que son dispositivos finales) y los envía a una estación base que actúa como nodo coordinador; si la red tiene una topología de "malla", los nodos de cabeza de cúmulo reciben los datos de todos los demás nodos de los cúmulos y los reenvía a los nodos de router.

[0045] La aplicación del modelo de consumo de energía de acuerdo con la presente invención a una topología de "árbol" es sencilla.

15 **[0046]** Con el fin de aplicar este modelo a una topología de "malla", la red se divide en una pluralidad de cúmulos de manera que cada uno de dichos cúmulos comprende un nodo de cabeza de cúmulo; para el propósito de esta partición, un nodo de cúmulo de cabeza es un nodo de enrutamiento que sólo recibe paquetes de datos desde los otros nodos del cúmulo y los otros nodos del cúmulo son nodos considerados que transmiten de paquetes de datos al nodo de cabeza de cúmulo; con el fin de tener en cuenta el hecho de que un nodo de enrutamiento puede no sólo recibir sino también transmitir los paquetes de datos, un nodo de enrutamiento pertenece en general al menos a dos cúmulos diferentes, pero es el nodo de cabeza de cúmulo de un solo cúmulo, lo que significa que, de acuerdo con esta división, los cúmulos pueden superponerse parcialmente.

20 **[0047]** Con referencia a la figura. 1, un primer cúmulo CL1 de la red comprende los routers R2, R3 y R4 y dispositivos finales E4 y E5 y considera el router R3 como su nodo de cabeza de cúmulo, y un segundo cúmulo CL2 de la red comprende routers R3, R4, R5 y R6 y sin dispositivos finales y considera el router R4 como su nodo de cabeza de cúmulo; por lo tanto, los nodos R3 y R4 pertenecen a dos cúmulos diferentes, es decir,

25 CL1 y CL2, pero cuando se considera el primer cúmulo CL1 el nodo R3 solamente recibe paquetes de datos y el nodo R4 solamente transmite paquetes de datos y al considerar el segundo cúmulo CL2 el nodo R3 solamente transmite paquetes de datos y el nodo R4 solamente recibe paquetes de datos. Debe entenderse que la partición completa de la red de la figura 1 prevé siete cúmulos, uno para cada router de la red.

30 **[0048]** A lo largo de la presente descripción, se supone que la tasa de generación de paquetes de datos de los nodos de la red es tal que durante una duración de tiempo determinado por la duración del intervalo de latencia más la duración del intervalo despierto, un nodo tiene como máximo de un paquete de datos a transmitir. En consecuencia, si un nodo no puede transmitir un paquete de datos dentro de $R_i + R_s$, entonces el paquete se descarta.

35 **[0049]** A continuación, se utilizarán a menudo las siglas "RX" y "rx" en lugar de "Receptor" o "nodo receptor" y las siglas "TX" y "tx" en lugar de "transmisor" o "nodo de transmisión".

[0050] Todos los símbolos en las siguientes expresiones matemáticas se enumeran y se explican en la siguiente tabla.

Símbolo	Significado
nodo TX	un nodo transmisor
nodo RX	un nodo receptor (cabeza de cúmulo)
T_1	retraso aleatorio empleado por el nodo TX antes de transmitir realmente un paquete de preámbulo
T_2	retraso aleatorio empleado por el nodo TX a partir del inicio de una transmisión hasta la recepción del reconocimiento
T_3	retraso aleatorio empleado por el nodo TX desde el instante de recepción de reconocimiento hasta la transmisión de un paquete de datos
T_p	retraso aleatorio a esperar antes de que un paquete de datos sea recibido con éxito
T_a	tiempo de latencia aleatorio de RX tal como se ve desde TX (distribuido uniformemente en $[0, R_a]$)
T_a	tiempo de escucha aleatorio de RX tal como se calcula tras la recepción de un preámbulo

ES 2 427 598 T3

	(distribuido uniformemente en $[0, R_t]$)
T_{ack}	tiempo aleatorio antes de que el nodo RX pueda acceder al canal y enviar un reconocimiento.
$T_{TX, out}$	tiempo máximo que un nodo TX espera un ACK después de haber enviado un preámbulo.
T_{out}	tiempo máximo que un nodo TX espera desde el momento de la recepción de un ACK antes de abandonar la transmisión del paquete de datos.
N_p	número máximo de preámbulos que pueden ser enviados
N_b	número máximo de back-off para detectar el canal para enviar un paquete de preámbulo
N_{Bmax}	número máximo de back-offs antes de declarar un fallo de acceso a canal
N	número de nodos en un cúmulo
λ	velocidad de generación de paquetes por nodo
d_{TX}	probabilidad de que un nodo TX tenga un paquete a enviar en el intervalo $R_a + R_t$
c	probabilidad de canal ocupado
b	probabilidad de colisión de preámbulos
p	probabilidad de colisión de paquetes de datos
Ψ_{min}	probabilidad mínima de transmisión de paquete exitosa (requisito de fiabilidad)
τ_{max}	probabilidad máxima de retraso máximo (requisito de latencia)
E_{max}	consumo máximo de energía por ciclo de escucha-latencia (requisito de energía)
$S_{p,j}$	tiempo back-off aleatorio j-ésimo de un preámbulo
$\mu S_{p,j} S_c$	promedio de duración de tiempo de $S_{p,j}$ de detección de canal cálculo de canal libre
S_p	duración de tiempo de un paquete de preámbulo
S_a	duración de tiempo de un paquete de reconocimiento
S_d	duración de tiempo de un paquete de datos
S_b	duración de tiempo de formación del periodo de tiempo básico utilizado por el algoritmo CSMA/CA
R_a	tiempo de latencia del nodo receptor (cabeza de cúmulo)
R_t	tiempo activo del nodo receptor (cabeza de cúmulo)
A_k	acontecimiento que ocurre cuando el canal está ocupado k-1 veces
B_k	acontecimiento que ocurre cuando un preámbulo debe ser enviado k veces antes de ser recibido en el tiempo activo del nodo RX y el reconocimiento correspondiente es enviado por el nodo RX y recibido antes del fin de tiempo del nodo TX
g	acontecimiento que ocurre cuando un preámbulo se recibe con éxito durante el estado activo del receptor
$H g$	acontecimiento que ocurre cuando el ACK se envía con éxito antes del time out de que RX expire siempre que un preámbulo se reciba con éxito
$I g, H$	acontecimiento que ocurre cuando el TX envía con éxito un paquete de datos siempre que un preámbulo se recibe con éxito y el ACK también se recibe con éxito
P_{tx}	potencia de transmisión
P_{rx}	potencia de recepción
P_a	potencia de latencia

MODELIZACIÓN DEL RETRASO

[0051] La probabilidad de retardo para la transferencia de un paquete de datos desde un nodo fuente (nodo transmisor) a un nodo de destino (nodo receptor o nodo de cúmulo de cabeza) está dada por la siguiente expresión

$$\mathbb{E}_{T_a} \mathbb{E}_{T_1} \Pr[(T_p \leq t_{\max})(T_3 \leq T_{\text{out}})] \triangleq D_{\max}(R_l; R_s, T_{\text{TX,out}}, T_{\text{out}}, c, t_{\max})$$

5

10 donde \mathbb{E}_{T_a} y \mathbb{E}_{T_1} indican la media estadística con respecto a la distribución de T_a (T subíndice A) y T_1 (T subíndice L) respectivamente; T_a (T subíndice A) es el tiempo aleatorio a esperar a partir del inicio de las transmisiones hasta el inicio del intervalo despierto, T_1 (T subíndice L) es la duración de tiempo desde el momento en que el paquete de preámbulo es recibido durante el intervalo despierto hasta que expira el intervalo despierto, T_p es el retraso a esperar antes de que un paquete de datos sea recibido con éxito, t_{\max} es el retraso máximo deseado por la aplicación, c es la probabilidad de comunicación de colisión.

[0052] La probabilidad de que un paquete se retrase t_{\max} o menos que t_{\max} viene dada por la siguiente expresión

$$\Pr(T_p \leq t_{\max}) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu_{T_p}}{\sigma_{T_p} \sqrt{2}} \right) \right)$$

15 **[0053]** La media y la varianza de T_p vienen dadas por las siguientes expresiones

$$\mu_{T_p} = \mu_{T_2} + \mu_{T_3}$$

$$\sigma_{T_p}^2 = \sigma_{T_2}^2 + \sigma_{T_3}^2$$

20 donde μ_{T_p} y σ_{T_p} son la media y la varianza de T_p respectivamente, T_2 es el periodo de tiempo que necesita el nodo TX desde el momento en que el paquete de datos se genera internamente hasta que un paquete de reconocimiento correspondiente alcanza el nodo TX y T_3 es el periodo de tiempo que necesita el nodo TX que empieza justo después de la recepción de los paquetes de reconocimiento y que finaliza justo después de haberse transmitido el paquete de datos.

[0054] La media y la varianza de T_2 están dadas por las siguientes expresiones

$$\mu_{T_2} = \sum_{k=1}^{N_p} [k\mu_{T_1} + \mu_{T_{\text{ack}}} + (k-1)T_{\text{TX,out}}] \frac{\Pr[\mathcal{B}_k]}{\sum_{k=1}^{N_p} \Pr[\mathcal{B}_k]}$$

$$\sigma_{T_2}^2 = \sum_{k=1}^{N_p} (k^2 \sigma_{T_1}^2 + \sigma_{T_{\text{ack}}}^2) \Pr[\mathcal{B}_k].$$

25 donde

$$\begin{aligned} \Pr[\mathcal{B}_k] = & (\Pr[\mathcal{C}_k \mathcal{E}_k] - \Pr[\bar{\mathcal{D}}_k]) \Pr[T_{\text{ack}} \leq T_{\text{TX,out}}] (1-b)^2 + \\ & (\Pr[\mathcal{E}_k] - \Pr[\mathcal{C}_k \mathcal{E}_k]) \Pr[T_{\text{ack}} \leq T_{\text{TX,out}}] b (1-b)^2 + \\ & (\Pr[\mathcal{E}_k] - \Pr[\mathcal{C}_k \mathcal{E}_k]) (1 - \Pr[T_{\text{ack}} \leq T_{\text{TX,out}}]) \Pr[T_{\text{ack}} \leq T_{\text{TX,out}}] (1-b)^3 + \\ & (\Pr[\mathcal{E}_k] - \Pr[\mathcal{C}_k \mathcal{E}_k]) (\Pr[T_{\text{ack}} \leq T_{\text{TX,out}}])^2 b (1-b)^3, \end{aligned}$$

donde

$$\Pr[\mathcal{C}_k] = P_1 \left(\frac{T_a - (k-2)T_{\text{TX,out}}}{k-1} \right),$$

$$\Pr[\bar{\mathcal{D}}_k] = P_1 \left(\frac{T_a - (k-1)T_{\text{TX,out}}}{k} \right),$$

$$\Pr[\mathcal{E}_k] = P_1 \left(\frac{T_a + T_i - (k-1)T_{\text{TX,out}}}{k} \right),$$

$$\Pr[\mathcal{C}_k \mathcal{E}_k] = \Pr[\mathcal{C}_k] \Pr[T_1 \leq T_i - T_{\text{TX,out}}] + \Pr[\mathcal{E}_k] (1 - \Pr[T_1 \leq T_i - T_{\text{TX,out}}]).$$

y

$$\Pr[T_1 \leq t] = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu_{T_1}}{\sigma_{T_1} \sqrt{2}} \right) \right) \triangleq P_1(t)$$

5

[0055] Como se desprende de las expresiones anteriores, la media y la varianza de T_2 están relacionadas con la media y la varianza de T_1 (el periodo de tiempo empleado por el nodo TX desde el momento en que el paquete de datos se genera internamente hasta que el primer paquete de preámbulo correspondiente es en realidad transmitido) que están dadas por las siguientes expresiones

$$\mu_{T_1} = \mathbb{E} T_1 = \sum_{k=1}^{N_b} \mu_{\Sigma_k} \frac{\Pr[\mathcal{A}_k]}{\sum_{k=1}^{N_b} \Pr[\mathcal{A}_k]} = \sum_{k=1}^{N_b} \mu_{\Sigma_k} \frac{c^{k-1}(1-c)}{\sum_{k=1}^{N_b} c^{k-1}(1-c)},$$

$$\rho_{T_1} = \mathbb{E} T_1^2 = \sum_{k=1}^{N_b} \rho_{\Sigma_k} \frac{c^{k-1}(1-c)}{\sum_{k=1}^{N_b} c^{k-1}(1-c)}.$$

10

$$\sigma_{T_1}^2 \triangleq \rho_{T_1} - \mu_{T_1}^2$$

donde

$$\mu_{\Sigma_k} = \mathbb{E} [\Sigma_k] = \sum_{j=1}^k [\mu_{S_{p,j}} + S_c].$$

$$\sigma_{\Sigma_k}^2 = \mathbb{E} [\Sigma_k - \mathbb{E} \Sigma_k]^2 = \sum_{j=1}^k \sigma_{S_{p,j}}^2.$$

$$\rho_{\Sigma_k} = \sigma_{\Sigma_k}^2 + \mu_{\Sigma_k}^2$$

donde

$$\mu_{S_{p,j}} = \begin{cases} \frac{(2^{r(j)} - 1) S_b}{2}, & \text{for } r(j) = 1, \dots, BE_{\max}; \\ \frac{(2^{BE_{\max}} - 1) S_b}{2}, & \text{for } r(j) > BE_{\max}. \end{cases}$$

$$\sigma_{S_{p,j}}^2 = \begin{cases} \frac{(2^{2r(j)} - 1) S_b^2}{12}, & \text{for } r(j) = 1, \dots, BE_{\max}; \\ \frac{(2^{2BE_{\max}} - 1) S_b^2}{12}, & \text{for } r(j) > BE_{\max}. \end{cases}$$

$$r(j) = \text{rem}(j, NB_{\max} + 1)$$

- 5 **[0056]** Como se desprende de las expresiones anteriores, la media y la varianza de T_2 también están relacionadas con la media y la varianza de T_{ack} (el periodo de tiempo desde el final de la transmisión de un paquete de preámbulo hasta el final de la transmisión del correspondiente paquete de reconocimiento) que están dadas por las siguientes expresiones

$$f_{T_{\text{ack}}} \sim \frac{1}{\sigma_{T_{\text{ack}}} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_{T_{\text{ack}}})^2}{2\sigma_{T_{\text{ack}}}^2}\right)$$

$$\mu_{T_{\text{ack}}} = \sum_{k=1}^{N_a} \mu_{\Sigma_k} \frac{c^{k-1}(1-c)}{\sum_{k=1}^{N_a} c^{k-1}(1-c)},$$

$$\rho_{T_{\text{ack}}} = \sum_{k=1}^{N_a} \rho_{\Sigma_k} \frac{c^{k-1}(1-c)}{\sum_{k=1}^{N_a} c^{k-1}(1-c)},$$

$$\sigma_{T_{ack}}^2 \triangleq \rho_{T_{ack}} - \mu_{T_{ack}}^2 .$$

[0057] La media y la varianza de T_3 están dadas por las siguientes expresiones

$$\mu_{T_3} = \sum_{k=1}^{N_d} \mu_{\Sigma_k} \frac{c^{k-1}(1-c)}{\sum_{k=1}^{N_a} c^{k-1}(1-c)} ,$$

$$\rho_{T_3} = \sum_{k=1}^{N_d} \rho_{\Sigma_k} \frac{c^{k-1}(1-c)}{\sum_{k=1}^{N_a} c^{k-1}(1-c)} ,$$

$$\sigma_{T_3}^2 \triangleq \rho_{T_3} - \mu_{T_3}^2 .$$

MODELIZACIÓN DE LA FIABILIDAD

- 5 [0058] La probabilidad de transferir un paquete de datos con éxito desde un nodo fuente (nodo que transmite) hasta un nodo de destino (nodo que recibe o nodo de cabeza de cúmulo), que se puede llamar "fiabilidad", viene dada por la siguiente expresión

$$R_{\min}(R_t, R_s, T_{TX, \text{out}}, T_{\text{out}}, c, p) = \mathbb{E}_{T_a} \mathbb{E}_{T_t} \Pr[\mathcal{G}] \Pr[\mathcal{I}|\mathcal{G}] .$$

- 10 donde la probabilidad de que un paquete de preámbulo sea transmitido con éxito durante el intervalo despierto del nodo RX y el paquete de reconocimiento correspondiente sea transmitido con éxito antes de que expire el tiempo del nodo TX viene dada por la siguiente expresión

$$\Pr[\mathcal{G}] = \sum_{k=1}^{N_p} \Pr[\mathcal{B}_k] .$$

- 15 la probabilidad de que el nodo TX transmita un paquete de datos con éxito, siempre que un paquete de preámbulo se reciba con éxito y el paquete de reconocimiento también se reciba con éxito, viene dada por la siguiente expresión

$$\Pr[\mathcal{I}|\mathcal{G}] = (1 - c^{NB_{\max}})(1 - c^{N_a})(1 - c^{N_d})(1 - p) .$$

MODELIZACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA

[0059] El consumo medio de energía (en otras palabras, el valor esperado E de la energía total E_{tot}), normalizado por $R_t + R_s$, para cada cúmulo de la red viene dado por la siguiente expresión:

$$\mathbb{E} E_{\text{tot}} = (N d_{\text{TX}} \mathbb{E} E_{\text{tx}} + \mathbb{E} E_{\text{rx}}) / (R_s + R_l)$$

5 donde N es el número de nodos transmisores en el cúmulo (igual al número total de los nodos del cúmulo menos uno, es decir el nodo de cabeza de cúmulo) y d_{TX} es la probabilidad de que un nodo que transmite tiene al menos un paquete de datos a transmitir al nodo de cabeza de cúmulo durante el intervalo de tiempo de $R_l + R_s$, es decir $d_{\text{TX}} = 1 - e^{-\lambda(R_s+R_l)}$, donde λ es la tasa de generación de paquete de datos promedio.

[0060] En esta expresión, el primer sumando es el consumo medio de energía de los nodos de transmisión y el segundo sumando es el consumo medio de energía del nodo receptor, es decir, el nodo de cabeza de cúmulo.

[0061] El consumo medio de energía de un nodo de transmisión está dado por la siguiente expresión

$$\begin{aligned} \mathbb{E} E_{\text{tx}} = & \sum_{i=1}^{N_p} \{ i \mathbb{E} [E_{\text{tx},T_1}] + (i-1) \mathbb{E} E_{T_{\text{TX},\text{out}}} + \mathbb{E} [E_{\text{tx},T_{\text{ack}}}] + \mathbb{E} E_{\text{tx},T_{\text{data}}} \} \text{Pr}[\mathcal{B}_i] \\ & + (N_p E_{\text{tx},T_1} + (N_p - 1) E_{T_{\text{TX},\text{out}}} + E_{\text{tx},T_{\text{ack}}}) \left(1 - \sum_{i=1}^{N_p} \text{Pr}[\mathcal{B}_i] \right). \end{aligned}$$

10 **[0062]** La primera línea en la ecuación anterior corresponde a la energía empleada en el caso de transmisión exitosa del paquete de datos y la segunda línea corresponde a la energía empleada en el caso de que transmisión sin éxito del paquete de datos.

15 **[0063]** Los cuatro sumandos en la primera línea de la expresión anterior son, respectivamente, la energía para el acceso al canal y la transmisión de "i" paquetes de preámbulo siempre que se produzca el acontecimiento \mathcal{B}_i , a saber, el i-ésimo paquete de preámbulo se transmite con éxito y el paquete de confirmación correspondiente fue recibido con éxito, la energía emplea durante los "i-1" (fijados) periodos de tiempo del nodo TX para los paquetes de preámbulo, la energía para recibir un paquete de confirmación, la energía para transmitir un paquete de datos.

20 **[0064]** Los tres sumandos en la segunda línea de la expresión anterior son, respectivamente, la energía empleada cuando se transmiten N_p (el número máximo de paquetes de preámbulo) preámbulo paquetes, pero ningún paquete de datos se transmite ya sea porque el canal está ocupado o se ha perdido el intervalo despierto del nodo receptor debido a las colisiones o al backoff aleatorio.

[0065] Estos sumandos se definen por las siguientes expresiones

$$\mathbb{E} E_{\text{tx},T_1} = \sum_{j=1}^{N_b} \left[\sum_{k=1}^j (P_s \mu_{S_p,k} + P_{\text{rx}} S_c) + P_{\text{tx}} S_p \right] \Pr[\mathcal{A}_j],$$

$$E_{T_{\text{TX,out}}} = T_{\text{TX,out}} P_{\text{rx}};$$

$$\mathbb{E} E_{\text{tx},T_{\text{ack}}} = \sum_{j=1}^{N_a} \left[\sum_{k=1}^j (\mu_{S_p,k} + S_c) + S_a \right] P_{\text{rx}} \Pr[\mathcal{A}_j],$$

$$\begin{aligned} \mathbb{E} E_{\text{tx},T_{\text{data}}} &= \sum_{j=1}^{N_d} \left[\sum_{k=1}^j (P_s \mu_{S_p,k} + P_{\text{rx}} S_c) + P_{\text{tx}} S_d \right] \Pr[\mathcal{A}_j] \\ &+ \left[\sum_{k=1}^{N_d} (P_s \mu_{S_p,k} + P_{\text{rx}} S_c) + P_{\text{tx}} S_d \right] \Pr[\bar{\mathcal{A}}], \end{aligned}$$

[0066] En estas ecuaciones, se han utilizado los siguientes términos:

$$\begin{aligned} \Pr[\mathcal{B}_k] &= (\Pr[\mathcal{C}_k \mathcal{E}_k] - \Pr[\bar{\mathcal{D}}_k]) \Pr[T_{\text{ack}} \leq T_{\text{TX,out}}] (1-b)^2 + \\ &(\Pr[\mathcal{E}_k] - \Pr[\mathcal{C}_k \mathcal{E}_k]) \Pr[T_{\text{ack}} \leq T_{\text{TX,out}}] b (1-b)^2 + \\ &(\Pr[\mathcal{E}_k] - \Pr[\mathcal{C}_k \mathcal{E}_k]) (1 - \Pr[T_{\text{ack}} \leq T_{\text{TX,out}}]) \Pr[T_{\text{ack}} \leq T_{\text{TX,out}}] (1-b)^3 + \\ &(\Pr[\mathcal{E}_k] - \Pr[\mathcal{C}_k \mathcal{E}_k]) (\Pr[T_{\text{ack}} \leq T_{\text{TX,out}}])^2 b (1-b)^3, \end{aligned}$$

Donde

$$\Pr[\mathcal{C}_k] = P_1 \left(\frac{T_a - (k-2)T_{\text{TX,out}}}{k-1} \right),$$

$$\Pr[\bar{\mathcal{D}}_k] = P_1 \left(\frac{T_a - (k-1)T_{\text{TX,out}}}{k} \right),$$

$$\Pr[\mathcal{E}_k] = P_1 \left(\frac{T_a + T_l - (k-1)T_{\text{TX,out}}}{k} \right),$$

$$\Pr[\mathcal{C}_k \mathcal{E}_k] = \Pr[\mathcal{C}_k] \Pr[T_1 \leq T_l - T_{\text{TX,out}}] + \Pr[\mathcal{E}_k] (1 - \Pr[T_1 \leq T_l - T_{\text{TX,out}}]).$$

5

[0067] El consumo de energía en el nodo de cabeza de cúmulo ("Ex") viene dado por la energía consumida para la escucha inactiva, el envío de un paquete de confirmación y la recepción de un paquete de datos. Es difícil proporcionar una expresión en forma cerrada para las probabilidades de estos acontecimientos, debido a que hay una elevada correlación cruzada entre ellos y entre los diferentes nodos. Como resultado, una caracterización exacta requeriría la modelización de la probabilidad de que el nodo receptor esté ocupado con la recepción de un paquete de datos, mientras que algún otro nodo está intentando enviar otro paquete de datos. Por lo tanto, teniendo en cuenta que la energía empleada en el nodo receptor es pequeña si se compara con la energía empleada en el nodo de transmisión, se utiliza el siguiente límite superior:

10

$$E E_{rx} \leq R_s P_s + (R_l + T_{out}) \max(P_{tx}, P_{rx}) .$$

Donde se supone que el nodo que recibe puede estar escuchando durante un time-out (" T_{out} " = periodos de time out fijados del nodo RX para el paquete de datos), después del final del intervalo despierto si se transmitió un paquete de reconocimiento justo antes del final del intervalo despierto.

MINIMIZACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA

[0068] Antes de utilizar las expresiones de la energía, del retardo y la fiabilidad que se acaban de determinar, es necesario determinar la probabilidad de canal ocupado cuando se intenta la transmisión y la probabilidad de comunicación de colisión durante la transmisión. Después, se pueden determinar los valores óptimos de la duración del intervalo despierto y la duración del intervalo de latencia que reducen bajo un umbral establecido, por ejemplo minimizan, el consumo de energía.

[0069] Según la mejor realización de la presente invención, tanto la probabilidad de canal ocupado como la probabilidad de comunicación son variables y se determinan de forma repetida (por ejemplo, periódicamente) para cada cúmulo durante el funcionamiento de la red y sus valores se utilizan entonces para determinar repetidamente valores óptimos de la duración del intervalo despierto y la duración del intervalo de latencia para cada nodo de cabeza de cúmulo.

DETERMINACIÓN DE PROBABILIDAD DE CANAL OCUPADO

[0070] La probabilidad de canal ocupado se calcula en cada nodo del cúmulo que no son de cabeza mientras se intenta la transmisión de un paquete (un paquete de preámbulo o paquete de datos) al nodo de cabeza de cúmulo. La figura 3 muestra un posible diagrama de flujo del procedimiento para la estimación de la probabilidad de canal ocupado.

[0071] La estimación realizada por un nodo puede ser transmitida al nodo de cabeza de cúmulo en la carga útil de un paquete de preámbulo; preferiblemente, cada vez que un paquete de preámbulo se transmite al nodo de cabeza de cúmulo, el nodo que transmite inserta en la carga útil su última estimación de probabilidad de canal ocupado.

[0072] El nodo de cabeza de cúmulo puede almacenar las estimaciones de probabilidad de canal ocupado recibidas de sus nodos vecinos (por ejemplo, un valor para cada nodo vecino) en una tabla; la probabilidad de canal ocupado a utilizar para la determinación de los parámetros de funcionamiento óptimos se calcula preferentemente como la media de los valores almacenados en esta tabla, como alternativa, por ejemplo, la probabilidad de canal ocupado a utilizar para la determinación de los parámetros óptimos de funcionamiento puede ser calculada como el máximo de los valores almacenados en esta tabla.

[0073] El ejemplo de la figura 3 se refiere al caso de mecanismo no ranurado IEEE 802.15.4 CSMA / CA [Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance]: cada nodo de la red tiene dos variables: NB y BE. NB es el Número de Backoffs (que es una unidad de período de tiempo para medir un período de tiempo aleatorio, que se denomina "tiempo de retroceso aleatorio") que se utiliza al intentar la transmisión actual; NB se inicializa a 0 antes de cada nueva transmisión. BE es el exponente de retroceso, que se relaciona con la cantidad de backoffs que un nodo debe esperar antes de intentar evaluar el canal. Los parámetros que afectan al tiempo de backoff aleatorio son minBE, maxBE y maxNB, que corresponden a los mínimos y máximos de BE y el máximo de NB, respectivamente.

[0074] NB se inicializa a 0 y BE se inicializa a minBE (etapa 301). Los retrasos en la capa MAC para un número aleatorio de backoffs en el rango de 0 a $2BE-1$ (etapa 302) y solicita entonces a la capa física que lleve a cabo una CCA [Evaluación de Canal libre] (etapa 303). Se considera el resultado de la CCA (etapa 304): si el canal está ocupado (flecha N saliente del bloque 304), no se accede al canal y la capa MAC incrementa tanto NB como BE en uno, lo que garantiza que BE sigue siendo inferior a maxBE (etapa 306), si el canal está disponible (flecha Y saliente del bloque 304) se accede al canal y el procedimiento termina con éxito (etapa 310). Después de incrementar NB y BE, se realiza una comprobación sobre el valor de NB (etapa 307), a saber, si el valor de NB es mayor que maxNB; si la verificación es positiva (flecha Y saliente del bloque 307), no se accede al canal y el procedimiento finaliza sin éxito (etapa 308), si el control es negativo (flecha N saliente del bloque 307), la capa MAC realiza retraso para un número aleatorio de backoffs utilizando los valores actualizados de NB y BE (etapa 302). La probabilidad de canal ocupado "C" se inicializa a un valor inicial "C0" y se actualiza durante el proceso anterior: si el canal está ocupado (flecha N saliente del bloque 304) se actualiza a $c = \alpha c + (1 - \alpha) 1$ (etapa 305) y si el canal está disponible (flecha Y saliente del bloque 304) se actualiza a $c = \alpha c$ (etapa 309), en el que α es un factor de ponderación, por ejemplo 0.9 o 0.99.

DETERMINACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE COLISIÓN

[0075] Un nodo de transmisión podría concluir que una colisión ha ocurrido con un paquete de preámbulo transmitido cuando no se recibe ningún paquete de confirmación en respuesta a la misma; de todos modos, la razón de la falta de recepción de un paquete de confirmación es, en la mayoría de los casos, que el nodo de destino está durmiendo durante la transmisión.

5 [0076] Por lo tanto, de acuerdo con la presente invención, la probabilidad de colisión se determina ventajosamente en el receptor (es decir, el nodo de cabeza de cúmulo) lateral, que es el nodo de cabeza de cúmulo. La figura 4 muestra un posible diagrama de flujo del procedimiento para determinar la probabilidad de colisión en cualquier intento de recepción.

10 [0077] Un contador "n" se inicializa a 0 (etapa 401). El nodo de cabeza de cúmulo verifica el RSSI [Received Signal Strength Indicator] (etapa 402). Si el RSSI es mayor que el umbral de recepción "R_{th}" (Si el RSSI es mayor que el umbral de recepción "; de lo contrario (flecha N saliente del bloque 402) los paquetes no están siendo transmitidos y se reinicia el contador (etapa 401). Si hay transmisión, el nodo de cabeza de cúmulo cuenta el número de símbolos durante el cual el RSSI está por encima del umbral de recepción mediante el incremento de contador "" (etapa 403) y comparando su valor con el número mínimo de símbolos que forman un paquete " N-ésimo " (etapa 404). Si el número de símbolos así contados es mayor que N-ésimo, (flecha Y saliente del bloque 404) se está recibiendo un paquete y se lleva a cabo una comprobación en los bits del preámbulo (etapa 405). Si no se detectan con éxito los bits de preámbulo (flecha N saliente del bloque 405) el nodo de cabeza de cúmulo asume que ha habido una colisión y actualiza la probabilidad de colisión a $p = \beta p + (1 - \beta)1$ (etapa 406). Si se detectan correctamente los bits de preámbulo (Flecha Y saliente del bloque 405), se verifica el CRC [comprobación de redundancia cíclica] (etapa 407). Si CRC no comprueba (flecha N saliente del bloque 407) se ha producido una colisión y la probabilidad de colisión se actualiza a $p = \beta p + (1 - \beta) 1$ (etapa 406), si verifica la colisión (flecha Y saliente del bloque 407) la probabilidad de colisión se actualiza a $p = \beta p$ (etapa 408), donde β] es un factor de ponderación, por ejemplo 0.9 o 0.99.

PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

25 [0078] Teniendo en cuenta las expresiones de la energía, retardo y la fiabilidad como la función de las duraciones de los intervalos de latencia y vigilia de la cabeza de cúmulo, el número de nodos, la velocidad media de generación de paquete de datos, la probabilidad de canal ocupado y de colisión, la energía se minimiza sujeta a restricciones de fiabilidad y retardo de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{P} : \quad & \min_{R_l, R_s, T_{TX,out}, T_{out}} E(R_l, R_s, T_{TX,out}, T_{out}, c, p, \lambda) \\
 \text{s.t.} \quad & D_{\max}(R_l, R_s, T_{TX,out}, T_{out}, c, t_{\max}) \leq \tau_{\max} , \\
 & R_{\min}(R_l, R_s, T_{TX,out}, T_{out}, c, p) \geq \psi_{\min} ,
 \end{aligned}$$

30 donde τ_{\max} es la probabilidad deseada de que el retraso es inferior a t_{\max} y Ψ_{\min} es la probabilidad deseada mínima con la que se debe transferir un paquete de datos. En esta optimización, c y p son variables de realimentación hacia delante mientras que λ , t_{\max} , τ_{\max} y Ψ_{\min} son requisitos de la aplicación.

[0079] La solución de este problema de minimización con respecto a los parámetros de funcionamiento R_s y R_l se puede obtener a través de técnicas numéricas estándar.

35 [0080] El experto en la técnica puede determinar, en cada situación concreta, los valores de las duraciones de los intervalos de latencia y vigilia de cabeza del cúmulo, el número de nodos, la tasa de generación de paquetes de datos promedio, la probabilidad de canal ocupado y de colisión que, con sujeción a la fiabilidad y las restricciones de retardo, alcanzan los niveles de energía que están por debajo de un umbral establecido, siendo este nivel de umbral suficientemente cercano, desde un punto de vista práctico, al nivel de energía mínimo. Estos valores de las duraciones de los intervalos de vigilia y latencia de la cabeza de cúmulo y de los otros parámetros indicados anteriormente que llevan bajo el nivel de energía por debajo del umbral establecido también se considerarán que cumplen la condición mínima de energía.

40 [0081] De acuerdo con una forma de realización ventajosa de la presente invención, este problema de minimización se resuelve fuera de línea, por medio de, por ejemplo una estación de base conectada a la red, para muchos valores representativos de cinco variables, a saber, la tasa de generación de paquetes total en el cúmulo (es decir, el número de nodos multiplicado por la tasa de generación de paquetes de datos promedio), y las probabilidades de colisión y de canal ocupado, y las restricciones de retardo y de fiabilidad; de esta manera, los nodos de la red no necesitan un hardware complejo para llevar a cabo cálculos complicados, en tiempo real.

[0082] Los valores de los cinco parámetros, así como los valores óptimos pre-calculados correspondientes R_l^{opt} y R_s^{opt} de los parámetros de funcionamiento R_l y R_s se almacenan en una tabla TBL como la que se muestra en la figura 5 comprendidos en cada uno de los nodos de cabeza de cúmulo de la red.

5 [0083] El procedimiento de uso de la tabla TBL de la figura 5 (o una tabla similar) se describirá con la ayuda del diagrama de flujo de la figura 6 en relación con el nodo de cabeza de cúmulo de uno de los cúmulos de la red.

10 [0084] En la inicialización del nodo de cabeza de cúmulo (que puede llevar a cabo por ejemplo una estación base) los valores de tres variables se almacenan en el nodo de cabeza de cúmulo: la tasa de generación de paquetes total \mathcal{M} de su cúmulo, la probabilidad deseada τ_{max} de que el retraso sea menor que t_{max} , la probabilidad mínima deseada Ψ_{min} con la que un paquete de datos debería ser transferido; además, se establecen los parámetros de funcionamiento del nodo de cabeza de cúmulo por ejemplo, a los valores por defecto. El nodo de cúmulo de cabeza recibe de sus nodos vecinos las estimaciones de la probabilidad de canal ocupado y calcula su media (etapa 601); las cabezas de cúmulo estiman la probabilidad de colisión (etapa 602); utilizando como puntos de entrada los valores de las tres variables, la probabilidad canal ocupado promedio calculada y la probabilidad de colisión estimada, se leen dos valores de R_l y R_s desde la tabla TBL correspondiente a los valores óptimos R_l^{opt} y R_s^{opt}

15 que reducen al mínimo el consumo de energía del cúmulo (etapa 603) y se establecen como nuevos parámetros de funcionamiento del nodo de cúmulo de cabeza que sustituyen los parámetros de funcionamiento anteriores (etapa 604); después de esto, el nodo de cúmulo de cabeza espera algún tiempo (etapa 605) antes de repetir las etapas del procedimiento.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para ajustar el funcionamiento de un nodo de enrutamiento (R3) de una red de comunicación inalámbrica asíncrona, en el que dicho nodo de enrutamiento (R3) comprende un emisor-receptor de radio que tiene un funcionamiento intermitente, correspondiendo dicho funcionamiento intermitente a una secuencia periódica de un intervalo despierto (R_i) y un intervalo de latencia (R_s), en el que dicha red comprende una pluralidad de cúmulos (CL1, CL2,...), teniendo cada uno de dichos cúmulos (CL1, CL2,...) un nodo de cabeza de cúmulo (R3, R4,...), en el que un nodo de cabeza de cúmulo es un nodo de enrutamiento que recibe paquetes de datos transmitidos desde otros nodos del cúmulo, en el que cuando se intenta una transmisión dentro de un cúmulo se encuentra una probabilidad de canal ocupado (c), en el que cuando la transmisión dentro de un cúmulo se lleva a cabo se encuentra una probabilidad de comunicación de colisión (p), siendo transferido un paquete de datos dentro de un cúmulo con una probabilidad de exitosa de transferencia (Ψ) y con un retraso medio de transferencia (τ), en el que el nodo de cabeza de cúmulo recibe de los otros nodos del cúmulo estimaciones de la probabilidad del canal ocupado, comprendiendo el procedimiento las etapas de:
- 5
- A) para el cúmulo (CL1) cuyo dicho nodo de enrutamiento (R3) es el nodo de cabeza de cúmulo, determinar el consumo de energía como una función de la probabilidad de canal ocupado (c), la probabilidad de comunicación de colisión (p), la duración del intervalo despierto (R_i) y la duración del intervalo de latencia (R_s) de dicho nodo de enrutamiento (R3),
- 15
- B) para el cúmulo (CL1) cuyo dicho nodo de enrutamiento (R3) es el nodo de cabeza de cúmulo, determinar los valores de la duración del intervalo despierto (R_i) y la duración del intervalo de latencia (R_s) de dicho nodo de enrutamiento (R3) que reducen dicho consumo de energía bajo un umbral establecido, según unos valores predeterminados de la probabilidad de canal ocupado (c) y de la probabilidad de comunicación de colisión (p) y según una restricción predeterminada para la probabilidad de exitosa de transferencia (Ψ) y para el retraso medio de transferencia (τ), y
- 20
- C) ajustar la duración del intervalo despierto (R_i) y la duración del intervalo de latencia (R_s) de dicho nodo de enrutamiento (R3) a valores seleccionados entre dichos valores determinados en la etapa B.
- 25
2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el cúmulo (CL1) cuyo dicho nodo de enrutamiento (R3) es el nodo de cabeza de cúmulo comprende un número (N) de nodos y los nodos de dicho cúmulo (CL1) transmiten paquetes de datos según una velocidad media de generación de paquete de datos (λ), y en el que, en la etapa A, el consumo de energía se determina como una función también de dicho número de nodos (N) y de dicha velocidad media de generación de paquete de datos (λ).
- 30
3. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho nodo de enrutamiento (R3) determina de forma repetida la probabilidad de canal ocupado (c) y utiliza esta probabilidad determinada para llevar a cabo de forma repetida etapa B.
4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que dicho nodo de enrutamiento (R3) determina la probabilidad de canal ocupado (c) mediante la recepción de estimaciones de la probabilidad de canal ocupado realizadas por los otros nodos (R2, E4, E5, R4) de dicho cúmulo (CL1) y mediante el cálculo de un promedio o el máximo de las estimaciones recibidas.
- 35
5. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho nodo de enrutamiento (R3) determina de forma repetida la probabilidad de comunicación de colisión (p) realizando estimaciones y utiliza esta probabilidad determinada para llevar a cabo de forma repetida la etapa B.
- 40
6. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la determinación de etapa B se lleva a cabo por dicho nodo de enrutamiento (R3) a partir de una tabla (TBL) de valores almacenados internamente.
7. Procedimiento según las reivindicaciones 2 y 6, en el que dicha tabla (TBL) contiene una pluralidad de conjuntos de valores de la duración del intervalo despierto (R_i) y la duración del intervalo de latencia (R_s), para diferentes valores del número de nodos (N), la velocidad media de generación de paquete de datos (λ), la probabilidad de canal ocupado (c), la probabilidad de comunicación de colisión (p), la probabilidad de éxito de transferencia (Ψ), y el retraso medio de transferencia (τ).
- 45
8. Nodo de una red de comunicación inalámbrica asíncrona que comprende un emisor-receptor de radio que tiene un funcionamiento intermitente, correspondiendo dicho funcionamiento intermitente a una secuencia periódica de un intervalo despierto y un intervalo de latencia, empleándose dicho emisor-receptor de radio al menos para recibir paquetes de datos, en el que su funcionamiento se establece según el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7.
- 50
9. Red de comunicación inalámbrica asíncrona que comprende uno o más nodos de enrutamiento según la reivindicación 8.

10. Red de comunicación inalámbrica asíncrona según la reivindicación 9, en el que todos los nodos de enrutamiento son según la reivindicación 8.

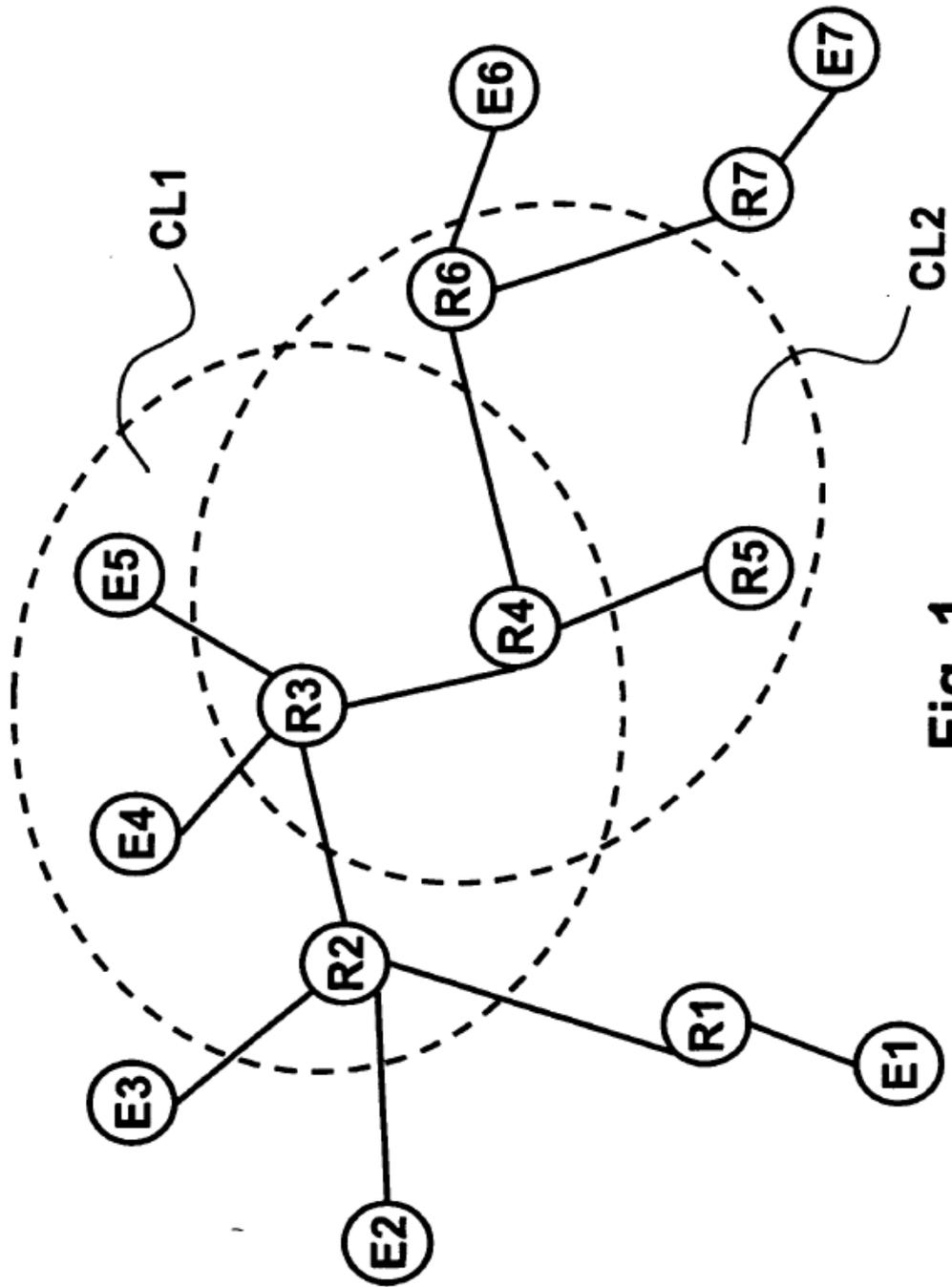


Fig. 1

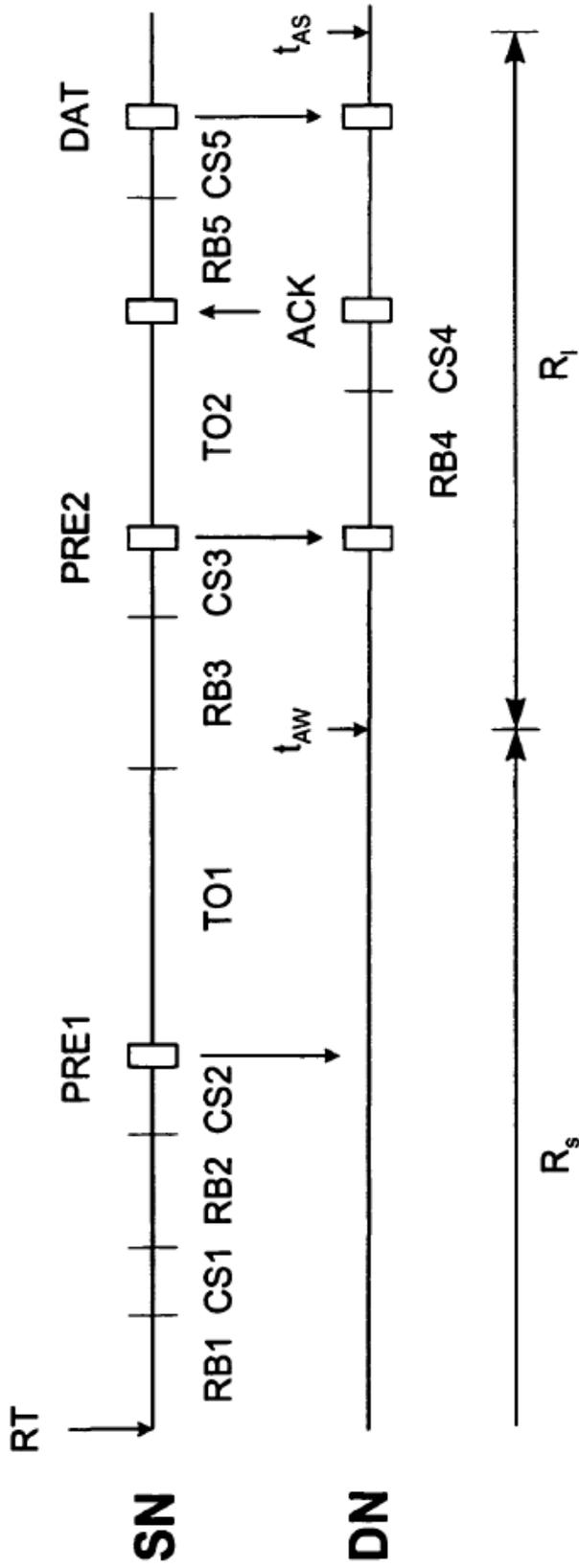


Fig. 2

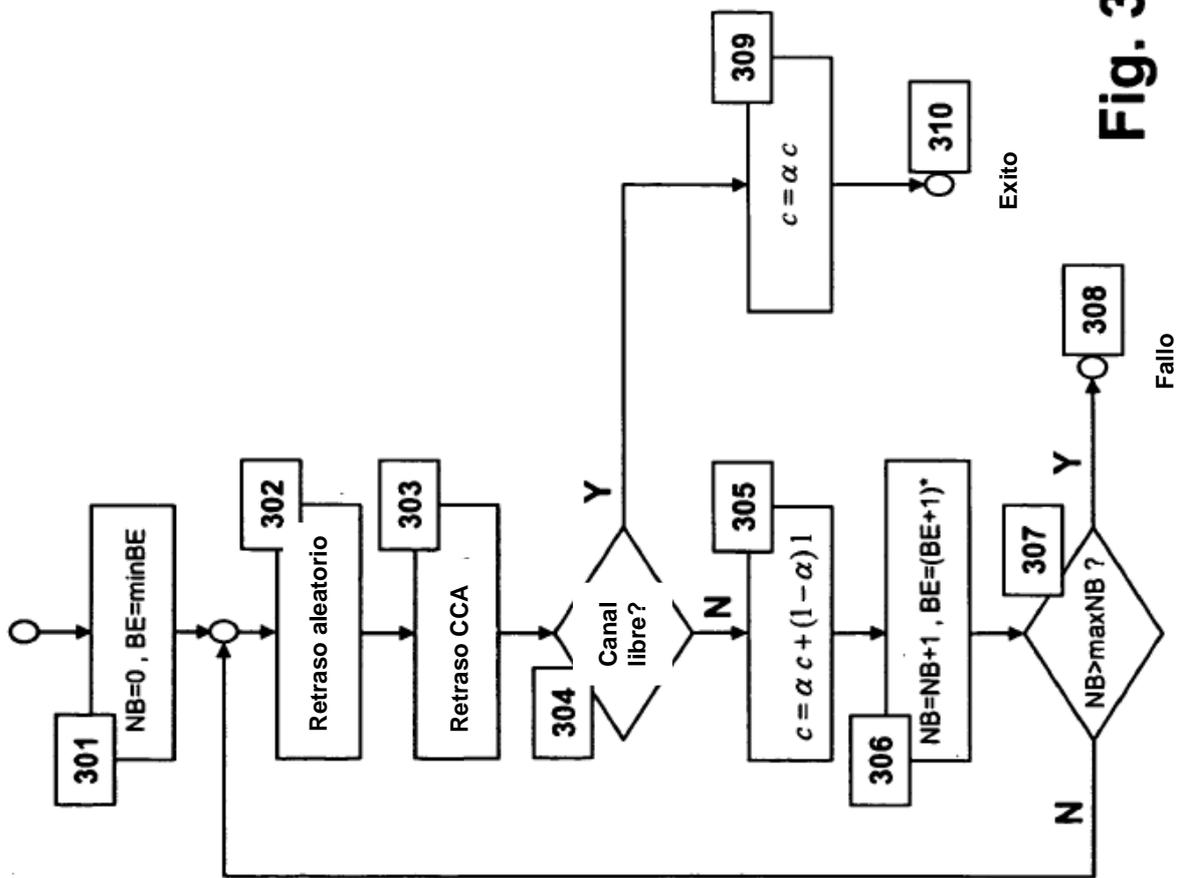


Fig. 3

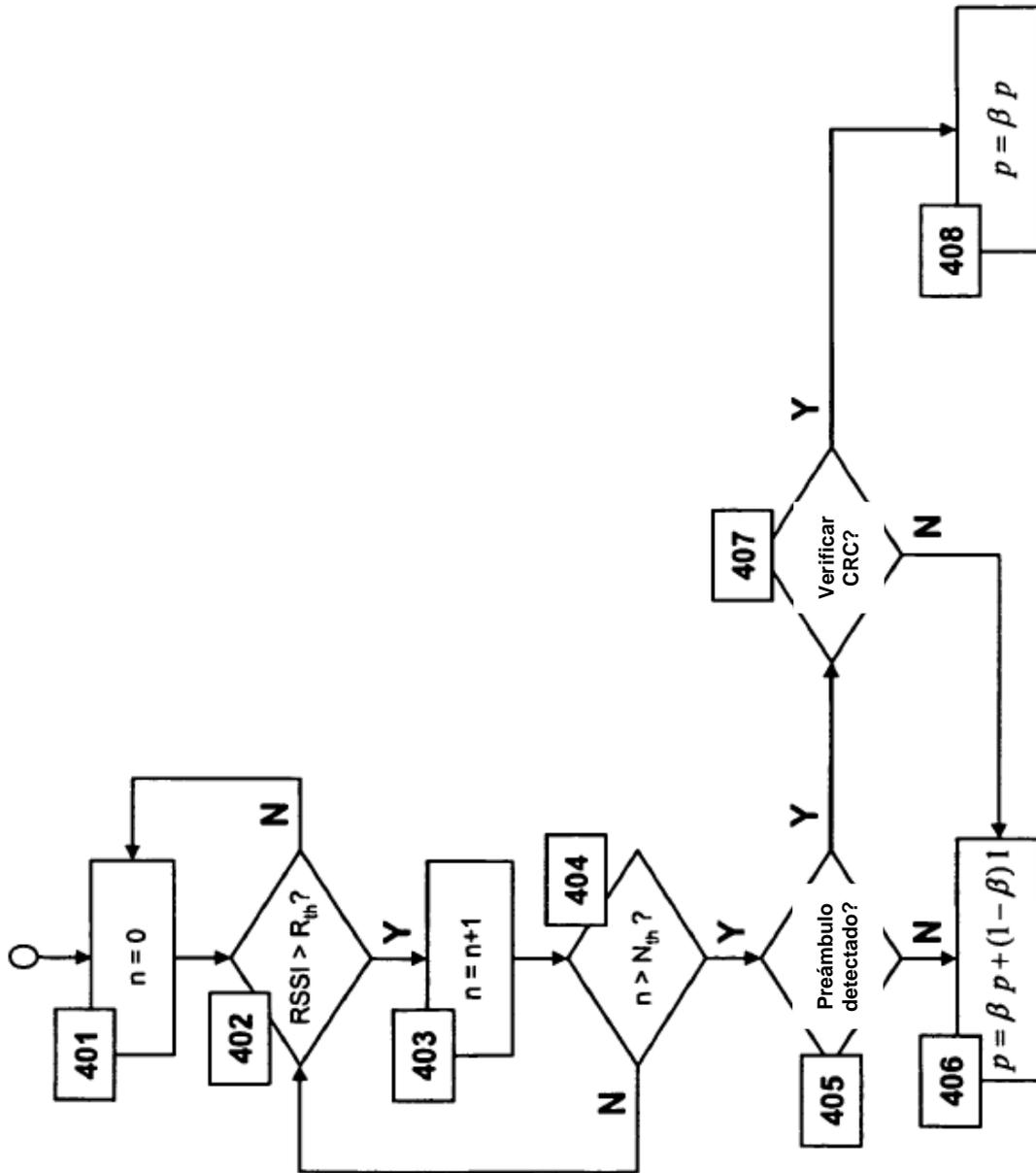


Fig. 4

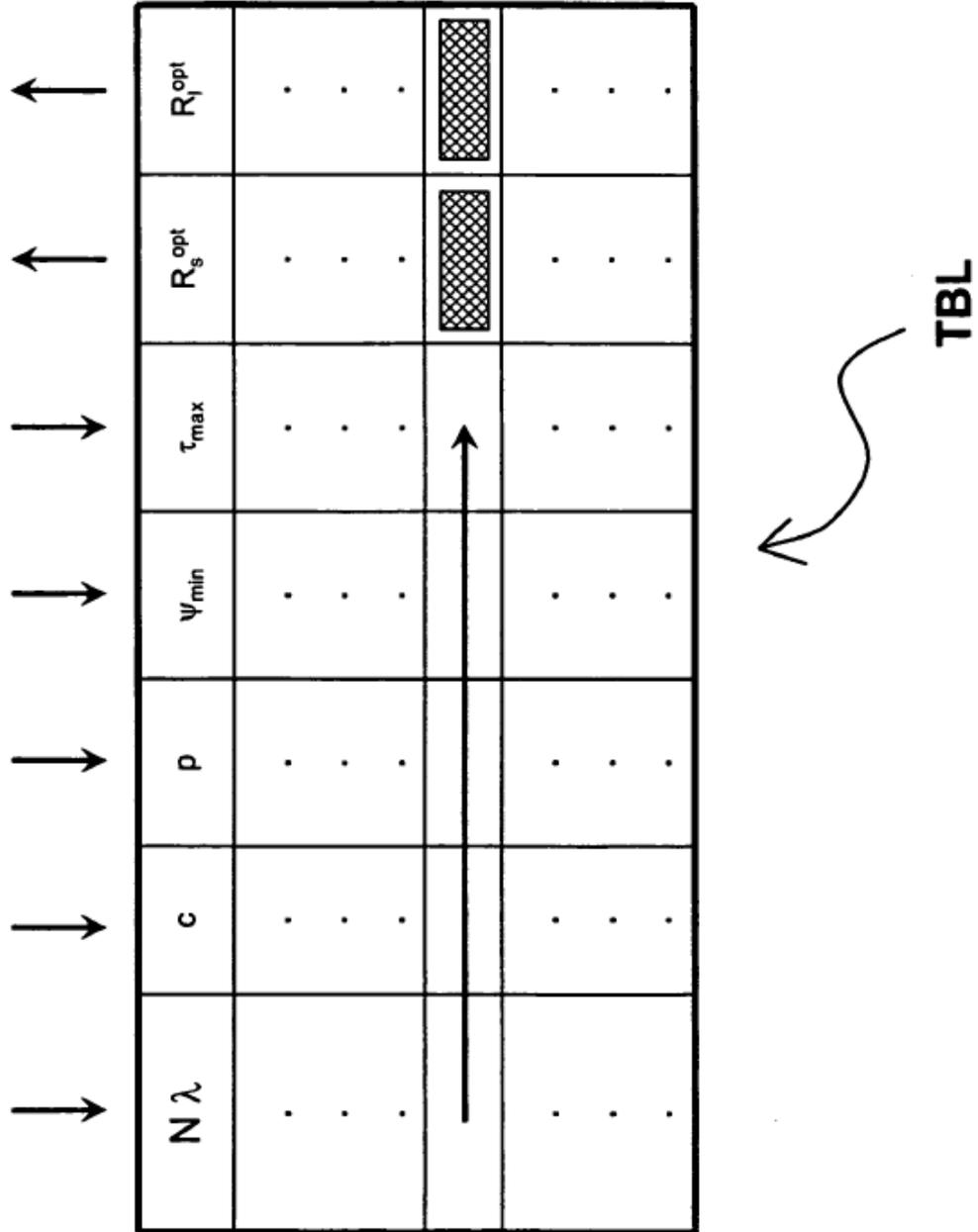


Fig. 5

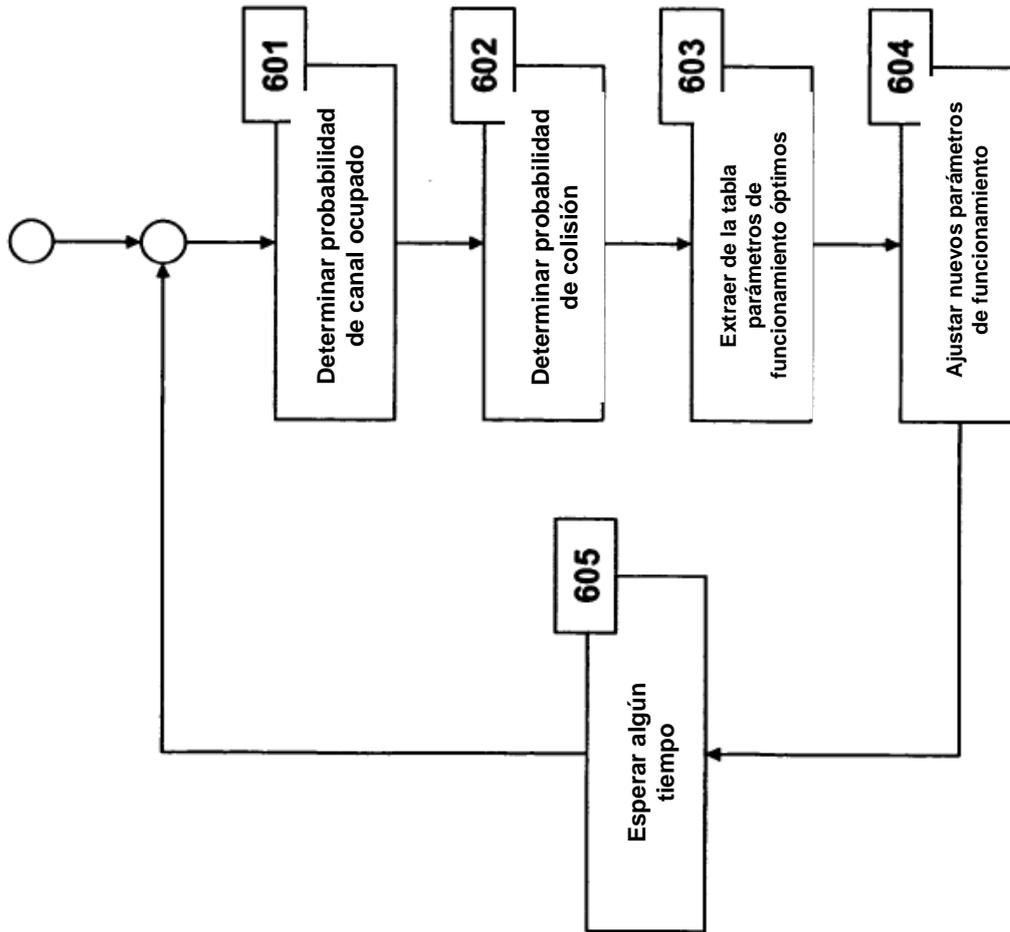


Fig. 6