

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 397 074**

51 Int. Cl.:

H04W 52/26 (2009.01)

H04B 17/00 (2006.01)

H04L 5/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.10.2005** **E 05797181 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.12.2012** **EP 1805909**

54 Título: **Técnicas de control de potencia de transmisión para sistemas de comunicación inalámbricos**

30 Prioridad:

13.10.2004 US 617639 P

13.10.2004 US 617638 P

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

04.03.2013

73 Titular/es:

**MCMaster UNIVERSITY (100.0%)
OFFICE OF RESEARCH CONTRACTS &
INTELLECTUAL PROPERTY 1280 MAIN STREET
WEST HAMILTON
ONTARIO L8S 4L8, CA**

72 Inventor/es:

HAYKIN, SIMON

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 397 074 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

Técnicas de control de potencia de transmisión para sistemas de comunicación inalámbricos

5 Referencia cruzada a la solicitud relacionada

Esta solicitud reivindica el beneficio de la solicitud de patente provisional de Estados Unidos números de serie 60/617.638 y 60/617.639, ambas presentadas el 13 de Octubre de 2004.

- 10 Esta solicitud también reivindica el beneficio de, y es una entrada en fase nacional de, la solicitud PCT de número de serie PCT/CA2005/001565, presentada el 13 de Octubre de 2005, que a su vez reivindica el beneficio de las solicitudes de patente provisionales anteriores.

15 Campo de la invención

Esta invención se refiere, en general, a las comunicaciones inalámbricas y, en particular, al control de la potencia de transmisión en sistemas de comunicación inalámbricos.

20 Antecedentes

En el campo de las comunicaciones inalámbricas, la radio cognitiva es vista como un enfoque novedoso para mejorar la utilización de un recurso natural precioso, el espectro electromagnético de la radio.

- 25 La radio cognitiva, construida sobre una radio definida por el soporte lógico (software), se define como un sistema de comunicación inalámbrico inteligente que es consciente de su entorno y usa la metodología de la comprensión por construcción para aprender del entorno y adaptarse a las variaciones estadísticas en los estímulos de entrada, con dos objetivos principales en mente, es decir, la comunicación altamente fiable cuando y donde sea necesaria y la utilización eficiente del espectro radioeléctrico.

- 30 Por lo tanto, la consecución de estos objetivos en la radio cognitiva, implica el control del equipo de comunicación de tal manera como para proporcionar comunicaciones fiables mientras se reducen los efectos adversos en otros equipos de comunicación. Sin embargo, las técnicas de comunicación convencionales, explotan, típicamente, los recursos de comunicación disponibles para el beneficio de un equipo de comunicación específico, por ejemplo, un usuario específico sin una consideración importante del impacto sobre otros equipos de comunicación.

- 35 Se describen ejemplos de la reasignación de energía, la utilización de recursos inalámbricos y los mecanismos de control del sistema de comunicación digitales, por ejemplo, en los documentos WO 03/063384 A1, WO 03/092231 A1, y U.S 2003/0086514 A1.

40 Sumario de la invención

La invención se define en las reivindicaciones independientes. Algunas realizaciones de la misma se definen en las reivindicaciones dependientes.

- 45 De acuerdo con un aspecto amplio de la invención, se proporciona un método de control de la potencia de transmisión en un sistema de comunicación inalámbrico multiusuario. El método implica la determinación de un nivel de potencia de transmisión para un transmisor en el sistema de comunicación inalámbrico de acuerdo con un algoritmo teórico de comunicación. El algoritmo teórico de comunicación se basa en una suposición de los comportamientos de los transmisores en el sistema de comunicación. El método implica también la monitorización de los comportamientos de los transmisores en el sistema de comunicación usando un algoritmo de aprendizaje.

- 50 En algunas realizaciones, el algoritmo teórico de comunicación comprende un procedimiento water-filling (de llenado con agua) iterativo que representa los niveles de potencia de transmisión determinados del transmisor y otros transmisores en el sistema de comunicación.

- 55 En algunas realizaciones, el procedimiento water-filling iterativo consiste en inicializar una distribución de potencia de transmisión a través de n transmisores, realizar un water-filling del transmisor para determinar un nivel de potencia de transmisión para una velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor sometido a una restricción de potencia del transmisor y a un nivel de interferencia, comprendiendo el nivel de interferencia un ruido de fondo más, o niveles de potencia de transmisión inicializados, o niveles de potencia de transmisión determinados previamente para los otros transmisores, determinar si una velocidad de transmisión de datos del transmisor es mayor o menor que una velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor, y si es así, ajustar el nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor, determinar si no se satisface una velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores mediante un nivel de potencia de transmisor ajustado
60 respectivo para al menos un transmisor, y repetir la operación de realización de un water-filling cuando no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores.
65

En algunas realizaciones, las operaciones de realización, determinación de si una velocidad de transmisión de datos de un transmisor es mayor o menor que una velocidad de transmisión de destino, y ajuste se repiten para cada uno de los otros transmisores.

5 En algunas realizaciones, determinar si no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores comprende determinar si no se satisfacen las velocidades de transmisión de datos de destino de todos los n transmisores, y repetir la operación de realización del water-filling comprende repetir la operación de realización del water-filling cuando no se satisfacen las velocidades de transmisión de datos de destino de todos los n transmisores.

10 En algunas realizaciones, ajustar comprende la reducción del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es mayor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor.

15 En algunas realizaciones, en el que la velocidad de transmisión de datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor, ajustar comprende determinar si el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia, y aumentar el nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor cuando el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor no violaría un límite de nivel de interferencia.

20 En algunas realizaciones, el límite del nivel de interferencia comprende un límite de temperatura de interferencia.

En algunas realizaciones, determinar si no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores comprende determinar si la velocidad de transmisión de datos difiere de la velocidad de transmisión de datos de destino mediante una cantidad predeterminada.

25 En algunas realizaciones, monitorizar comprende determinar si los comportamientos de los transmisores son consistentes con el supuesto de los comportamientos, y el método comprende además generar una alerta cuando el comportamiento de uno o más de los transmisores no es coherente con el supuesto.

30 En algunas realizaciones, el método comprende además tomar la acción correctiva que afecta a uno o más de los transmisores sensibles a la alerta.

35 En algunas realizaciones, el método comprende además detectar al menos un agujero del espectro, y determinar comprende determinar un nivel de potencia de transmisión del transmisor para la transmisión dentro de al menos un agujero del espectro.

40 En algunas realizaciones, el método comprende además predecir la disponibilidad posterior de al menos un agujero del espectro, y repetir las operaciones de determinación y monitorización cuando se predice que al menos un agujero del espectro dejará de estar disponible.

45 En algunas realizaciones, el método comprende además detectar un agujero del espectro adicional, detectar un aumento en la interferencia en al menos un agujero del espectro, y repetir las operaciones de determinación y monitorización para controlar los niveles de potencia de transmisión del transmisor para la transmisión dentro del agujero del espectro adicional sensible a la detección de un aumento en la interferencia en al menos un agujero del espectro.

50 En algunas realizaciones, el método comprende además determinar una posición del transmisor con relación a los otros transmisores en el sistema de comunicación.

En algunas realizaciones, el método comprende además determinar una matriz de pérdida de la ruta multiusuario del entorno de funcionamiento del transmisor en base a la posición determinada del transmisor con relación a los otros transmisores.

55 En algunas realizaciones, el algoritmo de aprendizaje comprende un algoritmo de aprendizaje de arrepentimiento consciente.

En algunas realizaciones, el algoritmo de aprendizaje comprende un algoritmo de aprendizaje de Lagrangian.

60 En algunas realizaciones, el método comprende además adaptar una estrategia de modulación para la transmisión de datos por el transmisor cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor y el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia.

65 En algunas realizaciones, determinar si aumentar el nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia comprende determinar si aumentar el nivel de potencia de transmisión

determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia dentro de un agujero del espectro, y comprendiendo el método además, cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor y el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia dentro del agujero del espectro, detectar un

5 agujero del espectro adicional, y determinar un nivel de potencia de transmisión adicional del transmisor para la transmisión dentro del nuevo agujero del espectro.

En algunas realizaciones, un medio legible por máquina, que almacene instrucciones que, cuando se ejecutan, realizan el método.

10 Otro aspecto amplio de la invención proporciona un sistema para controlar la potencia de transmisión en un sistema de comunicación inalámbrico multiusuario. El sistema incluye una entrada para recibir la información asociada con los comportamientos de transmisión de los transmisores en el sistema de comunicación inalámbrico, y un procesador acoplado funcionalmente a la entrada. El procesador está configurado para determinar un nivel de

15 potencia de transmisión para un transmisor en el sistema de comunicación inalámbrico de acuerdo con un algoritmo teórico de comunicación, estando el algoritmo teórico de comunicación basado en una suposición de los comportamientos de transmisión de los transmisores en el sistema de comunicación, y monitorizar los comportamientos de transmisión de los transmisores en el sistema de comunicación usando un algoritmo de aprendizaje.

20 En algunas realizaciones, el procesador (66) está configurado para implementar una radio cognitiva

En algunas realizaciones, el algoritmo teórico de comunicación comprende un procedimiento water-filling iterativo, representando el procedimiento water-filling iterativo niveles de potencia de transmisión determinados del transmisor

25 y otros transmisores en el sistema de comunicación.

En algunas realizaciones, el procesador está configurado para determinar un nivel de potencia de transmisión del transmisor inicializando una distribución de potencia de transmisión a través de los n transmisores, realizando un water-filling del transmisor para determinar un nivel de potencia de transmisión para una velocidad de transmisión de

30 datos de destino del transmisor sometido a una restricción de potencia del transmisor y a un nivel de interferencia, comprendiendo el nivel de interferencia un ruido de fondo más, o niveles de potencia de transmisión inicializados, o niveles de potencia de transmisión determinados previamente para los otros transmisores, determinando si una velocidad de transmisión de datos del transmisor es mayor o menor que una velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor, y si es así, ajustando el nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor,

35 determinando si no se satisface una velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores mediante un respectivo nivel de potencia de transmisor ajustado para al menos un transmisor, y repitiendo la operación de realización de un water-filling cuando no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores.

40 En algunas realizaciones, el procesador está configurado además para determinar si no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores determinando si no se satisfacen las velocidades de transmisión de datos de destino de todos los n transmisores, y para repetir la operación de realización del water-filling cuando no se satisfacen las velocidades de transmisión de datos de destino de todos los

45 n transmisores.

En algunas realizaciones, el procesador está configurado para ajustar el nivel de potencia de transmisión determinado reduciendo el nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es mayor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor.

50 En algunas realizaciones, el procesador está configurado además para ajustar el nivel de potencia de transmisión determinado determinando si el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia, cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor, y aumentar el nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor cuando el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor no

55 violaría un límite de nivel de interferencia.

En algunas realizaciones, el procesador está configurado para determinar si no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores determinando si la velocidad de transmisión de datos difiere de la velocidad de transmisión de datos de destino mediante una cantidad predeterminada.

60

En algunas realizaciones, el procesador está configurado para monitorizar los comportamientos transmitidos de los transmisores determinando si los comportamientos de los transmisores son consistentes con el supuesto de los comportamientos, y el procesador está configurado además para generar una alerta cuando el comportamiento de uno o más de los transmisores no es consistente con el supuesto.

65

En algunas realizaciones, el procesador está configurado además para detectar al menos un agujero del espectro, y para determinar un nivel de potencia de transmisión determinando un nivel de potencia de transmisión del transmisor para la transmisión dentro de al menos un agujero del espectro.

5 En algunas realizaciones, al menos un agujero del espectro comprende un pluralidad de agujeros del espectro, y el procesador está configurado para determinar un nivel de potencia de transmisión determinando un conjunto de niveles de potencia de transmisión que comprenden múltiples niveles de potencia de transmisión para la transmisión dentro de los respectivos agujeros del espectro de la pluralidad de agujeros del espectro.

10 En algunas realizaciones, el procesador está configurado además para predecir la disponibilidad posterior de al menos un agujero del espectro, y para repetir las operaciones de determinación y adaptación cuando se predice que al menos un agujero del espectro dejará de estar disponible.

15 En algunas realizaciones, el procesador está configurado además para detectar un agujero del espectro adicional, detectar un aumento en la interferencia en al menos un agujero del espectro y repetir las operaciones de determinación y adaptación para controlar los niveles de potencia de transmisión del transmisor para la transmisión dentro del agujero del espectro adicional sensible a la detección de un aumento en la interferencia en al menos un agujero del espectro.

20 En algunas realizaciones, el procesador está configurado además para determinar una posición del transmisor con relación a otros usuarios.

25 En algunas realizaciones, el sistema también incluye un sistema de posicionamiento global (GPS), y el procesador está acoplado, funcionalmente, al receptor GPS y configurado para determinar una posición del transmisor en base a las señales recibidas por el receptor GPS.

En algunas realizaciones, el procesador está configurado además para determinar una matriz de pérdida de la ruta multiusuario del entorno de funcionamiento del transmisor en base a la posición determinada del transmisor con relación a los otros transmisores.

30 En algunas realizaciones, el procesador está configurado además para adaptar una estrategia de modulación para la transmisión de datos por el transmisor cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor y el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia.

35 En algunas realizaciones, el procesador está configurado para determinar si el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia determinando si el aumento de nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia dentro de un agujero del espectro, y el procesador está configurado además para detectar un agujero del espectro adicional y determinar un nivel de potencia de transmisión adicional del transmisor para la transmisión dentro del agujero del espectro adicional, cuando la velocidad de transmisión de los datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor y el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia dentro del agujero del espectro.

45 En algunas realizaciones, el sistema de comunicación comprende un sistema de comunicación de múltiple entrada múltiple salida (MIMO).

En algunas realizaciones, el sistema se implementa en al menos un dispositivo de comunicación móvil y una estación base en el sistema de comunicación.

50 En algunas realizaciones, el sistema de comunicación está configurado para la señales de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM).

55 En algunas realizaciones, el sistema se implementa en una pluralidad de dispositivos de comunicación, comprendiendo cada uno de los dispositivos de comunicación de la pluralidad, un transmisor y un procesador configurados para determinar un nivel de potencia de transmisión del transmisor de acuerdo con el algoritmo teórico de comunicación, y para monitorizar los comportamientos transmitidos de otros dispositivos de comunicación de la pluralidad de dispositivos de comunicación usando el algoritmo de aprendizaje.

60 Otros aspectos y características de las realizaciones de la presente invención serán evidentes para los expertos en la materia tras la revisión de la siguiente descripción de las realizaciones ilustrativas específicas de la invención.

Breve descripción de los dibujos

65 Ahora se describirán, con mayor detalle, ejemplos de realizaciones de la invención con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 es una representación en un diagrama de bloques de un ciclo cognitivo;

la figura 2 es un diagrama de bloques que ilustra las diferencias entre los procesos de decisión de Markov, los juegos de matriz y los juegos estocásticos;

la figura 3 es una representación gráfica del flujo de señal de un escenario de comunicación de dos usuarios;

la figura 4 es una representación gráfica de los resultados de un experimento ilustrativo en un escenario de comunicación inalámbrico de dos usuarios;

la figura 5 es un diagrama de flujo de un método de control de potencia de transmisión de acuerdo con una realización de la invención;

la figura 6 es un diagrama de bloques del equipo de comunicación en el que pueden implementarse las realizaciones de la invención; y

la figura 7 es una representación gráfica de tiempo frecuencia que ilustra la compartición del espectro dinámico para OFDM.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

El espectro de radio electromagnético es un recurso natural, cuyo uso por los transmisores y receptores está licenciado por los gobiernos. En noviembre de 2002, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) publicó un informe (Expediente ET número 02-135), elaborado por el Grupo de Trabajo de Políticas del Espectro (Spectrum Policy Task Force) dirigido a mejorar la forma en que este precioso recurso se gestiona en los Estados Unidos de América. Entre las conclusiones y recomendaciones principales del grupo de trabajo, la segunda conclusión en la página 3 del informe es bastante reveladora en el contexto de la utilización del espectro:

En muchas bandas, el acceso al espectro es un problema más importante que la escasez física del espectro, en gran parte debido al legado de regulación de comando y control que limita la capacidad de los usuarios potenciales del espectro para obtener dicho acceso.

De hecho, una exploración de partes del espectro de radio es probable que encuentre que algunas bandas de frecuencia en el espectro están, en gran parte, sin ocupar la mayor parte del tiempo, otras bandas de frecuencia sólo están ocupadas parcialmente, y las bandas de frecuencia restantes están muy usadas.

La infrautilización del espectro electromagnético nos conduce a pensar en términos de "agujeros del espectro". Un agujero del espectro puede considerarse, en general, como una banda de frecuencias asignadas a un usuario principal, que en un momento determinado y una localización geográfica específica no se está utilizando por su usuario principal.

La utilización del espectro puede mejorarse, significativamente, haciendo posible para un usuario secundario al que no se le está dando servicio acceder a un agujero del espectro que no está siendo utilizado por el usuario principal en un momento y localización actual del usuario secundario. La radio cognitiva, incluida la radio definida por el soporte lógico, puede ofrecer un medio para promover el uso eficiente del espectro mediante la explotación de la existencia de los agujeros del espectro.

En este punto, puede ser útil considerar lo que se entiende por "radio cognitiva". La Enciclopedia de la Ciencia del Ordenador (A. Ralston and E. D. Reilly, Encyclopedia of Computer Science, página. 186-186, Van Nostrand Reinhold, 1993), proporciona una vista computacional de tres puntos de la cognición:

(i) estados y procesos mentales intervienen entre los estímulos de entrada y las respuestas de salida;

(ii) los estados y procesos mentales se describen mediante algoritmos, y

(iii) los estados y procesos mentales se prestan a las investigaciones científicas.

Por otra parte, puede inferirse que el estudio interdisciplinario de la cognición se refiere a la exploración de los principios generales de la inteligencia a través de una metodología sintética que se denomina, en general, aprendizaje por comprensión. Poniendo estas ideas juntas y teniendo en cuenta que la radio cognitiva tiene como objetivo mejorar la utilización del espectro radioeléctrico, la siguiente definición de radio cognitiva puede ser apropiada:

La radio cognitiva es un sistema de comunicación inalámbrico inteligente que es consciente de su entorno circundante (es decir, el mundo exterior), y usa la metodología de la comprensión por construcción para aprender del entorno y adaptar sus estados

internos a las variaciones estadísticas en los estímulos de RF entrantes haciendo los cambios correspondientes en determinados parámetros funcionales (por ejemplo, transmisión de potencia, frecuencia de portadora y estrategia de modulación) en tiempo real, con dos destinos principales en mente:

- 5 • comunicaciones altamente fiables cuando y donde sea necesario, y.
- utilización eficiente del espectro de radio.

10 Seis palabras clave destacan en la definición anterior: conciencia, inteligencia, aprendizaje, adaptabilidad, fiabilidad y eficiencia. La capacidad de conciencia de la radio cognitiva, por ejemplo, puede incorporar la conciencia con respecto a formas de onda transmitidas, al espectro de radio frecuencia (RF), la red de comunicaciones, la geografía, los servicios disponibles a nivel local, las necesidades del usuario, el idioma, la situación y la política de seguridad.

15 La implementación de esta combinación de gran alcance de las capacidades puede ser, de hecho, posible hoy en día, gracias a los avances en el procesamiento de la señal digital, la conexión de redes, el aprendizaje automático, el soporte lógico de ordenador y el soporte físico de ordenador.

20 Además de estas capacidades cognitivas, una radio cognitiva está dotada también con la posibilidad de reconfiguración. Este última capacidad se proporciona mediante una plataforma conocida como la radio definida por el soporte lógico (software), tras la que se construye una radio cognitiva. La radio definida por el soporte lógico (SDR) es una realidad práctica hoy en día, gracias a la convergencia de la radio digital y las tecnologías del soporte lógico de ordenador. La posibilidad de reconfiguración puede proporcionar la base para tales características como la adaptación de una interfaz de radio con el fin de acomodar las variaciones en el desarrollo de nuevas normas de
25 interfaz, la incorporación de nuevas aplicaciones y servicios emergentes, la incorporación de actualizaciones en la tecnología del soporte lógico y la explotación de los servicios flexibles proporcionados por las redes de radio, por ejemplo.

30 Para la posibilidad de reconfiguración, una radio cognitiva recurre, naturalmente, a la radio definida por el soporte lógico. Para otras tareas de un tipo cognitivo, la radio cognitiva recurre a los procedimientos de procesamiento de señal y aprendizaje automático para su implementación. El proceso cognitivo, de acuerdo con las realizaciones de la invención, comienza con la detección pasiva de los estímulos de RF y culmina con la acción.

35 De esta manera, la radio cognitiva puede implicar las siguientes tres tareas cognitivas en línea. La siguiente lista incluye algunas de las principales tareas cognitivas asociadas con la radio cognitiva, pero de ninguna manera pretende ser exhaustiva:

- 40 (i) el entorno funcional o el análisis de escena de radio, que abarca la estimación de interferencia, de manera ilustrativa como una temperatura de interferencias, del entorno de radio y la detección de agujeros del espectro;
- (ii) la identificación del canal, que abarca la estimación de la información de estado de canal (CSI), y la predicción de la capacidad de canal para su uso por un transmisor; y
- 45 (iii) el control de la potencia de transmisión y la gestión del espectro dinámico.

50 Estas tres tareas forman un ciclo cognitivo, que se representa en una forma básica en el diagrama de bloques de la figura 1. A través de la interacción con el entorno 10 de RF, las tareas (i) y (ii), mostradas como 18 y 19 en la figura 1, se llevarían a cabo, típicamente, en un receptor 14, mientras que la tarea (iii), mostrada en la figura 1 como 16, se lleva a cabo en un transmisor 12.

55 El ciclo cognitivo mostrado en la figura 1 se refiere a un ruta de comunicación de un solo sentido, con el transmisor 12 y el receptor 14 localizado en dos lugares diferentes. En un escenario de comunicación de dos sentidos, ambos un receptor y un transmisor o de manera alternativa un transceptor (es decir, una combinación de transmisor y receptor) se proporcionaría en el equipo de comunicación en cada extremo de la ruta de comunicación. Todas las funciones cognitivas incorporadas en el ciclo cognitivo de la figura 1 se soportan entonces en cada dispositivo de comunicación inalámbrica de comunicaciones y en cada estación base, por ejemplo.

60 A partir de esta breve discusión, es evidente que un módulo cognitivo en el transmisor 12 funciona, preferentemente, en un forma armónica con los módulos cognitivos en el receptor 14. Con el fin de mantener la armonía entre el transmisor 12 cognitivo y el receptor 14 en todo momento, puede proporcionarse un canal de retroalimentación que conecta el receptor 14 al transmisor 12. A través del canal de retroalimentación, el receptor 14 se habilita para transmitir información sobre el rendimiento del enlace de ida al transmisor 12. La radio cognitiva, en una implementación, es por lo tanto un ejemplo de un sistema de comunicación de retroalimentación.

65 Otro comentario está en regla. Una tecnología de radio cognitiva definida en general, se adapta a una escala de grados diferentes de cognición. En un extremo de la escala, el usuario puede escoger simplemente un agujero del

espectro y construir su ciclo cognitivo alrededor de ese agujero. En el otro extremo de la escala, el usuario puede emplear múltiples tecnologías de implementación para construir su ciclo cognitivo alrededor de un agujero del espectro de banda ancha o un conjunto de agujeros del espectro de banda estrecha para proporcionar el mejor rendimiento esperado en términos de gestión del espectro y control de potencia de transmisión, y hacerlo de la forma más altamente segura posible.

Desde una perspectiva histórica, el desarrollo de la radio cognitiva se encuentra todavía en una etapa conceptual, a diferencia de la radio convencional. Sin embargo, la radio cognitiva puede tener el potencial para hacer una diferencia significativa en la manera en que el espectro radio puede accederse con una utilización mejorada del espectro como objetivo principal. De hecho, dado su potencial, la radio cognitiva puede describirse, de manera justificada, como una tecnología perturbadora, pero discreta.

Las realizaciones de la presente invención se refieren a procedimientos de procesamiento de señal y adaptativos que se encuentran en el corazón de la radio cognitiva. En particular, la presente solicitud desvela las técnicas de control de potencia de transmisión. El análisis de la escena de radio en la radio cognitiva se describe en detalle en la solicitud de patente internacional (PCT) número de serie PCT/CA2005/001562, titulado "OPERATING ENVIRONMENT ANALYSIS TECHNIQUES FOR WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS", presentada el 13 de Octubre de 2005, y en la antes aludida solicitud de patente provisional de Estados Unidos número de serie 60/617.638.

En la siguiente descripción, se consideran las redes de radio cognitiva multiusuario con una revisión de los juegos estocásticos que resaltan los procesos de cooperación y competencia que caracterizan a las redes multiusuario. Se propone, entonces, un procedimiento water-filling iterativo para el control de potencia de transmisión distribuido. También se discute la gestión del espectro dinámico, que puede realizarse codo con codo con el control de potencia de transmisión.

En las comunicaciones inalámbricas convencionales construidas alrededor de estaciones base, los niveles de potencia de transmisión se controlan mediante las estaciones base con el fin de proporcionar un área de cobertura necesaria y proporcionar de este modo el rendimiento del receptor deseado. Por otro lado, puede ser necesario para una radio cognitiva funcionar de una manera descentralizada, ampliando de este modo el alcance de sus aplicaciones. En tal caso, puede ser deseable algún mecanismo de control alternativo para la potencia de transmisión. Se debe considerar una cuestión clave, que es, cómo puede conseguirse el control de potencia de transmisión en el transmisor.

Una respuesta parcial a esta cuestión fundamental se encuentra en los mecanismos de cooperación construidos en la forma en que se alcanza el acceso múltiple de los usuarios al canal de radio cognitivo. Los mecanismos de cooperación pueden incluir, por ejemplo, cualquiera de los siguientes:

(i) Etiqueta y protocolo. Tales disposiciones pueden compararse con el uso de semáforos, señales de stop y los límites de velocidad, que están destinados a los automovilistas (usando un sistema de transporte altamente denso de caminos y carreteras), para su seguridad individual y beneficios.

(ii) Redes ad-hoc cooperativas. En tales redes los usuarios comunican entre sí sin ninguna infraestructura fija.

En la tesis doctoral de T.J. Shepard, "Decentralized Channel Management in Scalable Multihop Spread-Spectrum Packet Radio Networks", MIT, Julio de 1995, Shepard estudia una red de radio por paquetes de gran tamaño usando la modulación de espectro expandido y un mecanismo de cooperación del tipo (ii). La única forma requerida de coordinación en la red es por parejas, entre los nodos vecinos (usuarios) que están en comunicación directa. Para mitigar la interferencia, se propone que cada nodo cree un programa de emisión-recepción. El programa se comunica al vecino más cercano sólo cuando el programa del nodo origen y el del nodo vecino permiten al nodo de origen transmitirlo y al nodo vecino recibirlo. Bajo algunos supuestos razonables, las simulaciones se presentan para demostrar que con este control completamente descentralizado, la red puede escalar a un número casi arbitrario de nodos.

Un estudio independiente y con ideas afines (P. Gupta and P.R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks", IEEE Trans. Information Theory, Volumen 46, Edición 2, páginas 388-404, del 2000) considera una red de radio consistente en n nodos idénticos que se comunican entre sí y también usan un mecanismo de cooperación del segundo tipo. Los nodos se localizan de una manera arbitraria dentro de un disco de área unitaria. Se transmite un paquete de datos producido por un nodo de origen a un nodo sumidero (es decir, de destino) a través de una serie de saltos a través de los nodos intermedios de la red. Si un medidor de bits denota un bit de información transmitido a través de una distancia de un medidor hacia su destino, entonces la capacidad de transporte de la red se define como el número total de medidores de bits que la red puede transportar en un segundo para todos los n nodos. Bajo un modelo de protocolo de no interferencia, Gupta y Kumar obtienen dos consecuencias importantes. En primer lugar, la capacidad de transporte de la red aumenta con n . En segundo lugar, para un nodo comunicando con otro nodo a una distancia no infinitamente lejana, el caudal (en bits por segundo) disminuye con el aumento de n . Estos resultados son consistentes con los de Shepard. Sin embargo, Gupta y Kumar no consideran el problema de la

congestión identificado en el trabajo de Shepard.

A través de los mecanismos de cooperación descritos en (i) y (ii) y otros medios de cooperación, los usuarios de la radio cognitiva pueden ser capaces de beneficiarse de la cooperación de unos con otros en que el sistema podría acabar siendo capaz de soportar más usuarios debido a la posibilidad de una mejora en estrategia de gestión del espectro.

Las redes ad-hoc cooperativas estudiadas por Shepard y por Gupta y Kumar son ejemplos de una nueva generación de redes inalámbricas, que, en un sentido amplio, se asemejan a Internet. En cualquier caso, en entornos de la radio cognitiva contruidos alrededor de las redes ad-hoc y las redes de infraestructura existentes, es posible encontrar el proceso de comunicación multiusuario que se complica mediante otro fenómeno, es decir, la competencia, que trabaja en oposición a la cooperación.

Básicamente, la fuerza impulsora detrás de la competencia en un entorno multiusuario se encuentra en que tiene que funcionar bajo el paraguas de las limitaciones impuestas a los recursos de red disponibles. Dado tal entorno, un usuario particular puede tratar de explotar el canal de radio cognitiva para su propio enriquecimiento de una forma u otra, que, a su vez, puede incitar a otros usuarios a hacer lo mismo. Sin embargo, la explotación a través de la competencia no se debe confundir con la propia orientación de la radio cognitiva que implica la asignación de prioridad a ciertos estímulos (por ejemplo, requisitos o necesidades urgentes). En cualquier caso, el control de la potencia de transmisión en un entorno de radio cognitiva multiusuario puede funcionar bajo dos limitaciones estrictas en los recursos de red, específicamente una interferencia o límite de interferencia de temperatura que podría imponerse por los organismos reguladores u otras entidades, y la disponibilidad de un número limitado de "agujeros" del espectro dependiendo del uso.

Lo que se describe anteriormente es un problema teórico de la comunicación multiusuario. Desafortunadamente, aún no se ha desarrollado una comprensión completa de la teoría de la comunicación multiusuario. Sin embargo, sabemos lo suficiente acerca de dos disciplinas diferentes, es decir, la teoría de la información y la teoría de juegos, para que podamos abordar este difícil problema de una manera significativa. Sin embargo, antes de seguir adelante, haremos una breve digresión para introducir algunos conceptos básicos de la teoría de juegos.

Los problemas de control de potencia de transmisión en un entorno de radio cognitiva que implican múltiples usuarios pueden verse como un problema de teoría de juegos.

En ausencia de competencia tendríamos entonces un juego completamente cooperativo, en cuyo caso el problema se simplifica a un problema teórico de control óptimo. Esta simplificación se consigue buscando una única función de costes que se optimiza por todos los jugadores, eliminando, de esta manera, los aspectos teóricos del juego del problema. Así, la cuestión de interés es cómo ocuparse de un juego no cooperativo que comporta múltiples jugadores. Para formular un marco matemático para tal entorno, deben tenerse en cuenta tres realidades básicas:

- (i) un espacio de estado que es el producto de los estados de los jugadores individuales;
- (ii) las transiciones de estado que son funciones de las acciones comunes tomadas por los jugadores, y
- (iii) las recompensas a los jugadores individuales que dependen también de las acciones comunes.

Este marco se ha encontrado en los juegos estocásticos, que, ocasionalmente, también aparecen bajo el nombre de "juegos de Markov" en la literatura de ciencias de la computación.

Un juego estocástico se describe mediante una tupla de cinco elementos $\{N, S, \bar{A}, P, \bar{R}\}$ en la que

N es un conjunto de jugadores, indexado $1, 2, \dots, n$;

S es un conjunto de estados posibles;

$\bar{A}$ es un espacio de acción común definido por el conjunto del producto $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$, cuando A_j es el conjunto de acciones disponibles para el jugador j -ésimo;

P es una función de transición probabilística, un elemento que para la acción a conjunta satisface la condición

$$\sum_{s' \in S} p_{ss'}^a = 1 \quad \text{para todos los } s' \in S \text{ y } a \in \bar{A}$$

$\bar{R} = r_1 \times r_2 \times \dots \times r_n$ cuando r_j es la recompensa al jugador j -ésimo y que es una función de la acción conjunta de todos los n jugadores.

Otra cuestión de notación: la acción del jugador $j \in N$ se denota por a_j , mientras que las acciones conjuntas de los otros $n-1$ jugadores en el conjunto N se denotan por a_{-j} . Se usa una notación similar en el presente documento para algunas otras variables.

Los juegos estocásticos son superseries de dos tipos de procesos de decisión, es decir, el proceso de decisión de

Markov y los juegos de matriz, como se ilustra en la figura 2. Un proceso de decisión de Markov, como se muestra en el número 20, es un caso especial de un juego 24 estocástico con un solo jugador, es decir, $n = 1$. Por otro lado, un juego de matriz, como se muestra en el número 22, es un caso especial de un juego 24 estocástico con un solo estado, es decir, $|S| = 1$.

Con dos o más jugadores, a menudo denominados como agentes en la literatura del aprendizaje automático, siendo una parte integral de un juego, es natural para el estudio de la radio cognitiva para motivarse mediante ciertas ideas en la teoría de juegos. Famosa entre estas ideas para los juegos finitos (es decir, juegos estocásticos por los que cada jugador tiene sólo un número finito de cursos alternativos de la acción) es la de un equilibrio de Nash, llamada así por el ganador del Premio Nobel, John Nash.

Un equilibrio de Nash se define como un perfil de la acción (es decir, un vector de acciones de los jugadores) en el que cada acción es una mejor respuesta a las acciones de todos los demás jugadores. De acuerdo con esta definición, un equilibrio de Nash es un funcionamiento estable o punto de equilibrio en el sentido de que no hay ningún incentivo para cualquier jugador involucrado en un juego finito para cambiar la estrategia dada que todos los otros jugadores continúan para seguir la política de equilibrio. El punto importante a señalar aquí es que el enfoque de equilibrio de Nash proporciona una poderosa herramienta para modelar los procesos no estacionarios. En pocas palabras, ha tenido una enorme influencia en la evolución de la teoría de juegos desplazando su énfasis hacia el estudio del equilibrio como un concepto predictivo.

Con el proceso de aprendizaje modelado como un juego estocástico repetido (es decir, la versión repetida de un juego de intento único), cada jugador tiene que conocer el comportamiento pasado de los otros jugadores, que puede influir en la decisión actual a realizar. En tal juego, la tarea de un jugador es seleccionar la mejor estrategia mixta, la información dada en las estrategias mixtas de todos los otros jugadores en el juego. Después de esto, los otros jugadores se conocen sobre todo como "oponentes". Una estrategia mixta se define como una aleatoriedad continua por un jugador de sus propias acciones, en que las acciones (es decir, estrategias puras) se seleccionan de una manera determinista. Expresado de otra manera, la estrategia mixta de un jugador es una variable aleatoria cuyos valores son las estrategias puras de ese jugador.

Para explicar lo que entendemos por una estrategia mixta, dejamos que $a_{j,k}$ denote la k -ésima acción del jugador j con $k = 1, 2, \dots, K$. La estrategia mixta del jugador j , denotada por el conjunto de probabilidades

$\{p_{j,k}\}_{k=1}^K$ es una parte integral de la combinación lineal

$$q_j = \sum_{k=1}^K p_{j,k} a_{j,k} \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

De manera equivalente, podemos expresar q_j como el producto interno

$$q_j = p_j^T a_j \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

en el que

$p_j = [p_{j,1}, p_{j,2}, \dots, p_{j,K}]^T$ es el vector de estrategia mixta;
 $a_j = [a_{j,1}, a_{j,2}, \dots, a_{j,K}]^T$ es el vector de la acción determinista, y
 el superíndice T indica la transposición de la matriz.

Para todo las j , los elementos del vector de estrategia mixta p_j satisfacen dos condiciones:

$$0 \leq p_{j,k} \leq 1 \quad (3)$$

y

$$\sum_{k=1}^K p_{j,k} = 1$$

(4)

Téngase en cuenta que también las estrategias mixtas para los diferentes jugadores son independientes estadísticamente.

La motivación para permitir el uso de estrategias mixtas es el hecho bien conocido de que cada juego estocástico tiene al menos un equilibrio de Nash en el espacio de las estrategias mixtas pero no necesariamente en el espacio de las estrategias puras, por lo tanto, se prefiere el uso de las estrategias mixtas más que las estrategias puras. El propósito de un algoritmo de aprendizaje es la de calcular una estrategia mixta, es decir, una secuencia $\{q^{(1)}, q^{(2)}, \dots, q^{(t)}\}$ en el tiempo t .

También es digno de atención que la implicación de (1) a (4) es que todo el conjunto de estrategias mixtas se encuentra dentro de una simple convexa o de una envolvente convexa, cuya dimensión es $K-1$ y cuyos K vértices son los $a_{j,K}$. Tal configuración geométrica hace de la selección de la mejor estrategia mixta en un entorno múltijugador una propuesta más difícil de abordar que la selección de la mejor acción base en un entorno de un solo jugador.

La formulación del equilibrio de Nash asume que los jugadores son racionales, lo que significa que cada jugador tiene una "visión del mundo". El conocimiento mutuo de la racionalidad y el conocimiento común de las creencias pueden ser suficientes para la justificación deductiva del equilibrio de Nash. Creencia se refiere al estado del mundo, expresada como un conjunto de distribuciones de probabilidad sobre pruebas, significando "pruebas" una secuencia de acciones y observaciones que se ejecutan en un momento específico.

A pesar del valor profundo de la justificación propuesta anteriormente, el concepto de equilibrio de Nash tiene dos limitaciones prácticas:

(i) El enfoque que aboga por el uso de una estrategia de mejor respuesta (es decir, una estrategia cuyo resultado es el mejor posible ante un oponente con un objetivo similar).

Pero en un juego de dos jugadores, por ejemplo, si un jugador adopta una estrategia de no equilibrio, entonces la respuesta óptima del otro jugador es también de un tipo de no equilibrio. En tales situaciones, el enfoque del equilibrio de Nash ya no puede aplicarse.

(ii) La descripción de un juego no cooperativo se limita, básicamente, a una condición de equilibrio. Desafortunadamente, el enfoque no enseña acerca de las dinámicas subyacentes que intervienen en establecer ese equilibrio.

Para matizar la teoría del equilibrio de Nash, podemos integrar los modelos de aprendizaje en la formulación de los algoritmos de la teoría de juegos. Este nuevo enfoque proporciona una base para la teoría del equilibrio, en el que menos jugadores completamente racionales se esfuerzan por alguna forma de optimización en el tiempo.

La teoría del aprendizaje estadístico es una disciplina bien desarrollada para hacer frente a la incertidumbre, lo que la hace adecuada para resolver los problemas de la teoría de juegos. En este contexto, una clase de algoritmos de no arrepentimiento está atrayendo una gran cantidad de atención en la literatura del aprendizaje automático.

La disposición de "no arrepentimiento" está motivada por el deseo de asegurar dos resultados finales prácticos:

(i) Un jugador no tiene mala suerte en un entorno no estacionario arbitrario. Incluso si el entorno no es adverso, el jugador puede experimentar un rendimiento malo cuando se usa un algoritmo que asume ejemplos independiente e idénticamente distribuidos (i.i.d). La disposición de no arrepentimiento garantiza que tal situación no se plantea.

(ii) Los oponentes inteligentes de ese jugador no explotan los cambios dinámicos o los recursos limitados para sus propios beneficios egoístas.

El concepto de arrepentimiento se puede definir de diferentes maneras. En un tratamiento unificado de los algoritmos de aprendizaje de la teoría de juegos, Greenwald (A. Greenwald, " Game-Theoretic Learning ", Notes Tutorial presentado en la Conferencia Internacional sobre el Aprendizaje Automático, Banff, Alberta, en julio de 2004) identifica tres variaciones del arrepentimiento, que incluyen el arrepentimiento externo, el arrepentimiento interno y el arrepentimiento de intercambio. Una definición particular del no arrepentimiento es, básicamente, una reformulación de potenciar lo que coincide con el arrepentimiento externo como se propone por Greenwald. La formulación original de potenciar se debe a Freund y Schapire en Y. Freund y R.E. Schapire, " A decision-theoretic

generalization of on-line learning and an application to boosting ", Revista de las Ciencias de Computación y el Sistema, volumen 55, páginas 119-139, de 1997. Básicamente, se refiere a potenciar la formación de un comité automático en el que varios expertos están formados en conjuntos de datos con distribuciones completamente diferentes. Es un método general que puede usarse para mejorar el rendimiento de cualquier modelo de aprendizaje.

5 Dicho de otra manera, el potenciar proporciona un método para modificar la distribución subyacente de los ejemplos, de tal manera que un modelo de aprendizaje fuerte se construye alrededor de un conjunto de módulos de aprendizaje débiles.

Para ver cómo el potenciar puede verse también como una proposición de no arrepentimiento, considerar un

10 problema de predicción con $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{t-1}$ que denota una secuencia de vectores de entrada. Dejamos que $\hat{x}_t$ denote la predicción de una sola etapa en el tiempo t calculado por el algoritmo de potenciar que funciona en esta secuencia. El error de predicción se define por la diferencia $\bar{e}_t = \bar{x}_t - \hat{x}_{t-1}$.

Dejamos que $l(\bar{e}_t)$ denote una función de coste convexa del error de predicción $\bar{e}_t$. El error cuadrático medio es un ejemplo de tal función de coste. Después del procesamiento de N ejemplos, la función de coste resultante del

15 algoritmo de potenciar está dada por

$$L_N = \sum_{t=1}^N l(\bar{e}_t) \quad (5)$$

Si, sin embargo, la predicción debía realizarse por uno de los expertos que usan algunas hipótesis fijas h para

20 producir el error de predicción $\bar{e}_t(h)$, entonces la función de coste correspondiente tendría el valor

$$L_N(h) = \sum_{t=1}^N l(\bar{e}_t(h)) \quad (6)$$

El arrepentimiento por no haber usado la hipótesis h es la diferencia

25

$$\begin{aligned} \rho_N(h) &= L_N - L_N(h) \\ &= \sum_{t=1}^N l(\bar{e}_t) - l(\bar{e}_t(h)) \end{aligned} \quad (7)$$

Decimos que el arrepentimiento es negativo si la diferencia $\rho_N(h)$ es negativa. Dejamos que H denote la clase de todas las hipótesis usadas en el algoritmo. Entonces el arrepentimiento general por haber usado la mejor de las

30 hipótesis $h \in H$ se da por el supremo

$$\rho_N = \sup_{h \in H} \rho_N(h) \quad (8)$$

Un algoritmo de potenciar es sinónimo de los algoritmos de no arrepentimiento porque el arrepentimiento ρ_N general es pequeño, no importa que se presente la secuencia particular de los vectores de entrada al algoritmo.

35

Desafortunadamente, la mayoría de los algoritmos de no arrepentimiento están diseñados bajo la premisa de que las hipótesis se eligen de un conjunto pequeño, discreto que, a su vez, limita la aplicabilidad de los algoritmos. Para superar esta limitación, el algoritmo de potenciar de Freund-Schapire (Hedge) puede ampliarse considerando una

clase de problemas de predicción con la estructura interna. Específicamente, la estructura interna supone dos cosas:

(i) Se supone que los sectores de entrada se encuentran sobre o dentro de un casi conjunto convexo arbitrario, siempre que sea posible realizar la optimización convexa. Por ejemplo, podríamos tener un poliedro d-dimensional o una esfera d-dimensional, siendo d la dimensionalidad del espacio de entrada.

(ii) Las reglas de predicción (es decir, expertas) se diseñan, deliberadamente, para ser lineales.

Un escenario de ejemplo que tiene la estructura interna incorporada en los puntos (i) y (ii) es el de la planificación en un juego estocástico descrito por un proceso de decisión de Markov, en el que los costes estado acción se controlan mediante un adversario u oponente inteligente después de que el jugador en cuestión fija su propia política. El lector puede consultar a H. B. McMahan, G. J. Gordon, y A. Blum, "Planning in the Presence of Cost Functions Controlled by an Adversary", en Actas del XX Conferencia Internacional sobre Aprendizaje Automático, Washington, DC, de 2003, para un ejemplo que implica un problema de ruta robot, que puede compararse con un problema de radio cognitiva dificultada por las acciones de un oponente inteligente.

Dado tal marco, siempre podemos hacer una predicción legal de manera eficiente a través de la dualidad convexa, que es una propiedad inherente de la optimización convexa. En particular, siempre es posible elegir una hipótesis legal que impide que el arrepentimiento total crezca demasiado rápido, y por lo tanto, hace que el arrepentimiento promedio se acerque a cero.

Explotando esta estructura interna, puede derivarse una nueva regla de aprendizaje conocida como el algoritmo de cobertura de Lagrangian. Este nuevo algoritmo es de un tipo de descenso de gradiente, que incluye dos etapas, es decir, la proyección y el escalado. La etapa de proyección, simplemente se asegura de que siempre hacemos una predicción legal. La etapa de escalado ajusta, adaptativamente, el grado en que el algoritmo funciona de manera agresiva o conservadora. En particular, si el algoritmo predice pobremente, entonces la función de coste asume un valor grande en la media, que a su vez tiende a hacer el cambio de predicciones lentamente.

Los algoritmos derivan su nombre de la combinación de dos puntos:

(i) El algoritmo depende de un parámetro libre, es decir, una función de cobertura convexa.

(ii) La hipótesis de interés puede verse como un multiplicador de Lagrangian que mantiene el arrepentimiento de crecimiento demasiado rápido.

Para ampliar sobre el tema de Lagrangian bajo el punto (ii), consideramos el caso de un juego de matriz que usa un algoritmo de arrepentimiento automático. El arrepentimiento automático, incorporado en la denominada condición Blackwell generalizada, significa que la distribución de probabilidad sobre las acciones por parte de un jugador es proporcional a los elementos positivos en el vector de arrepentimiento de ese jugador. Por ejemplo, en el juego llamado "piedra, papel, tijera", en el que la piedra rompe las tijeras, las tijeras cortan el papel y el papel envuelve a la piedra, si tenemos actualmente un vector formado por los siguientes:

arrepentimiento 2 frente a la roca,

arrepentimiento -7 frente a las tijeras, y

arrepentimiento 1 frente al papel,

entonces podríamos jugar piedra 2/3 de las veces, nunca jugar tijeras y jugar papel 1/3 de las veces. La predicción en cada etapa del algoritmo de arrepentimiento automático es una distribución de probabilidad sobre las acciones. Idealmente, deseamos la propiedad de no arrepentimiento, que significa que el vector de arrepentimiento promedio se aproxima a la región en la que todos sus elementos son menores que o iguales a cero.

Sin embargo, en cualquier tiempo finito, en la práctica, el vector de arrepentimiento todavía puede tener elementos positivos. En tal situación, no podemos alcanzar la condición de no arrepentimiento exactamente en un tiempo finito. Por el contrario, aplicamos una restricción blanda imponiendo una función de penalización cuadrática en cada elemento positivo del vector de arrepentimiento. La función de penalización implica la suma de dos componentes, siendo uno la función de cobertura y siendo el otro un indicador de función para el conjunto de hipótesis sin normalizar que usan un vector de gradiente. El vector de gradiente se define así mismo como la derivada de la función de penalización con respecto al vector de arrepentimiento, siendo la evaluación hecha en el vector de arrepentimiento actual. Resulta que el vector de gradiente es sólo el vector de arrepentimiento con todos los elementos negativos puestos igual a cero. Las hipótesis deseadas se obtienen normalizando este vector para formar una distribución de probabilidad de las acciones, que produce exactamente el algoritmo de arrepentimiento automático. En la elección de la distribución de las acciones de la manera descrita en el presente documento, imponemos la restricción de que el vector de arrepentimiento no se le permite moverse hacia arriba a lo largo del gradiente. La función de penalización cuadrática no puede crecer demasiado rápidamente, lo que a su vez significa que nuestro vector de gradiente medio se acercará más al cuadrante negativo, según se desee.

En resumen, el algoritmo de cobertura de Lagrangian es un algoritmo de no arrepentimiento diseñado para manejar la estructura interna en el conjunto de las predicciones permitidas. Explotando esta estructura interna, se logran límites estrictos sobre el rendimiento y las altas velocidades de convergencia cuando la disposición del no arrepentimiento es de suma importancia.

Como alternativa al aprendizaje de la teoría de juegos ejemplificada mediante un algoritmo de no arrepentimiento, podemos mirar a otro enfoque que está arraigado en la teoría de la información, es decir, el water-filling. Para ser específico, considérese un entorno de radio cognitiva en el que participan n transmisores y n receptores. El modelo del entorno se basa en dos supuestos:

(i) La comunicación a través de un canal es asíncrona, en cuyo caso el proceso de comunicación puede verse como un juego no cooperativo. Por ejemplo, en una red de malla que consiste en una mezcla de redes ad hoc y redes de infraestructura existente, el proceso de comunicación desde una estación base a los usuarios se controla de una manera síncrona, pero el proceso de comunicación multisalto a través de la red ad-hoc podría ser asíncrono y por lo tanto no cooperativo.

(ii) Se incluye una diferencia de la relación señal ruido (SNR) en el cálculo de la velocidad de transmisión a fin de tener en cuenta la diferencia entre el rendimiento de un esquema de modulación de codificación práctico y el valor teórico de la capacidad del canal. A todos los efectos, la diferencia de SNR es lo suficientemente grande como para asegurar, todo el tiempo, una comunicación confiable bajo las condiciones de funcionamiento.

En términos matemáticos, puede enunciarse la esencia del control de potencia de transmisión para tal entorno de radio multiusuario no cooperativo de la siguiente manera:

Dado un número limitado de agujeros del espectro, seleccionar los niveles de potencia de transmisión de n usuarios sin servicios con el fin de, maximizar conjuntamente sus velocidades de transmisión de datos, sometidas a la restricción de que no se viole una interferencia o un límite de temperatura de interferencia.

Los agujeros del espectro, que proporcionan una oportunidad para que un usuario sin servicios transfiera señales de comunicación, y la temperatura de interferencia como una medida de interferencia, se describen en detalle en la antes aludida solicitud de patente (PCT) internacional número de serie PCT/CA2005/001562, y en la solicitud de patente provisional de Estados Unidos número de serie 60/617.638.

Puede ser tentador sugerir que la solución de este problema consiste en, simplemente, aumentar el nivel de potencia de transmisión de cada transmisor sin servicio. Sin embargo, aumentar el nivel de potencia de transmisión de uno cualquiera de los transmisores tiene el indeseable efecto de aumentar también el nivel de interferencia al que los receptores de todos los otros transmisores están sometidos. La conclusión que puede extraerse de esta realidad es que no es posible representar el rendimiento general del sistema con un único índice de rendimiento. Más bien, debería considerarse un término medio entre las velocidades de datos de todos los usuarios sin servicios de alguna manera que pueda tratarse de una manera computacional.

Idealmente, nos gustaría encontrar una solución global a la maximización restringida de la serie conjunta de velocidades de transmisión de datos en estudio. Desafortunadamente, la búsqueda de esta solución global requiere de una búsqueda exhaustiva a través del espacio de todas las localizaciones de potencia posibles, en cuyo caso nos encontramos con que la complejidad computacional necesaria para alcanzar la solución global supone un alto nivel prohibitivo.

Para superar esta dificultad computacional, usamos un nuevo criterio de optimización llamado optimización competitiva, que se analiza en el capítulo 4 de la tesis doctoral de W. Yu, " Competition and Cooperation in Multi – user Communication Environments ", tesis doctoral, Universidad de Stanford, de 2002. En particular, Yu desarrolla un algoritmo water-filling iterativo para una solución sub-óptima para el entorno de la línea (DSL) de abonado digital multiusuario, visto como un juego no cooperativo.

Ahora puede reformularse el problema del control de potencia de transmisión, de la siguiente manera:

Considerando un entorno de radio cognitivo multiusuario visto como un juego no cooperativo, maximizar el rendimiento de cada transceptor sin servicio, sin importar lo que todos los otros transceptores hacen, pero sometido a la restricción de que no se viole un límite de interferencia.

Esta formulación del problema del control de potencia de transmisión distribuida conduce a una solución que es de naturaleza local. Aunque sub-óptima, la solución es detallada, como se describe en más detalle a continuación.

Consideremos el escenario simple de la figura 3, que involucra a dos usuarios que comunican a través de un canal con desvanecimiento plano. La matriz del canal de banda base de valor complejo se denota por

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Para ver este escenario como un juego no cooperativo, podemos describir a los dos jugadores del juego de la siguiente manera:

- Los dos jugadores están representados por los transmisores 1 y 2. En el ejemplo de dos usuarios de la figura 3, cada usuario está representado por una entrada única, el sistema inalámbrico (SISO) de salida única, por lo tanto, la adopción de los transmisores 1 y 2 de los dos sistemas como los dos jugadores en una interpretación de la teoría de juegos del ejemplo. En una generalización MIMO de este ejemplo, cada usuario tiene múltiples transmisores. Sin embargo, todavía hay dos jugadores, siendo los dos jugadores representados por los dos conjuntos de uno o más transmisores.
- Las estrategias puras (es decir, las acciones determinísticas) de los dos jugadores están definidas por las densidades espectrales de potencia $S_1(f)$ y $S_2(f)$ que corresponden, respectivamente, a las señales transmitidas radiadas por las antenas de los transmisores 1 y 2.
- Las recompensas para los dos jugadores están definidas por las velocidades de transmisión de datos de R_1 y R_2 , que se producen, respectivamente, por los transmisores 1 y 2.

El ruido de fondo del entorno de la frecuencia de radio (RF) se caracteriza por un parámetro dependiente de la frecuencia, la densidad espectral de potencia $S_N(f)$. De hecho, $S_N(f)$ define el "ruido de fondo" sobre el cual el controlador de potencia de transmisión debe ajustarse a los requisitos de los datos de transmisión de los usuarios 1 y 2.

El acoplamiento cruzado entre los dos usuarios en términos de dos nuevos parámetros con valores reales α_1 y α_2 puede definirse escribiendo

$$\alpha_1 = \frac{\Gamma |h_{12}|^2}{|h_{22}|^2} \quad (10)$$

y

$$\alpha_2 = \frac{\Gamma |h_{21}|^2}{|h_{11}|^2} \quad (11)$$

en la que Γ es la diferencia de la relación señal ruido (SNR). Suponiendo que los receptores no realizan ninguna forma de cancelación de interferencias, independientemente de las intensidades de señal recibidas, que pueden formular, respectivamente, las velocidades R_1 y R_2 de transmisión de datos alcanzables como las dos integrales definidas

$$R_1 = \int_{\text{agujero 1}} \log_2 \left(1 + \frac{S_1(f)}{N_1(f) + \alpha_2 S_2(f)} \right) df \quad (12)$$

y

$$R_2 = \int_{\text{agujero 2}} \log_2 \left(1 + \frac{S_2(f)}{N_2(f) + \alpha_1 S_1(f)} \right) df \quad (13)$$

El término $\alpha_2 S_2(f)$ en el primer denominador y el término $\alpha_1 S_1(f)$ en el segundo denominador se deben al acoplamiento cruzado entre los transmisores y receptores. Los otros dos términos $N_1(f)$ y $N_2(f)$ son términos de ruido definidos por

$$N_1(f) = \frac{\Gamma S_{N,1}(f)}{|h_{11}|^2} \quad (14)$$

y

$$N_2(f) = \frac{\Gamma S_{N,2}(f)}{|h_{22}|^2} \quad (15)$$

en las que $S_{N,1}(f)$ y $S_{N,2}(f)$ son, respectivamente, las partes específicas de la densidad $S_N(f)$ espectral del ruido de fondo de (f) que definen los contenidos espectrales de los agujeros 1 y 2 del espectro.

Ahora estamos listos para declarar formalmente el problema de optimización competitivo de la siguiente manera:

Dado que la densidad $S_2(f)$ espectral de la potencia de un transmisor 2 está fijada, maximizar la velocidad R_1 de transmisión de datos del transmisor 1, sometido a la restricción

$$\int_{\text{agujero 1}} [S_1(f) + N_1(f) + \alpha_2 S_2(f)] df \leq kT_{\max}$$

en la que $T_{\max}$ es un límite de temperatura de interferencia prescrita y k es la constante de Boltzmann. Una declaración similar se aplica a la optimización competitiva de transmisor 2.

Por supuesto, se entiende que tanto $S_1(f)$ y $S_2(f)$ permanecen no negativos para todos los f . La solución para el problema de optimización descrito en el presente documento sigue la asignación de la potencia de transmisión de acuerdo con un procedimiento water-filling.

La figura 4 es una representación gráfica de los resultados de un experimento ilustrativo en un escenario de comunicación inalámbrico de dos usuarios, que se obtuvieron usando el procedimiento water-filling. Los resultados presentados en la figura 4 se generaron bajo las siguientes condiciones, aunque, por supuesto, debería apreciarse que estos resultados están destinados únicamente a fines ilustrativos y que pueden exhibirse resultados similares o diferentes bajo una prueba diferente o condiciones reales:

- Los canales de banda estrecha espaciados en frecuencia, uniformemente, están disponibles para los 2 usuarios, de la siguiente manera – el usuario1, los canales de 1, 2, y 3; el usuario 2, los canales 4, 5, y 6.
- La estrategia de modulación es OFDM.
- La matriz de pérdida de la ruta multiusuario es

0,5207	0	0	0,0035	0,0020	0,0024
0	0,5223	0	0,0030	0,0034	0,0031
0	0	0,5364	0,0040	0,0015	0,0035
0,0036	0,0002	0,0023	0,7136	0	0
0,0028	0,0029	0,0011	0	0,6945	0
0,0022	0,0010	0,0034	0	0	0,7312

• Las velocidades de transmisión de datos de destino para los usuarios 1 y 2 son 9 y 12 bits/símbolo, respectivamente.

• La restricción de potencia impuesta por el límite de temperatura de interferencia era de 0 dB.

• El nivel de potencia de ruido del receptor = -30 dB.

• El nivel de potencia de interferencia ambiental = -24 dB.

La solución presentada en la figura 4 se alcanzó en 2 iteraciones del algoritmo water-filling. Se ilustran dos cosas en la figura 4:

(i) el proceso de compartición del espectro realizado usando un algoritmo iterativo water-filling; y

(ii) el curva de carga de bits en la parte superior de la figura.

Para añadir significado al importante resultado representado en la figura 4, podemos decir que la respuesta competitiva óptima para toda la estrategia pura corresponde a un equilibrio de Nash. Dicho de otra manera, un equilibrio de Nash se alcanza si, y sólo si, ambos usuarios satisfacen, al mismo tiempo, la condición water-filling.

Una suposición implícita en la solución water-filling se presenta en la figura 4, es la que cada transmisor de radio cognitiva tiene conocimiento de su posición con respecto a los receptores en su intervalo de funcionamiento en todo momento. En otras palabras, la radio cognitiva tiene conciencia geográfica, que puede implementarse, por ejemplo, mediante la incorporación de un receptor de satélite (GPS) de posicionamiento global en el diseño del sistema.

Un transmisor pone su conciencia geográfica para un buen uso calculando la pérdida de la ruta generada en el curso de la propagación electromagnética de la señal transmitida a cada receptor en el intervalo de funcionamiento del transmisor, que a su vez hace que sea posible calcular la matriz de pérdida de ruta multiusuario del entorno. Dejamos que d denote la distancia desde un transmisor a un receptor. Mediciones extensas de la intensidad del campo electromagnético, expresadas como una función de la distancia d , llevadas a cabo en diversos entornos de radio han motivado una fórmula de propagación empírica de la pérdida de ruta, que expresa la potencia P_R de señal

recibida en términos de potencia P_T de señal transmitida como $P_R = \left(\frac{\beta}{d^m} \right) P_T$,

en la que el exponente m de pérdida de ruta varía de 2 a 5, dependiendo del entorno, y el parámetro P de atenuación es la frecuencia dependiente.

Considerando el caso general de n transmisores indexados por i , y n receptores indexados por j , se denota el coeficiente de canal de valores complejos del transmisor i al receptor j . Entonces, a la luz de la fórmula de la

propagación empírica, podemos escribir $|h_{ij}|^2 = \frac{P_{R,j}}{P_{T,i}} = \frac{\beta}{d_{ij}^m}$ para $i=1, 2, \dots, n$ y $j=1, 2, \dots, n$, y con d_{ij} siendo

la distancia desde el transmisor i al receptor j . Por lo tanto, sabiendo β , m , y d_{ij} para todo i y j , podemos calcular la matriz de pérdida de la ruta multiusuario.

Animado por la solución water-filling ilustrada en la figura 4 para un escenario de dos usuarios, podemos formular un algoritmo water-filling de dos bucles iterativo para el control de potencia de transmisión distribuido de un entorno de radio multiusuario. El entorno implica un conjunto de transmisores indexados $i=1, 2, \dots, n$ y un conjunto correspondiente de receptores indexados por $j=1, 2, \dots, n$. Viendo el entorno de radio multiusuario como un juego no cooperativo y asumiendo la disponibilidad de un número adecuado de agujeros del espectro para acomodar las velocidades de transmisión de datos de destino, un algoritmo de water-filling iterativo puede proceder de la siguiente manera:

(i) Inicialización. A menos que esté disponible algún conocimiento previo, la distribución de la energía a través de los n usuarios se pone igual a cero o algún otro valor inicial.

(ii) El bucle interno (iteración). Dado un conjunto de canales permitidos (es decir, los agujeros del espectro):

- El usuario 1 realiza el water-filling, sometido a su restricción de energía. Al principio, el usuario emplea un canal, pero si su velocidad de destino no se cumple, puede que intente emplear dos canales, y así sucesivamente. Se realiza el water-filling por el usuario 1 sólo para tener en cuenta el ruido de fondo.

- El usuario 2 realiza el proceso water-filling, sometido a su propia restricción de potencia. En este punto, además del ruido de fondo, el cálculo water-filling para el usuario 2 puede dar cuenta de la interferencia producida por el usuario 1.

- El proceso water-filling con restricción de potencia se continúa hasta que se tratan todos los n usuarios.

(iii) El bucle externo (iteración). Después de completarse la iteración interna, la asignación de potencia entre los n usuarios se ajusta:

- Si se encuentra que la velocidad de transmisión de datos real de cualquier usuario es mayor que su valor de destino, se reduce la potencia de transmisión de ese usuario.

- Si, por otro lado, la velocidad de transmisión de datos real de cualquier usuario es menor que el valor de destino, la potencia de transmisión se aumenta, teniendo en cuenta que no se viola un límite de interferencia, de manera ilustrativa, un límite de temperatura de interferencia.

(iv) Confirmación. Después de los ajustes de potencia se completan, arriba o abajo, se comprueban las velocidades de transmisión de datos de todos los n usuarios:

- Si se satisfacen las velocidades de destino de todos los n usuarios, el cálculo se termina.

- En caso contrario, el algoritmo vuelve al bucle interno, y los cálculos se repiten. Esta vez, sin embargo, el water-filling realizado por cada usuario, incluyendo el usuario 1, representa, preferentemente, la interferencia producida por todos los demás usuarios.

De hecho, el bucle externo del controlador de potencia de transmisión distribuido trata de encontrar el nivel mínimo de potencia de transmisión necesario para satisfacer las velocidades de transmisión de datos de destino de todos los n usuarios.

Para que el controlador de potencia de transmisión distribuido funcione adecuadamente, se satisfacen, preferentemente, dos requisitos:

- Cada usuario conoce, a priori, su propia velocidad de destino.

- Todas las velocidades de destino se encuentran dentro de una zona de velocidad permitida. De lo contrario, algunos o todos los usuarios violarán el límite de interferencia.

Distributivamente se encuentran dentro de la zona de velocidad permitida, el transmisor que está equipado, preferentemente, con un agente centralizado que tiene conocimiento de la capacidad del canal (por ejemplo, a través de la retroalimentación de la velocidad desde el receptor) y la matriz de pérdida de la ruta multiusuario (en virtud de la conciencia geográfica). De esta manera, el agente centralizado se habilita para decidir qué conjuntos específicos de velocidades de destino se pueden alcanzar en realidad.

El enfoque water-filling (WF) iterativo, arraigado en la teoría de la comunicación, tiene una variante "de arriba hacia abajo, controlada dictatorialmente". Por el contrario, un algoritmo de no arrepentimiento, arraigado en el aprendizaje automático, tiene una variante "de abajo hacia arriba". En términos más específicos, podemos hacer las siguientes observaciones:

(i) El algoritmo WF iterativo exhibe un comportamiento de convergencia rápido por virtud de la incorporación de información tanto en la canal y el entorno RF. Por otro lado, un algoritmo de no arrepentimiento ejemplificado mediante el algoritmo de cobertura de Lagrangian se basa en la información del gradiente de primer orden, haciendo que converjan con relativa lentitud.

(ii) El aprendiz de cobertura de Lagrangian tiene la característica atractiva de la incorporación de una agenda de arrepentimiento, el propósito de la cual es garantizar que al aprendiz no se le pueda explotar engañosamente por un jugador inteligente. Por otro lado, el algoritmo WF iterativo carece de una estrategia de aprendizaje que le permita protegerse contra la explotación.

En resumen, el enfoque water-filling iterativo tiene mucho que ofrecer para hacer frente a escenarios multiusuario, pero su rendimiento podría mejorarse a través de la interconexión con un más competitivo aprendizaje automático de arrepentimiento consciente que le permita mitigar el fenómeno de la explotación.

5 Las técnicas de control de potencia de transmisión se han descrito en detalle de forma considerable anteriormente. La figura 5 es un diagrama de flujo de un método de acuerdo con una realización de la invención, en el que las técnicas de control de potencia arraigadas en muy diferentes campos técnicos están combinadas en un método de control de potencia de transmisión en un sistema de comunicación inalámbrica multiusuario.

10 Como se muestra, el método 50 comienza en la etapa 52 con una operación de determinación de un nivel de potencia de transmisión para un transmisor. Esta determinación se realiza de acuerdo con un algoritmo de la teoría de la comunicación, un ejemplo del cual es un procedimiento water-filling iterativo. El algoritmo de la teoría de la comunicación usado en la etapa 52 se basa en el supuesto de los comportamientos de transmisión de los transmisores en el sistema de comunicación.

15 En la etapa 54, el método 50 continúa con una operación de monitorización de los comportamientos de transmisión de los transmisores en el sistema de comunicación. Mientras que la operación de determinación en la etapa 52 usa un algoritmo de la teoría de la comunicación, la operación de monitorización en la etapa 54 usa un algoritmo de aprendizaje.

20 En una realización, el algoritmo de la teoría de la comunicación es un procedimiento water-filling iterativo que representa los niveles de potencia de transmisión determinados de los transmisores y otros transmisores en el sistema de comunicación.

25 Un ejemplo de tal procedimiento iterativo se ha descrito anteriormente, y puede comenzar con la inicialización de una distribución de potencia de transmisión a través de n transmisores. A continuación se realiza un Water-filling por el transmisor para determinar un nivel de potencia de transmisión para una velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor sometido a una restricción de potencia del transmisor y a un nivel de interferencia, comprendiendo el nivel de interferencia un ruido de fondo más, o niveles de potencia de transmisión inicializados o bien niveles de potencia de transmisión determinados previamente para los otros transmisores. A continuación, se realiza una determinación en cuanto a si una velocidad de transmisión de datos del transmisor es mayor o menor que una velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor, y si es así, se ajusta el nivel de potencia de transmisión determinado por el transmisor. A continuación, se realiza una determinación similar para los otros transmisores, para determinar si una velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores no se satisface mediante un nivel de potencia de transmisión ajustado respectivo para al menos un transmisor. El water-filling se repite cuando no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores.

40 Las operaciones de realización, determinan si una velocidad de transmisión de datos de un transmisor es mayor o menor que una velocidad de transmisión de destino, y el ajuste puede repetirse para cada uno de los otros transmisores.

45 La operación de determinación de si no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores puede implicar la determinación de si no se satisfacen las velocidades de transmisión de datos de destino de todos los n transmisores. En este caso, el water-filling se repite en cuando no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de todos los n transmisores. Una velocidad de transmisión de datos de destino puede considerarse no satisfecha si la velocidad de transmisión de datos real o alcanzable difiere de la velocidad de transmisión de datos de destino en una cantidad predeterminada.

50 El ajuste de un nivel de potencia de transmisión puede implicar reducir el nivel de potencia de transmisión determinado para un transmisor cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es mayor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor. Cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor, ajustar puede implicar determinar si el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia, y si no, aumentar el nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor.

55 El método 50 continúa en la etapa 56 con una operación de determinación de si los comportamientos de los transmisores son consistentes con el supuesto de los comportamientos en el que se basa el algoritmo de determinación del nivel de potencia de transmisión. Cualquier "mal funcionamiento" de los transmisores pueden afectar a la eficacia del algoritmo de determinación del nivel de potencia de transmisión, y por lo tanto al funcionamiento de otros transmisores en el sistema de comunicación. Ya que los transmisores están compitiendo por el mismo recurso limitado, no se debería permitir a un transmisor específico explotar el recurso solamente en su propio beneficio si esto también afecta negativamente a otros transmisores.

65 Una posible acción que puede tomarse cuando el comportamiento de transmisión de un transmisor no es consistente con el supuesto de comportamiento del algoritmo de determinación del nivel de potencia de transmisión

sería generar una alerta. Tal alerta podría provocarse localmente, en un dispositivo de comunicación cuando se está realizando el método 50, y/o enviarse a un dispositivo remoto o sistema.

También, la acción correctiva puede tomarse, como se muestra en la etapa 58. Esto puede incluir acciones que afectan al algoritmo de determinación del nivel de potencia de transmisión en la etapa 52 y/o las acciones tomadas por un operador de red de comunicación o proveedor de servicios. Una acción correctiva posible del operador de red o proveedor de servicios podría ser, aumentar los cargos por los servicios comunicación para un usuario de un transmisor que no acata el(los) supuesto(s) de comportamiento de transmisión en el(los) que se basa el algoritmo de determinación del nivel de potencia de transmisión.

Como se señaló anteriormente, la determinación del nivel de potencia de transmisión en algunas realizaciones implica detectar al menos un agujero del espectro y determinar un nivel de potencia de transmisión del transmisor para el transmisor dentro de al menos un agujero del espectro.

Debería apreciarse que el método 50 se destina, exclusivamente, para fines de ilustración. Las realizaciones de la invención puede implicar operaciones adicionales, menores, o diferentes que pueden realizarse en un orden similar o diferente al que se muestra explícitamente.

Por ejemplo, en algunas realizaciones, un método de control de potencia de transmisión incluye también una operación de disponibilidad posterior de la predicción de un agujero del espectro detectado, y las operaciones de determinación y monitorización en las etapas 52 y 54 se repiten cuando se prevé que al menos un agujero del espectro deje de estar disponible.

También en el contexto de los agujeros del espectro, pueden detectarse uno o más agujeros del espectro adicionales. Las operaciones de determinación y monitorización pueden, a continuación, repetirse para controlar niveles de potencia de transmisión de los transmisores dentro del(los) agujero(s) del espectro adicional(es), tal como cuando se detecta un aumento en la interferencia en un agujero del espectro actual.

También, el control de potencia de transmisión puede implicar la determinación de una posición del transmisor con relación a los otros transmisores en el sistema de comunicación. Una matriz de pérdida de la ruta multiusuario del entorno funcional del transmisor puede calcularse, a continuación, en base a la posición determinada del transmisor con relación a los otros transmisores.

En términos de un sistema para el control de la potencia de transmisión en un sistema de comunicación inalámbrico multiusuario, la figura 6 es una diagrama de bloques del equipo de comunicación en el que pueden implementarse las realizaciones de la invención. El equipo 60 de comunicación incluye un transceptor 64 y una o más antenas 62 para recibir señales de comunicación (incluyendo estímulos de fuentes de interferencia) desde y transmitir señales de comunicación a otros equipos de comunicación. Se proporcionan múltiples antenas 62, por ejemplo, en un equipo de comunicación de múltiple entrada múltiple salida (MIMO). El equipo 60 de comunicación también incluye un procesador 66 conectado al transceptor 64 y a una memoria 68.

Muchos tipos diferentes de transceptor 64 y antenas 62 serán evidentes para los expertos en la materia. Los tipos específicos del transceptor 64 y hasta cierto punto de las antenas 62 dependen, por ejemplo, del tipo de equipo 60 de comunicación y/o del sistema de comunicación en el que está destinado a funcionar. La invención no está, de ninguna manera, limitada a ningún tipo particular de transceptor 64 o antenas 62. Las realizaciones de la invención pueden implementarse, por ejemplo, en dispositivos de comunicación móviles, estaciones base, y/u otros equipos en un sistema de comunicación inalámbrica.

El procesador 66 puede incluir o implementarse como un microprocesador o un procesador de señal digital, por ejemplo, que puede configurarse para realizar cualquiera o todas las funciones descritas en el presente documento ejecutando un soporte lógico (software) almacenado en la memoria 68. También otras funciones pueden realizarse por el procesador 66, de manera que el procesador 66 no es, necesariamente, un procesador dedicado. La implementación específica del procesador 66 y de la memoria 68, o de otros elementos funcionales usados en las realizaciones adicionales de la invención, también pueden ser dependientes, en alguna medida, del tipo de equipos 60 de comunicación y/o del sistema de comunicación en el que está destinado a funcionar.

Por ejemplo, en un dispositivo de comunicación móvil la memoria 68 incluye, típicamente, un dispositivo de memoria de estado sólido, aunque también otros tipos de dispositivo de memoria pueden, o en lugar de, proporcionarse en el equipo 60 de comunicación.

En funcionamiento, el procesador 66 está configurado, mediante el soporte lógico almacenado en la memoria 68, para determinar un nivel de potencia de transmisión para un transmisor en transceptor 64 de acuerdo con un algoritmo basado en la teoría de la comunicación, de manera ilustrativa un procedimiento water-filling iterativo, y para monitorizar los comportamientos transmitidos de otros transmisores que usan un algoritmo de aprendizaje.

La información asociada con los comportamientos transmitidos de los otros transmisores puede recibirse por el procesador 66 a través de un receptor en el transceptor 64 y la(s) antena(s) 62. Más en general, el procesador 66 tiene una entrada que recibe la información de comportamiento transmitida asociada con otros transmisores en un sistema de comunicación.

El procesador 66 puede realizar estas operaciones de forma sustancial como se describe anteriormente. También se pueden realizar otras operaciones. Por ejemplo, el procesador 66 puede participar directa o indirectamente en las acciones correctivas que afectan a los transmisores con "mal comportamiento". La participación indirecta puede implicar la detección de conductas de transmisión que no sean consistentes con las condiciones asumidas bajo las que el algoritmo de control de potencia de transmisión funciona más eficazmente y el alertar a otro dispositivo o sistema de esta detección. La participación directa implicaría una acción correctiva realizada por el propio procesador 66.

El equipo de comunicación puede también, o en lugar de, incluir un receptor GPS, lo que permitiría al procesador 66 determinar una posición de su transmisor en base a las señales recibidas por el receptor GPS.

Debería apreciarse que la presente invención no está de ninguna manera limitada a las operaciones específicas o a los componentes del sistema mostrado, explícitamente, en las figuras 5 y 6. Las realizaciones de la invención pueden incluir operaciones adicionales o menores o componentes que se realizan o se conectan diferentemente que los mostrados en los dibujos. Por ejemplo, las técnicas descritas en el presente documento pueden aplicarse a equipos de comunicación en que sólo se proporcionan un receptor, un transmisor, o una única antena o sensor. Las diversas funciones descritas en el presente documento también pueden implementarse usando componentes de soporte físico, de soporte lógico y/o de un programa fijo de máquina separados, y no necesita realizarse mediante un único módulo, tal como el procesador mostrado en la figura 6. También se contemplan otras implementaciones de las realizaciones de la invención, tal como las instrucciones almacenadas en un medio legible por máquina, por ejemplo.

También debería apreciarse que el uso del término "usuario" en el presente documento no pretende dar a entender que la presente invención se limita al uso junto con únicamente, equipos de comunicación de usuario final. Las técnicas descritas en el presente documento podrían emplearse en aparatos de usuario final, estaciones base del sistema de comunicación u otros equipos de red, o en ambos.

Además, los expertos en la materia observarán que el término "usuario" en algunos casos se ha usado para referirse un equipo de comunicación de un usuario en lugar de un usuario real de ese equipo, en el contexto de un sistema de comunicación multiusuario o determinando los niveles de potencia de transmisión para los usuarios.

Las referencias a los "usuarios" deberían interpretarse en consecuencia.

La gestión del espectro dinámica, también comúnmente referida como la asignación de frecuencia dinámica, es un proceso que podría realizarse en un transmisor. El control de potencia de transmisión, como se describe en detalle anteriormente, también se realiza en un transmisor. Estas dos tareas se relacionan tan íntimamente entre sí que pueden incluirse en un único módulo funcional que realiza la función de control de acceso múltiple en el ciclo cognitivo básico de la figura 1.

En pocas palabras, un objetivo principal de la gestión del espectro es desarrollar una estrategia de adaptación para la eficiente y eficaz utilización del espectro de RF. En concreto, un algoritmo de gestión del espectro puede construirse en los agujeros del espectro detectados durante el análisis de la escena de radio, tal como se describe en la solicitud co-pendiente incorporada anteriormente, y la salida de un controlador de potencia de transmisión para seleccionar los parámetros de comunicación, tal como una estrategia de modulación que se adapta a las condiciones de variación de tiempo del entorno de radio, asegurando todo el tiempo una comunicación fiable a través del canal. Por ejemplo, puede asegurarse la fiabilidad de la comunicación, eligiendo a priori la diferencia Γ SNR suficientemente grande, como se discutió anteriormente.

Una estrategia de modulación que se presta a la radio cognitiva es la OFDM, en virtud de su flexibilidad y eficiencia computacional. Para su funcionamiento, la OFDM usa un conjunto de frecuencias de portadora centradas en un conjunto correspondiente de los anchos de banda de canal estrecho. La disponibilidad de retroalimentación de la velocidad (mediante el uso de un canal de retroalimentación) permite el uso de bits de carga, por lo que el número de bits/símbolo para cada canal se optimiza para la relación señal ruido que caracteriza ese canal. Esta operación se ilustra mediante la curva superior en la figura 4.

Como el tiempo evoluciona y los agujeros del espectro van y vienen, la implementación de la frecuencia del ancho de banda de portadora de la OFDM se modifica dinámicamente, como se ilustra en la representación gráfica de tiempo frecuencia representada en la figura 7 para el caso de 4 frecuencias portadoras. La figura 7 ilustra una característica distintiva de la radio cognitiva: un proceso de compartición del espectro dinámico, que evoluciona en el tiempo. De hecho, el proceso de compartición del espectro satisface la restricción impuesta en la radio cognitiva mediante la disponibilidad de los agujeros del espectro en una localización geográfica específica y su posible

variabilidad con el tiempo. A lo largo de todo el proceso de intercambio del espectro, un controlador de potencia de transmisión puede mantener un recuento de los bits de carga a través de los agujeros del espectro actualmente en uso. De hecho, un gestor del espectro dinámico y un controlador de potencia de transmisión pueden trabajar juntos, en concierto, proporcionando de esta manera el control de acceso múltiple.

Comenzando con un conjunto de agujeros del espectro, que se pueden detectar como se describe en, la antes aludida, solicitud de patente (PCT) internacional número de serie PCT/CA2005/001562, y en la solicitud de patente provisional de Estados Unidos número de serie 60/617.638, es posible para un algoritmo de gestión del espectro dinámico hacer frente a una situación cuando no puede satisfacerse una velocidad de trama de error prescrita. En situaciones de este tipo, el algoritmo puede hacer una de estas dos cosas:

(i) trabajar con una estrategia de modulación más eficiente espectralmente, o bien

(ii) incorporar el uso de uno o más agujeros del espectro.

En el enfoque (i), el algoritmo recurre a una mayor complejidad computacional, y en el enfoque (ii), se recurre al aumento del ancho de banda de canal con el fin de mantener la fiabilidad de la comunicación.

Un algoritmo de gestión del espectro dinámico puede tomar en cuenta consideraciones de tráfico. En un sistema de acceso múltiple por división de código (CDMA) como, por ejemplo el S-95, hay un fenómeno llamado respiración celular. Las células del sistema, efectivamente, se encogen y crecen con el tiempo. En concreto, si una célula tiene más usuarios, entonces el nivel de interferencia tiende a aumentar, lo que se contrarresta asignando un nuevo usuario entrante a otra celda. Es decir, la cobertura de la célula se reduce. Si, por el otro lado, una célula tiene menos usuarios, entonces el nivel de interferencia se reduce correspondientemente, en cuyo caso se deja crecer la cobertura de la célula mediante la adaptación de usuarios nuevos. Así, en un sistema CDMA, se asocian juntos los niveles de tráfico e interferencia. En un sistema de radio cognitiva en base a CDMA, el algoritmo de gestión del espectro dinámico se centra naturalmente en la asignación de los usuarios, primero a los espacios en blanco con niveles de interferencia bajos y, a continuación, a los espacios grises con niveles de interferencia mayores.

Cuando se usan otras técnicas de acceso múltiple, tales como la OFDM, debe evitarse la interferencia entre canales. Para lograr este objetivo, un algoritmo de gestión del espectro dinámico puede incluir un modelo de tráfico del usuario principal que ocupa una parte del espectro. El modelo de tráfico, que podría construirse con datos históricos, proporciona una base para predecir el futuro de los patrones de tráfico en esa parte del espectro, que a su vez hace que sea posible predecir la duración para la que un agujero del espectro desocupado por un usuario principal es probable que pueda estar disponible para su uso por un operador de la radio cognitiva.

En un entorno inalámbrico, se distinguen dos clases de patrón de tráfico de datos, incluyendo los patrones deterministas y los patrones estocásticos. En un patrón de tráfico determinista, el usuario principal (por ejemplo, un transmisor de televisión, un transmisor de radar) se asigna a un espacio de tiempo fijo para la transmisión. Cuando se apaga, la banda de frecuencia se desocupa y por lo tanto puede usarse por un operador de la radio cognitiva. Por otro lado, los patrones estocásticos, sólo pueden describirse en términos estadísticos. Típicamente, los tiempos de llegada de paquetes de datos se modelan como un proceso de Poisson, mientras que los tiempos de servicio se modelan como distribuidos uniformemente o distribuidos por Poisson, dependiendo de si los datos son por conmutación de paquetes o por conmutación de circuitos, respectivamente. En cualquier caso, los parámetros del modelo de datos de tráfico estocásticos varían lentamente, y por lo tanto, se prestan a la estimación en línea a partir de datos históricos. Por otra parte, construyendo una estrategia de seguimiento en el diseño del modelo predictivo, la precisión del modelo puede mejorarse aún más.

Lo que se ha descrito es meramente ilustrativo de la aplicación de los principios de la invención. Pueden implementarse otras disposiciones y métodos por los expertos en la materia sin apartarse del alcance de la presente invención.

Por ejemplo, puede ser útil considerar el posible comportamiento emergente de la radio cognitiva.

El entorno de la radio cognitiva es, naturalmente, variable en el tiempo. Lo más importante es que exhibe una combinación única de características que incluyen, entre otras, la adaptabilidad, la conciencia, la cooperación, la competencia y la explotación. Teniendo en cuenta estas características, podemos preguntarnos sobre el comportamiento emergente de un entorno de radio cognitiva a la luz de lo que sabemos en dos campos relevantes: los sistemas de autoorganización, y los juegos evolutivos.

En primer lugar, observamos que el comportamiento emergente de un entorno de radio cognitiva visto como un juego, se ve influido por el grado de acoplamiento que puede existir entre las acciones de los diferentes jugadores (es decir, los transmisores) que operan en el juego. El acoplamiento puede tener el efecto de amplificación de las perturbaciones locales de una manera análoga con el postulado de Hebb de aprendizaje, que representa la autoamplificación en los sistemas de autoorganización. Evidentemente, si se dejan libremente, las amplificaciones de las perturbaciones locales podrían conducir, en última instancia, a la inestabilidad. A partir del estudio de los

sistemas de autoorganización, sabemos que la competencia entre los componentes de tal sistema puede actuar como una fuerza estabilizadora. Por la misma razón, esperamos que la competencia entre los usuarios de la radio cognitiva para recursos limitados (por ejemplo, los agujeros del espectro) pueda tener la influencia de un estabilizador.

Para obtener información adicional, lo siguiente será mirar hacia los juegos evolutivos. La idea de juegos evolutivos, desarrollada para el estudio de la biología ecológica, fue introducida por primera vez por Maynard Smith en 1974. En sus trabajos emblemáticos (J. Maynard Smith, "The Theory of Games and the Evolution of Animal Conflicts", J. Theoretical Biology, volumen 47, páginas. 209-221, de 1974, y J. Maynard Smith, Evolution and the Theory of Games, Cambridge University Press, de 1982), Maynard Smith se preguntó si la teoría de juegos podría servir como una herramienta para modelar los conflictos en una población de animales. En términos específicos, se presentaron dos ideas críticas en la aparición de las denominadas estrategias estables evolutivas por Maynard Smith, como, de manera sucinta, se resumen en P.W. Glimcher, Decisions, Uncertainty, and the Brain: The science of neuroeconomics, MIT Press, de 2003 y H.G. Schuster, Complex Adaptive Systems: An Introduction, Springer-Verlag, de 2001:

- El comportamiento de los animales es estocástico e impredecible, cuando se ve en el nivel microscópico de los actos individuales.
- La teoría de juegos proporciona una base plausible para explicar los patrones complejos e imprevisibles del comportamiento de los animales.

Se plantean aquí dos cuestiones fundamentales:

1. Complejidad. Las nuevas ciencias de la complejidad bien pueden ocupar gran parte de la actividad intelectual en el siglo XXI. En el contexto de la complejidad, tal vez sea menos ambiguo hablar de un comportamiento complejo en lugar de los sistemas complejos. Un sistema dinámico no lineal puede ser complejo en términos computacionales pero incapaz de exhibir un comportamiento complejo. Por la misma razón, un sistema no lineal puede ser simple en términos computacionales pero su dinámica subyacente es suficientemente rica para producir un comportamiento complejo. El comportamiento emergente de un juego evolutivo puede ser complejo, en el sentido de que un cambio en uno o más de los parámetros en la dinámica subyacente del juego puede producir un cambio drástico en el comportamiento. Téngase en cuenta que la dinámica debe ser, a ser posible, no lineal para el comportamiento complejo.
2. Imprevisibilidad. La teoría del juego no requiere que los animales sean fundamentalmente impredecibles. Más bien, requiere, simplemente, que el comportamiento individual de cada animal sea impredecible con respecto a sus oponentes.

A partir de esta breve discusión sobre los juegos evolutivos, podemos conjeturar que el comportamiento emergente de un entorno de la radio cognitiva multiusuario se explica mediante la acción impredecible de cada usuario, como se ve de forma individual mediante los otros usuarios (es decir, los oponentes).

Por otra parte, dadas las influencias conflictivas de la cooperación, la competencia y la explotación en el comportamiento emergente de un entorno de radio cognitiva, podemos identificar dos posibles resultados finales:

- (i) El comportamiento emergente positivo, que se caracteriza por el orden, y por lo tanto, una utilización armoniosa y eficiente del espectro de radio por todos los usuarios de la radio cognitiva. El comportamiento emergente positivo puede compararse a la estrategia estable evolutiva de Maynard Smith.
- (ii) El comportamiento emergente negativo, que se caracteriza por el desorden, y por lo tanto, una culminación de los atascos de tráfico, caos y el espectro de radio sin usar. La posibilidad de caracterizar el comportamiento emergente negativo como un fenómeno caótico necesita alguna explicación. La teoría del caos idealizada se basa en la premisa de que el ruido dinámico en un modelo de espacio de estado que describe el fenómeno de interés es cero.

Sin embargo, es poco probable que esta condición altamente restrictiva se satisfaga mediante los fenómenos físicos de la vida real. Así, lo más apropiado que se puede decir es que es factible para un comportamiento emergente negativo el ser caótico estocástico.

Desde una perspectiva práctica, lo que necesitamos son, en primer lugar, un criterio fiable para la detección precoz del comportamiento emergente negativo (es decir, el desorden) y, en segundo lugar, las medidas correctivas para hacer frente a este comportamiento indeseable. Con respecto a la primera cuestión, reconocemos que la cognición, en un sentido, es un ejercicio de asignar probabilidades a las posibles respuestas de comportamiento. A la luz de esto, se puede decir que en el caso del comportamiento emergente positivo, las predicciones son posibles con confianza casi completa. Por otro lado, en el caso de comportamiento emergente negativo, las predicciones se hacen con una confianza mucho menor. Así, podemos pensar en una función de probabilidad en base a la

previsibilidad como criterio para la aparición de un comportamiento emergente negativo. En particular, prevemos un detector de máxima verosimilitud, cuyo diseño se basa en la previsibilidad del comportamiento emergente negativo.

La radio cognitiva mantiene la promesa de una nueva frontera en las comunicaciones inalámbricas. Específicamente, con la coordinación dinámica de un espectro que comparte el proceso significativo "espacio en blanco", que puede crearse en el espectro, que a su vez hace que sea posible mejorar la utilización del espectro bajo condiciones de usuario que cambian constantemente. La capacidad de compartición del espectro dinámico se basa en dos cuestiones:

(i) un cambio de paradigma en las comunicaciones inalámbricas de centrarse en el transmisor a centrarse en el receptor, mediante el cual se regula la potencia de la interferencia en lugar de la emisión del transmisor, y

(ii) el conocimiento y la adaptación al medio mediante la radio.

La radio cognitiva es un sistema de ordenador intensivo, tanto es así que podemos pensar en él como una radio con un ordenador dentro o un ordenador que transmite. Tal sistema proporciona una base novedosa para balancear las necesidades de comunicación e informáticas de un usuario frente a las de una red con la que el usuario desearía funcionar. Con tanta confianza en la informática, la comprensión del lenguaje puede jugar un papel clave en la organización de los conocimientos de dominio del ciclo cognitivo, que puede incluir cualquiera o todos de los siguientes:

(i) un ciclo de vigilia, como se muestra en la figura 1, durante el cual la radio cognitiva soporta las tareas del análisis pasivo de la escena de radio, el control activo de la potencia de transmisión y la gestión del espectro dinámico, y posiblemente otras tareas como la estimación del estado del canal y la modelización predictiva;

(ii) un ciclo de sueño, durante el cual los estímulos de entrada se integran en el conocimiento del dominio de un "asistente personal digital", y

(iii) un ciclo de oración, que atiende a los elementos que no pueden tratarse durante el ciclo de sueño y por lo tanto pueden resolverse en tiempo real a través de la interacción de la radio cognitiva con el usuario.

Es ampliamente reconocido que el uso de una arquitectura de antena MIMO puede prever un aumento espectacular de la eficacia espectral de las comunicaciones inalámbricas. Con la utilización del espectro mejorado como uno de los principales objetivos de la radio cognitiva, parece lógico explorar la construcción de la arquitectura de antena MIMO en el diseño de la radio cognitiva. El resultado final es una radio MIMO cognitiva que ofrece la máxima flexibilidad, que se ejemplifica mediante cuatro grados de libertad: la frecuencia de portadora, el ancho de banda de canal, la potencia de transmisión y la ganancia de multiplexación.

El procesamiento turbo se ha establecido como una de las tecnologías clave para las comunicaciones digitales modernas. En términos específicos, el procesamiento turbo ha hecho posible proporcionar mejoras significativas en las operaciones del procesamiento de la señal de descodificación del canal y la ecualización del canal, ambas son básicas para el diseño de los sistemas de comunicación digital. En comparación con las metodologías tradicionales de diseño, estas mejoras se manifiestan en reducciones espectaculares en las velocidades de error de trama para las relaciones señal a ruido prescritas. También parece lógico construir el procesamiento turbo en el diseño de la radio cognitiva con el fin de soportar los requerimientos de la Calidad de Servicio (QoS), por ejemplo.

Con la informática siendo tan fundamental para la implementación de la radio cognitiva, es natural que tengamos la nanotecnología en mente al mirar hacia el futuro. Desde la primera observación de los nanotubos de carbono de paredes múltiples en los estudios de microscopía electrónica de transmisión, los nanotubos de carbono se han explorado extensamente en los estudios teóricos y experimentales de la nanotecnología. Los nanotubos ofrecen el potencial para un cambio de paradigma desde los confines estrechos del procesamiento de la información de hoy basado en la tecnología de silicio a un campo mucho más amplio de procesamiento de la información, dadas las ricas funcionalidades electro-mecánico-óptico-químicas que están dotadas en los nanotubos. Este cambio de paradigma también puede afectar a la evolución de la radio cognitiva de su propia manera.

El potencial de la radio cognitiva para hacer una diferencia significativa en las comunicaciones inalámbricas es inmensa, por lo tanto, se la referencia como una tecnología disruptiva, pero discreta. En el análisis final, sin embargo, una cuestión clave que puede dar forma a la evolución de la radio cognitiva en el transcurso del tiempo, ya sea, para aplicaciones civiles o militares, es la confianza, en un doble aspecto, que incluye la confianza de los usuarios de la radio cognitiva y la confianza de todos los otros usuarios, que podrían interferirse.

REIVINDICACIONES

1. Un método (50) de control de la potencia de transmisión en un sistema de comunicación inalámbrico multiusuario, que comprende:

- 5 determinar (52) un nivel de potencia de transmisión para un transmisor en el sistema de comunicación inalámbrico de acuerdo con un algoritmo teórico de comunicación, estando el algoritmo teórico de comunicación basado en una suposición de los comportamientos de los transmisores en el sistema de comunicación; y
- 10 monitorizar (54) los comportamientos de los transmisores en el sistema de comunicación usando un algoritmo de aprendizaje, comprendiendo la monitorización (54), determinar (56) la coherencia entre los comportamientos de los transmisores y el supuesto de los comportamientos.

2. El método (50) de la reivindicación 1, en el que el algoritmo teórico de comunicación comprende un procedimiento water-filling (de llenado con agua) iterativo, representando el procedimiento water-filling iterativo los niveles de potencia de transmisión determinados del transmisor y otros transmisores en el sistema de comunicación.

3. El método (50) de la reivindicación 2, en el que el procedimiento water-filling iterativo comprende:

- 20 inicializar una distribución de potencia de transmisión a través de n transmisores;
- realizar un water-filling del transmisor para determinar un nivel de potencia de transmisión para una velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor sometido a una restricción de potencia del transmisor y a un nivel de interferencia, comprendiendo el nivel de interferencia un ruido de fondo más, o niveles de potencia de transmisión inicializados, o niveles de potencia de transmisión determinados previamente para los otros
- 25 transmisores;
- determinar si una velocidad de transmisión de datos del transmisor es mayor o menor que una velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor, y si es así, ajustar el nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor;
- 30 determinar si no se satisface una velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores mediante un nivel de potencia de transmisor ajustado respectivo para al menos un transmisor, y repetir la operación de realización de un water-filling cuando no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores.

4. El método (50) de la reivindicación 3, en el que las operaciones de realización, determinación de si una velocidad de transmisión de datos de un transmisor es mayor o menor que una velocidad de transmisión de destino, y ajuste se repiten para cada uno de los otros transmisores, en el que determinar si no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores comprende determinar si no se satisfacen las velocidades de transmisión de datos de destino de todos los n transmisores, y en el que repetir la operación de realización del water-filling comprende repetir la operación de realización del water-filling cuando no se satisfacen las

40 velocidades de transmisión de datos de destino de todos los n transmisores.

5. El método (50) de la reivindicación 3, en el que el ajuste comprende la reducción del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor en el que la velocidad de transmisión de datos del transmisor es mayor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor, y en el que, cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor, el ajuste comprende:

45 determinar si el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia; y

- 50 aumentar el nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor cuando el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor no violaría un límite de nivel de interferencia.

6. El método (50) de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que comprende además:

- 55 generar una alerta, cuando el comportamiento de uno o más de los transmisores no es consistente con el supuesto.

7. El método (50) de la reivindicación 1, que comprende además:

- 60 detectar al menos un agujero del espectro, en el que determinar (52) comprende determinar un nivel de potencia de transmisión del transmisor para la transmisión dentro de al menos un agujero del espectro.

8. El método (50) de la reivindicación 7, que comprende además:

- 65 predecir la disponibilidad posterior de al menos un agujero del espectro; y

repetir las operaciones de determinación (52) y monitorización (54) cuando se predice que al menos un agujero del espectro deja de estar disponible.

9. El método (50) de la reivindicación 7 o la reivindicación 8, que comprende además:

detectar un agujero del espectro adicional;
detectar un aumento en la interferencia en al menos un agujero del espectro; y
repetir las operaciones de determinación (52) y monitorización (54) para controlar los niveles de potencia de transmisión del transmisor para la transmisión dentro del agujero del espectro adicional sensible a la detección de un aumento en la interferencia en al menos un agujero del espectro.

10. El método (50) de la reivindicación 1, que comprende además:

determinar una posición del transmisor con relación a los otros transmisores en el sistema de comunicación; y
determinar una matriz de pérdida de la ruta multiusuario del entorno de funcionamiento del transmisor en base a la posición determinada del transmisor con relación a los otros transmisores.

11. El método (50) de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que el algoritmo de aprendizaje comprende un algoritmo de aprendizaje de arrepentimiento consciente o un algoritmo de aprendizaje de Lagrangian.

12. El método (50) de la reivindicación 5, que comprende además:

adaptar una estrategia de modulación para la transmisión de datos por el transmisor en el que la velocidad de transmisión de datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor y el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia.

13. El método (50) de la reivindicación 5, en el que determinar si el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia comprende determinar si el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia dentro de un agujero del espectro, comprendiendo el método además, cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor y el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia dentro del agujero del espectro:

detectar un agujero del espectro adicional; y
determinar un nivel de potencia de transmisión adicional del transmisor para la transmisión dentro del nuevo agujero del espectro.

14. Un medio legible por máquina, que almacene instrucciones que, cuando se ejecutan, realizan el método de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13.

15. Un sistema (60) para controlar la potencia de transmisión en un sistema de comunicación inalámbrico multiusuario, que comprende:

una entrada para recibir la información asociada con los comportamientos de transmisión de los transmisores en el sistema de comunicación inalámbrico; y
un procesador (66) acoplado funcionalmente a la entrada y configurado para determinar un nivel de potencia de transmisión para un transmisor en el sistema de comunicación inalámbrico de acuerdo con un algoritmo teórico de comunicación, estando el algoritmo teórico de comunicación basado en una suposición de los comportamientos de transmisión de los transmisores en el sistema de comunicación, y para monitorizar los comportamientos de transmisión de los transmisores en el sistema de comunicación usando un algoritmo de aprendizaje,
estando el procesador (66) configurado para monitorizar los comportamientos de transmisión de los transmisores determinando la coherencia entre los comportamientos de los transmisores y el supuesto de los comportamientos.

16. El sistema (60) de la reivindicación 15, en el que el procesador (66) está configurado además para implementar una radio cognitiva.

17. El sistema (60) de la reivindicación 15, en el que el algoritmo teórico de comunicación comprende un procedimiento water-filling iterativo, representando el procedimiento water-filling iterativo niveles de potencia de transmisión determinados del transmisor y otros transmisores en el sistema de comunicación.

18. El sistema (60) de la reivindicación 15, en el que el procesador (66) está configurado para inicializar una distribución de potencia de transmisión a través de los n transmisores;
realizar un water-filling del transmisor para determinar un nivel de potencia de transmisión para una velocidad

de transmisión de datos de destino del transmisor sometido a una restricción de potencia del transmisor y a un nivel de interferencia, comprendiendo el nivel de interferencia un ruido de fondo más, o niveles de potencia de transmisión inicializados, o niveles de potencia de transmisión determinados previamente para los otros transmisores;

5 determinar si una velocidad de transmisión de datos del transmisor es mayor o menor que una velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor, y si es así, ajustar el nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor;

10 determinar si una velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores no se satisface mediante un respectivo nivel de potencia de transmisor ajustado para al menos un transmisor, y repetir la operación de realización de un water-filling cuando no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores.

15 19. El sistema (60) de la reivindicación 18, en el que el procesador (66) está configurado además para determinar si no se satisface la velocidad de transmisión de datos de destino de al menos uno de los n transmisores determinando si no se satisfacen las velocidades de transmisión de datos de destino de todos los n transmisores, y repetir la operación de realización del water-filling cuando no se satisfacen las velocidades de transmisión de datos de destino de todos los n transmisores.

20 20. El sistema (60) de la reivindicación 18, en el que el procesador (66) está configurado para ajustar el nivel de potencia de transmisión determinado reduciendo el nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es mayor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor, y en el que el procesador (66) está configurado además para determinar si el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia, cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor; y
25 aumentar el nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor cuando el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor no violaría un límite de nivel de interferencia.

30 21. El sistema (60) de una cualquiera de las reivindicaciones 15 a 20, en el que el procesador (66) está configurado además para generar una alerta, cuando el comportamiento de uno o más de los transmisores no es consistente con el supuesto.

35 22. El sistema (60) de la reivindicación 15, en el que el procesador (66) está configurado además para detectar al menos un agujero del espectro, y para determinar un nivel de potencia de transmisión determinando un nivel de potencia de transmisión del transmisor para la transmisión dentro de al menos un agujero del espectro.

40 23. El sistema (60) de la reivindicación 22, en el que al menos un agujero del espectro comprende un pluralidad de agujeros del espectro, y en el que el procesador (66) está configurado para determinar un nivel de potencia de transmisión determinando un conjunto de niveles de potencia de transmisión que comprenden múltiples niveles de potencia de transmisión para la transmisión dentro de los respectivos agujeros del espectro de la pluralidad de agujeros del espectro.

45 24. El sistema (60) de la reivindicación 22, en el que el procesador (66) está configurado además para predecir la disponibilidad posterior de al menos un agujero del espectro, y para repetir las operaciones de determinación y adaptación cuando se predice que al menos un agujero del espectro dejará de estar disponible.

50 25. El sistema (60) de la reivindicación 22, en el que el procesador (66) está configurado además para detectar un agujero del espectro adicional, detectar un aumento en la interferencia en al menos un agujero del espectro, y repetir las operaciones de determinación y adaptación para controlar los niveles de potencia de transmisión del transmisor para la transmisión dentro del agujero del espectro adicional sensible a la detección de un aumento en la interferencia en al menos un agujero del espectro.

55 26. El sistema (60) de la reivindicación 15, en el que el procesador (66) está configurado además para determinar una posición del transmisor con relación a los otros usuarios, y determinar una matriz de pérdida de la ruta multiusuario del entorno de funcionamiento del transmisor en base a la posición determinada del transmisor con relación a los otros transmisores.

60 27. El sistema (60) de una cualquiera de las reivindicaciones en 15 a 26, en el que el algoritmo de aprendizaje comprende un algoritmo de aprendizaje de arrepentimiento consciente o un algoritmo de aprendizaje de Lagrangian.

28. El sistema (60) de la reivindicación 20, en el que el procesador (66) está configurado además para adaptar una estrategia de modulación para la transmisión de datos por el transmisor cuando la velocidad de transmisión de datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor y el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia.

65

29. El sistema (60) de la reivindicación 20, en el que el procesador (66) está configurado para determinar si el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia determinando si,

- 5 el aumento de nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia dentro de un agujero del espectro, y en el que el procesador (66) está configurado además para detectar un agujero del espectro adicional y determinar un nivel de potencia de transmisión adicional del transmisor para la transmisión dentro del agujero del espectro adicional, cuando la velocidad de transmisión de los datos del transmisor es menor que la velocidad de transmisión de datos de destino del transmisor y el aumento del nivel de potencia de transmisión determinado del transmisor violaría un límite del nivel de interferencia dentro del agujero del
- 10 espectro.

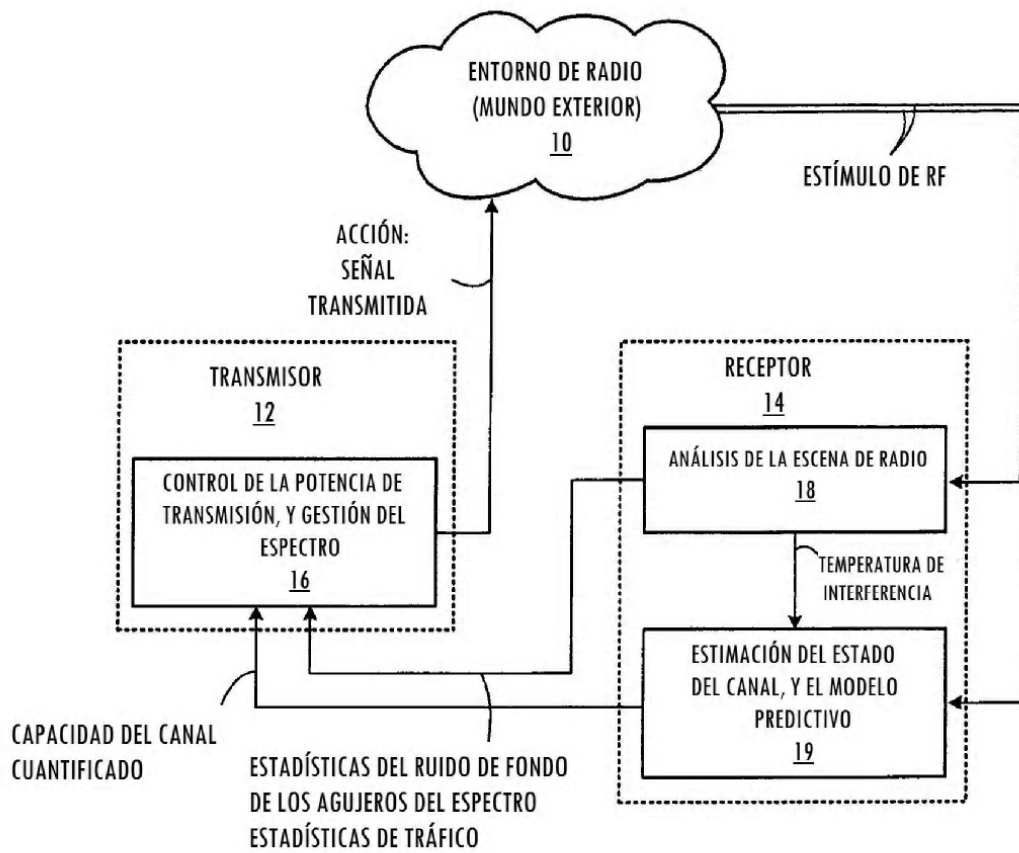


FIG. 1

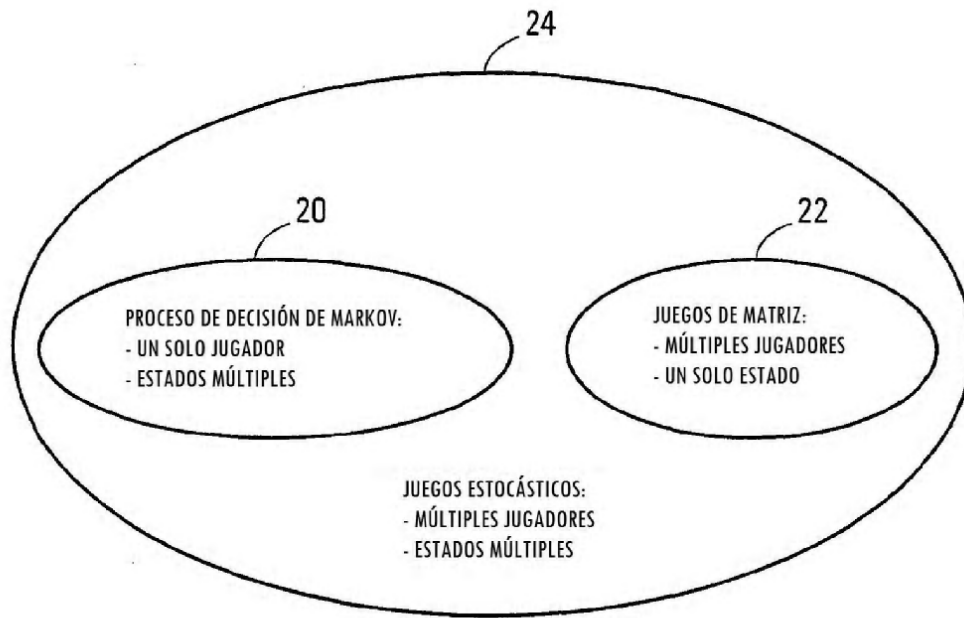


FIG. 2

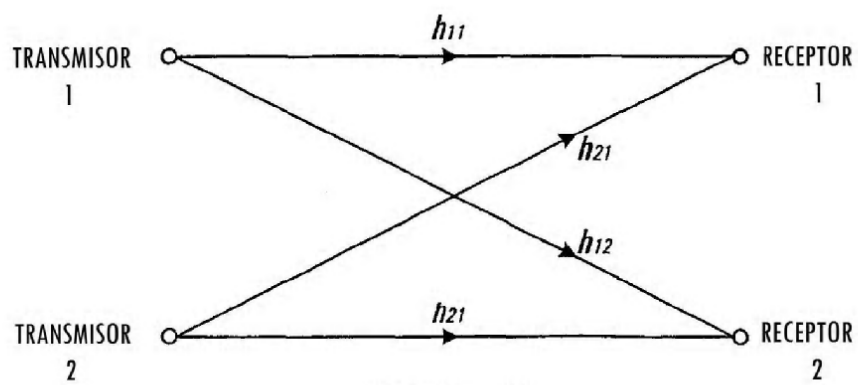


FIG. 3

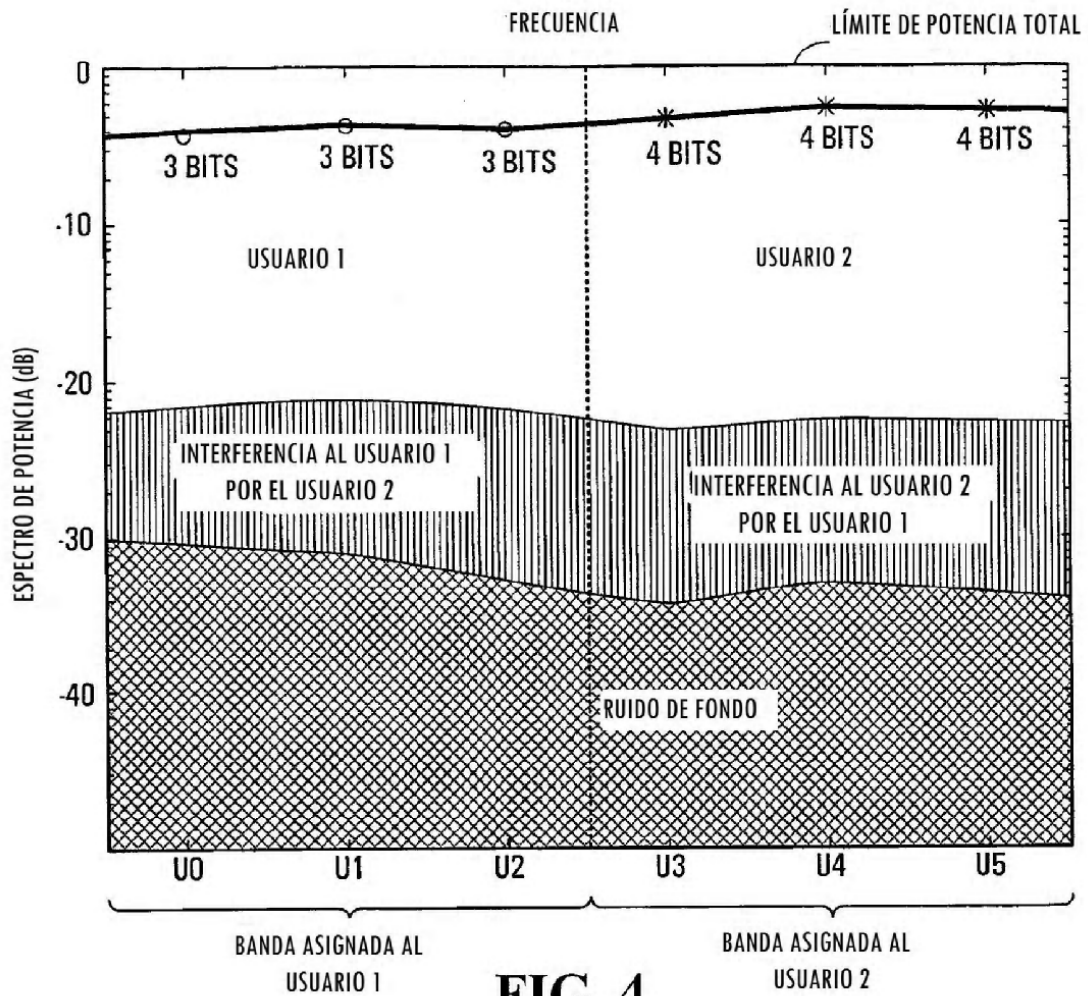


FIG. 4

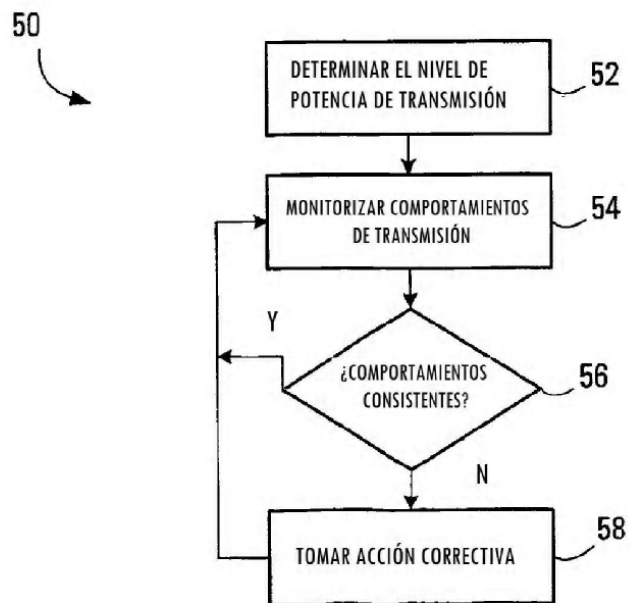


FIG. 5

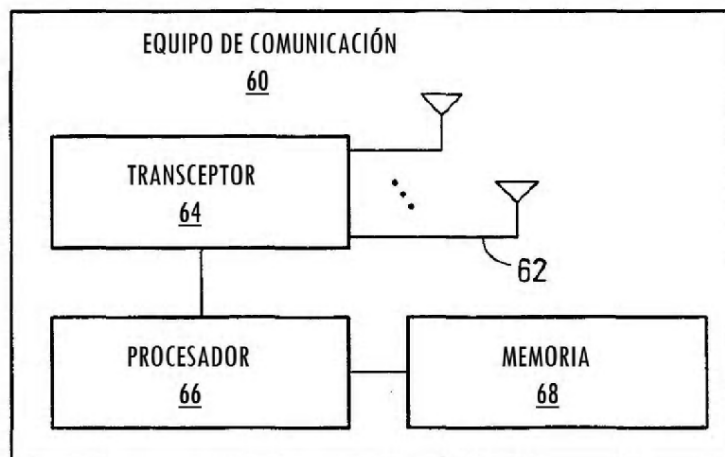


FIG. 6

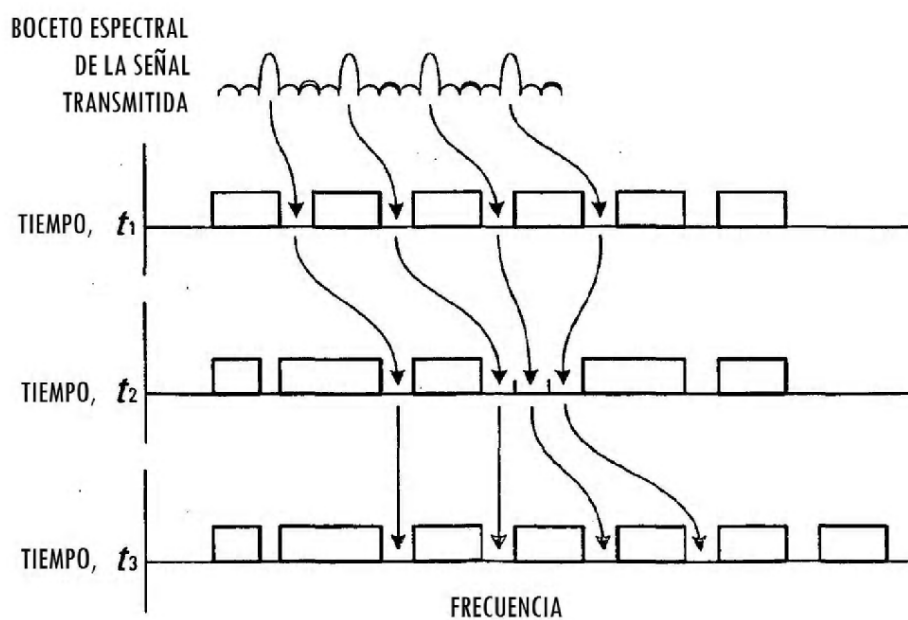


FIG. 7