

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 667 678**

51 Int. Cl.:

H04L 5/06 (2006.01)

H04L 27/36 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.07.2014 PCT/EP2014/064311**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.01.2016 WO16000787**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.07.2014 E 14735960 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.02.2018 EP 3164959**

54 Título: **Procedimientos, dispositivos y programas informáticos para compensar no linealidades de un canal de comunicación**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
14.05.2018

73 Titular/es:

**SES S.A. (100.0%)
Château de Betzdorf
6815 Betzdorf, LU**

72 Inventor/es:

**PIAZZA, ROBERTO;
MYSORE RAMA RAO, BHAVANI SHANKAR y
OTTERSTEN, BJORN**

74 Agente/Representante:

FÚSTER OLAGUIBEL, Gustavo Nicolás

ES 2 667 678 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

Procedimientos, dispositivos y programas informáticos para compensar no linealidades de un canal de comunicación

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a procedimientos, dispositivos y programas informáticos para compensar, al menos parcialmente, no linealidades de un canal de comunicación. La invención puede usarse en particular, pero no se limita a ello, en sistemas de comunicaciones por satélite, para compensar, al menos parcialmente, no linealidades de los canales de comunicación por satélite.

Antecedentes

15 Existe una necesidad constante, en telecomunicaciones, de proporcionar altas velocidades de transmisión de datos. Esta necesidad, junto con la demanda de conectividad ubicua, se ejemplifica en el contexto del suministro de conectividad a Internet de banda ancha por satélite. Por ejemplo, están proporcionándose satélites con cobertura de múltiples haces puntuales, como el satélite ViaSat-1, lanzado en 2011 y considerado uno de los satélites de comunicaciones de mayor capacidad, con un caudal de tráfico total de aproximadamente 140 Gbits/s.

20 Para satisfacer esta necesidad, se están investigando los cambios en la arquitectura de carga útil del satélite y la metodología de comunicación. La transición de sistemas de haz único a sistemas de múltiples haces es una prueba de lo anterior. Aunque están considerándose arquitecturas avanzadas de carga útil, también es útil abordar las técnicas de procesamiento digital basadas en transmisor y receptor que están usándose, particularmente con vistas a usar de manera eficiente el espectro electromagnético disponible, lo que es un recurso escaso.

25 Algunas técnicas de procesamiento digital basadas en transmisor y receptor están adaptadas específicamente para situaciones en las que se usa un único amplificador a bordo de un satélite para la amplificación de múltiples enlaces por satélite. Con el desarrollo de amplificadores de banda ancha, la amplificación conjunta de múltiples portadoras permite el ahorro de la masa de carga útil en comparación con el amplificador único tradicional por cada caso de enlace. El compartir la carga útil de satélite entre muchos enlaces reduce los costes y la complejidad del hardware, y también proporciona un grado de flexibilidad para los diseñadores de sistemas al disponer de una amplia gama de configuraciones (como, por ejemplo, el ancho de banda de las portadoras, el número de portadoras y la separación entre portadoras) sin requerir cambios a bordo del satélite.

35 Sin embargo, normalmente, una amplificación eficiente es una operación no lineal, y una amplificación conjunta de múltiples portadoras conduce a productos de intermodulación parásitos. Esto, combinado con el filtrado a bordo, conduce a distorsiones provocadas por símbolos de otras portadoras, es decir, interferencia de canal adyacente (ACI), o de la propia portadora, es decir, interferencia entre símbolos (ISI). Estas distorsiones pueden provocar una considerable degradación del rendimiento de enlace, incluso más en modulaciones de orden superior (espectralmente eficientes). En ausencia de técnicas de compensación, debe usarse una gran banda de guarda entre las portadoras y/o debe hacerse funcionar el amplificador en una región lineal. Lo primero da como resultado una segregación de portadoras de frecuencia ineficiente, mientras que lo segundo se traduce en una pérdida de potencia en comparación con las operaciones de portadora única dependiendo de las eficiencias espectrales de las portadoras individuales. El beneficio de la amplificación conjunta en cuanto a costes de misión se ve más que compensado por la pérdida de potencia y las eficiencias espectrales.

50 Para superar esta situación, se necesitan técnicas de mitigación y deben implementarse sobre el terreno, para proporcionar flexibilidad de actualización, mientras se mantiene intacta la complejidad de la carga útil. Las técnicas en el transmisor se denominan "distorsión previa", mientras que las del receptor se conocen como "ecualización" (EQ). Algunas técnicas de procesamiento digital en el terreno se usan para minimizar los efectos de ISI y ACI en un sistema de múltiples portadoras con amplificador de alta potencia (HPA) a bordo de un satélite transparente (o de tipo "tubo curvado" (*bent pipe*)). Los satélites transparentes reciben las señales que portan datos desde una o más pasarelas y luego las redireccionan hacia los receptores terrestres después de haber realizado la conversión de frecuencia y la amplificación, según sea necesario.

55 Las técnicas de portadora única no pueden usarse de manera sencilla en las técnicas de múltiples portadoras, debido al procesamiento conjunto en la pasarela y la ausencia de portadoras adyacentes en las técnicas de portadora única. En las técnicas de distorsión previa digital (DPD) de señales de múltiples portadoras, la técnica de compensación actúa sobre la superposición de las portadoras, antes de la transmisión por el canal de enlace ascendente al satélite. En técnicas DPD de datos de múltiples portadoras, el procesamiento se produce a nivel de portadora, antes de la conformación de impulsos, la conversión de frecuencia, la superposición de las portadoras y la transmisión por enlace ascendente al satélite. En ambas técnicas DPD de datos y señales de múltiples portadoras, no se requieren cambios en las funciones de los receptores y el transpondedor de satélite.

65 El documento de R. Piazza *et al*, "Multicarrier Digital Pre-distortion/Equalization Techniques for Non-linear Satellite Channels", Actas de la trigésima Conferencia Internacional de Sistemas de Satélites de Comunicaciones AIAA

(ICSSC-2012), Ottawa, Canadá, del 24 al 27 de septiembre de 2012, describe el uso de DPD y EQ como técnicas de mitigación en una situación de múltiples portadoras, es decir, una situación en la que se amplifican múltiples portadoras mediante un solo HPA.

5 El documento de N. Kelly *et al*, "Digital Predistortion Feasibility Studies for Multicarrier Satellite Communication Systems", Actas de la trigésimo primera Conferencia Internacional de Sistemas de Satélites de Comunicaciones AIAA (ICSSC-2013), Florencia, Italia, del 14 al 17 de octubre de 2013, describe la aplicabilidad de las técnicas DPD a la linealización de sistemas de comunicación por satélite de múltiples portadoras. El documento se centra en una técnica DPD de señales, que implica una distorsión previa aplicada después de combinar las múltiples portadoras en una única señal multiportadora.

15 El documento US 5.598.436 se refiere a la distorsión de una constelación de modulación en un sistema monoportadora (columna 1, líneas 64 a 67) y a la distorsión de una sola señal multiportadora OFDM en un sistema multiportadora (columna 2, líneas 30 a 33, figuras 9 y 11).

El documento de R. Piazza *et al*, "Data predistortion for multicarrer satellite channels using ortogonal memory polynomials", Taller Internacional del IEEE sobre Avances en el Procesamiento de Señales en Comunicaciones Inalámbricas (SPAWC), junio de 2013, páginas 689 a 693, se refiere a una técnica de mitigación de distorsiones en el transmisor (distorsión previa) basada en polinomios de memoria ortogonales.

20 Es deseable mejorar los procedimientos de la técnica anterior, teniendo en cuenta en particular el rendimiento del sistema, los requisitos de procesamiento, la complejidad y la robustez al ruido.

Sumario

25 Para cumplir o al menos cumplir parcialmente los objetivos mencionados anteriormente, se definen procedimientos, transmisores y programas informáticos según la invención en las reivindicaciones independientes. Se definen realizaciones particulares en las reivindicaciones dependientes.

30 En una realización, se lleva a cabo un procedimiento mediante un transmisor (denominado en lo sucesivo "transmisor de pasarela") para compensar, al menos parcialmente, las no linealidades de un canal de comunicación que comprende al menos un repetidor. En este procedimiento, una pluralidad de señales digitales se modulan en una pluralidad de portadoras respectivamente, y los símbolos del diagrama de constelación usados para la modulación de cada portadora se distorsionan según una función, denominada en lo sucesivo "función de distorsión previa". La pluralidad de señales digitales moduladas se somete después a multiplexación por división de frecuencia. La pluralidad sometida a multiplexación por división de frecuencia de señales digitales moduladas se envía para su transmisión, a través del canal de comunicación, a al menos un receptor. La función de distorsión previa implica una pluralidad de funciones polinómicas, tomando cada una como entrada los símbolos de todas las portadoras y denominándose los coeficientes de las funciones polinómicas en lo sucesivo "coeficientes de distorsión previa". Los coeficientes de distorsión previa se calculan según un enfoque de aprendizaje directo, en el que este cálculo se realiza conjuntamente para la pluralidad de portadoras y el cálculo comprende actualizar de manera iterativa los coeficientes de distorsión previa basándose en las señales recibidas que se retroalimentan desde al menos uno de entre el al menos un receptor al transmisor de pasarela.

45 El procedimiento permite mejorar el rendimiento de la compensación de no linealidades en un contexto multiportadora gracias a la mayor robustez al ruido de receptor. En particular, la distorsión previa llevada a cabo antes de la multiplexación junto con el uso de un procedimiento de aprendizaje directo proporciona un efecto sinérgico que va más allá de las técnicas conocidas en la técnica anterior. El procedimiento también requiere una arquitectura relativamente simple.

50 La invención también se refiere, en una realización, a un transmisor de pasarela para compensar, al menos parcialmente, las no linealidades de un canal de comunicación que comprende al menos un repetidor. El transmisor de pasarela comprende una unidad de modulación, una unidad de multiplexación y una unidad de envío. La unidad de modulación está configurada para modular una pluralidad de señales digitales en una pluralidad de portadoras, respectivamente, en la que, en funcionamiento, los símbolos del diagrama de constelación usados para la modulación de cada portadora se distorsionan de acuerdo con una función de distorsión previa. La unidad de multiplexación está configurada para la multiplexación por división de frecuencia de las señales digitales moduladas. La unidad de envío está configurada para enviar la pluralidad sometida a multiplexación por división de frecuencia de señales digitales moduladas para la transmisión, a través del canal de comunicación, hasta al menos un receptor. La función de distorsión previa usada en el transmisor de pasarela implica una pluralidad de funciones polinómicas, tomando cada una como entrada los símbolos de todas las portadoras. Los coeficientes de las funciones polinómicas se denominan "coeficientes de distorsión previa". Se calculan según un enfoque de aprendizaje directo, realizándose el cálculo conjuntamente para la pluralidad de portadoras y comprendiendo el cálculo actualizar de manera iterativa los coeficientes de distorsión previa basándose en las señales recibidas que se retroalimentan desde al menos uno de entre el al menos un receptor al transmisor de pasarela.

La invención también se refiere, en una realización, a un sistema que comprende un transmisor de pasarela, tal como se describió anteriormente, y a uno o más repetidores en un canal de comunicación tal como se describió anteriormente.

5 La invención se refiere además a programas informáticos, productos de programa informático y medios de almacenamiento que comprenden instrucciones legibles por ordenador configuradas, cuando se ejecutan en un ordenador, para hacer que se lleven a cabo las etapas del procedimiento descrito anteriormente, o que se implementen funciones del transmisor de pasarela descrito anteriormente.

10 En una realización, un programa informático comprende instrucciones legibles por ordenador configuradas, cuando se ejecutan en un ordenador, para hacer que se determinen coeficientes de distorsión previa implicados en una función de distorsión previa para su uso en la distorsión de símbolos de cada uno de los diagramas de constelación usados para la modulación de, respectivamente, una pluralidad de portadoras que portan una pluralidad de señales digitales. La distorsión es adecuada, en un transmisor de pasarela, para compensar, al menos parcialmente, las no linealidades de un canal de comunicación que comprende al menos un repetidor. Además, la distorsión se lleva a cabo antes de la multiplexación por división de frecuencia de las señales digitales moduladas, y antes de enviar las señales multiplexadas para la transmisión, a través del canal de comunicación, hasta al menos un receptor. La función de distorsión previa implica una pluralidad de funciones polinómicas, tomando cada una como entrada los símbolos de todas las portadoras, siendo los coeficientes de las funciones polinómicas los coeficientes de distorsión previa mencionados anteriormente. Los coeficientes de distorsión previa se calculan según un enfoque de aprendizaje directo, realizándose dicho cálculo conjuntamente para la pluralidad de portadoras y comprendiendo dicho cálculo actualizar de manera iterativa los coeficientes de distorsión previa basándose en señales recibidas que se retroalimentan desde al menos uno de entre el al menos un receptor.

25 **Breve descripción de los dibujos**

Se describirán ahora realizaciones de la presente invención, junto con las figuras adjuntas, en las que:

30 la figura 1 ilustra esquemáticamente, para comprender el contexto en el que pueden ponerse en práctica algunas realizaciones de la invención, un posible modelo de una trayectoria entre un transmisor de pasarela y receptores en un sistema de comunicación por satélite;

35 las figuras 2 a 6 se refieren a un sistema de portadora única, descrito para introducir conceptos útiles para entender algunas realizaciones de la invención;

las figuras 7 a 9c se refieren a un sistema de múltiples portadoras, también descrito para introducir conceptos útiles para comprender algunas realizaciones de la invención;

40 la figura 10a ilustra esquemáticamente un procedimiento y sistema, en una realización de la invención, en los que se realiza una distorsión previa modulando las señales digitales;

la figura 10b ilustra esquemáticamente un procedimiento y sistema, en una realización de la invención, en los que se realiza una distorsión previa después de modular las señales digitales;

45 la figura 11 ilustra esquemáticamente un procedimiento y sistema en una realización de la invención;

la figura 12 es un diagrama de flujo de un procedimiento en una realización de la invención;

50 las figuras 13 y 14 son diagramas de flujo de partes del procedimiento ilustrado en la figura 12;

las figuras 15 a 18 comparan el rendimiento de diferentes técnicas;

55 las figuras 19a y 19b ilustran un procedimiento en una realización de la invención, que implica el almacenamiento en memoria intermedia de paquetes en el transmisor de pasarela, y el uso de identificadores de paquete, para actualizar los coeficientes de distorsión previa;

la figura 20 ilustra esquemáticamente una implementación a modo de ejemplo de un ordenador que puede usarse en algunas realizaciones de la invención; y

60 la figura 21 ilustra esquemáticamente un transmisor de pasarela en una realización de la invención.

Descripción detallada

65 La presente invención se describirá ahora junto con realizaciones específicas. Estas realizaciones específicas sirven para proporcionar una mejor comprensión al experto en la técnica, pero no están destinadas a restringir de ninguna manera el alcance de la invención, que se define por las reivindicaciones adjuntas. Una lista de abreviaturas y su

significado se proporcionan al final de la descripción detallada.

La figura 1 ilustra esquemáticamente, para comprender el contexto en el que pueden ponerse en práctica algunas realizaciones de la invención, un posible modelo de una trayectoria entre un transmisor (“transmisor de pasarela”) y receptores en una comunicación por satélite transparente. Las entidades implicadas son (i) el transmisor de pasarela, (ii) un transpondedor de banda ancha de satélite que incluye un filtro de multiplexación de entrada (IMUX), un HPA y un filtro de multiplexación de salida (OMUX) y (iii) los receptores. Los filtros IMUX se usan para rechazar las señales fuera de banda e impedir que entre ruido en la cadena de satélites. El filtro OMUX rechaza los espectros fuera de banda provocados por la amplificación no lineal para reducir la interferencia entre haces. Las características de filtros IMUX y OMUX a modo de ejemplo, que pueden usarse en aplicaciones espaciales, se describen en el documento titulado “IMUX & OMUX” del sitio web de Thales Group disponible en la URL https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/Imux_Omux.pdf (recuperado el 21 de mayo de 2014).

Amplificadores de tubo de onda progresiva (TWTA) pueden usarse, por ejemplo, como un HPA a bordo y son intrínsecamente no lineales. Los TWTA pueden usarse en la denominada banda K_a (26,5-40 GHz), por ejemplo.

Las figuras 2 a 6 se refieren a un sistema de amplificación de portadora única, que se describe en el presente documento para introducir algunos conceptos que pueden ser útiles para comprender algunas realizaciones de la invención.

La figura 2 ilustra esquemáticamente un sistema de portadora única, en el que u_m es la portadora, p_m es una función de filtro de conformación de impulso predefinida, f_m representa el proceso de convertir las señales de la banda base a la banda de paso (en la pasarela) y de la banda de paso a la banda base (en los receptores RX_m) y η es el ruido de receptor. Aunque η se denomina en el presente documento ruido de receptor, el enlace ascendente y el transpondedor también contribuyen, en menor medida, al ruido. La figura 3 ilustra, en una situación de transmisión de portadora única, la posición de la portadora (marcada como “C”) con respecto a la respuesta de frecuencia de IMUX/OMUX a bordo (marcada como “IMUX”). La figura 4 representa 10000 símbolos recibidos recogidos después de transmitir tal número de símbolos desde la pasarela usando una constelación de modulación 16-aria por desplazamiento de fase y amplitud (APSK). Los pequeños símbolos de color blanco y en forma de estrella de cinco puntas de la figura 4 corresponden a los símbolos transmitidos originales, mientras que los puntos negros representan los símbolos recibidos. La figura 4 muestra las distorsiones introducidas por el canal de satélite: (i) agrupamiento debido a ISI y (ii) deformación, es decir, los centroides de los grupos no coinciden con la constelación transmitida.

Para realizar una compensación minimizando la distorsión en el caso de una portadora única y, por tanto, para mejorar el rendimiento, pueden proporcionarse distorsión previa en el transmisor y ecualización en el receptor. La figura 5 ilustra esquemáticamente una implementación a modo de ejemplo de un sistema de portadora única en el que se lleva a cabo la DPD de datos junto con un ecualizador (EQ) de símbolos espaciados. Para implementar la DPD de datos, pueden usarse diferentes técnicas, incluyendo:

- Técnicas basadas en modelos: La DPD de datos se modela implementando una función compleja de los símbolos de entrada. La función tiene varios parámetros que están optimizados para minimizar las distorsiones. Algunos aspectos en tales arquitecturas son:
 - o Elección de la función: pueden usarse, por ejemplo, la serie de Volterra, polinomios de memoria y polinomios de memoria ortogonales.
 - o Técnica para optimizar los parámetros de la función: Este proceso, también denominado “aprendizaje” o “entrenamiento”, permite la estimación de los coeficientes de los polinomios mencionados anteriormente, por ejemplo. En ese sentido, puede usarse un procedimiento de aprendizaje directo o indirecto. Estos procedimientos de aprendizaje se describen con más detalle a continuación.
- Procedimiento de tabla de consulta: se usa un procesamiento fuera de línea para generar una tabla de consulta para determinar la salida para diferentes combinaciones de entrada. Por ejemplo, puede usarse una tabla de 16x16 para una constelación de 16 APSK para un sistema simple cuya característica es independiente de la frecuencia. En sistemas con características dependientes de la frecuencia, pueden requerirse tablas mucho más grandes.

A continuación se describen procedimientos de aprendizaje directo e indirecto.

En una técnica de aprendizaje indirecto, se diseña un ecualizador en lugar de un aparato de distorsión previa. De manera ideal, la compensación previa y la compensación posterior logran objetivos similares y, por tanto, la obtención de un ecualizador que tiene el mismo modelo que el elemento de distorsión previa sería tan bueno como obtener el elemento de distorsión previa *per se*. Esta idea es particularmente atractiva ya que los parámetros pueden

hallarse en el receptor y luego transferirse al transmisor para usarlos como elemento de distorsión previa. Otra forma de implementar un procedimiento de aprendizaje indirecto puede ser retroalimentar la señal recibida de vuelta al transmisor y realizar el cálculo allí. El cálculo que se realiza es el mismo, pero la ubicación donde se realiza el cálculo puede ser o bien en el lado del transmisor o bien en el lado del receptor. Si bien el proceso tiene un sólido respaldo teórico en el caso ideal, los inventores han reconocido en particular que los procedimientos de aprendizaje indirecto son sensibles al ruido en el receptor, por lo que la compensación previa y la compensación posterior no son, de hecho, iguales.

En una técnica de aprendizaje directo, la estimación de los parámetros de modelo se realiza en el transmisor junto con el receptor. Los datos recibidos se alimentan desde el receptor al transmisor y basándose en un proceso de actualización iterativo, los modelos de elemento de distorsión previa se modifican para reducir la disimilitud entre los símbolos transmitidos y los recibidos. Puesto que el transmisor tiene acceso a los símbolos transmitidos, puede hallarse fácilmente una medida de disimilitud una vez que se reciba la retroalimentación. Esta técnica de aprendizaje es robusta, especialmente porque tiene en cuenta el ruido de receptor (ya que la retroalimentación contiene ruido), pero requiere retroalimentación desde el receptor.

La figura 6 ilustra, en comparación con la figura 4, la mejora de rendimiento obtenida mediante un elemento de distorsión previa basado en polinomios de memoria que tiene seis parámetros obtenidos mediante aprendizaje indirecto. En comparación con la figura 4, el diagrama de dispersión refleja mejor los puntos transmitidos, y muestra que la técnica DPD reduce la degradación de señal y ahorra energía a bordo del satélite (siendo la energía un recurso escaso a bordo).

Las figuras 7, 8, 9a, 9b y 9c se refieren a un sistema de amplificación de múltiples portadoras, que se describe en el presente documento para introducir algunos conceptos que pueden ser útiles para comprender algunas realizaciones de la invención.

La figura 7 ilustra esquemáticamente un sistema de múltiples portadoras, con filtrado y amplificación conjuntos a bordo del satélite, en el que u_1, \dots, u_M son los símbolos en las portadoras, p_1, \dots, p_m son funciones de filtro de conformación de impulso predefinidas, f_1, \dots, f_m representan el proceso de convertir las señales de la banda base a la banda de paso (en la pasarela) y de la banda de paso a la banda base (en los receptores RX_1, \dots, RX_M), y η es el ruido de receptor (que puede incluir contribuciones de ruido tanto del enlace ascendente como del transpondedor, tal como se mencionó anteriormente). En este sistema, se obtiene una señal de enlace ascendente en la pasarela mediante la superposición de múltiples portadoras moduladas en frecuencia que portan los símbolos $u_1, \dots, u_m, \dots, u_M$. Las funciones $p_1, \dots, p_m, \dots, p_M$ indican los filtros de conformación de impulso predefinidos. Normalmente, son filtros de coseno alzado en raíz cuadrada con una disminución progresiva de frecuencia elegida. De manera posterior a la conformación de impulsos, las portadoras i -ésimas se modulan a las frecuencias apropiadas usando la función f_i . La señal de enlace ascendente se obtiene después mediante la superposición de las salidas de $f_1, \dots, f_m, \dots, f_M$. En lugar de tener un transpondedor de satélite que da servicio a una portadora, el transpondedor es compartido por múltiples portadoras, lo que implica, entre otras cosas, el filtrado conjunto en un IMUX, la amplificación conjunta en un HPA y el filtrado conjunto en un OMUX. La señal de enlace descendente se corrompe por el ruido de receptor η y se recibe en los receptores $RX_1, \dots, RX_m, \dots, RX_M$. En este caso, RX_m recibe la portadora "m" y realiza la conversión de frecuencia usando la función f_m . El flujo sometido a conversión descendente se filtra entonces usando el filtro de conformación de impulso p_m .

La figura 8 ilustra, en una situación de transmisión de múltiples portadoras, la posición de las portadoras (marcadas como "C1", "C2" y "C3") con respecto a la respuesta de frecuencia de IMUX/OMUX a bordo (marcada como "IMUX"), donde se usa el mismo filtro IMUX / OMUX que para la figura 3.

Las figuras 9a, 9b y 9c representan, respectivamente para las portadoras C1, C2 y C3, los símbolos recibidos recogidos después de transmitir aproximadamente 10000 símbolos de constelaciones de 16 APSK. Los símbolos en forma de estrella de cinco puntas de las figuras 9a, 9b y 9c corresponden a los símbolos transmitidos originales, mientras que los asteriscos más pequeños de ocho puntas representan los símbolos recibidos, después de la distorsión provocada por el canal de satélite. Además de los efectos observados en la figura 4, las gráficas de las figuras 9a, 9b y 9c muestran un aumento del nivel de distorsión que surge de la ACI provocada por múltiples portadoras. La no linealidad crea un excedente del contenido de frecuencia más allá del ancho de banda nominal, lo que provoca interferencia a otras portadoras. Tal efecto no estaba presente en la portadora única. El efecto de ACI es más pronunciado para la portadora central (figura 9b) que para las externas (figuras 9a y 9c).

La situación ilustrada por la figura 7 implica una transmisión de pasarela, en el canal de enlace ascendente, al satélite, amplificándose muchas portadoras mediante un solo HPA a bordo del satélite. En una implementación a modo de ejemplo de esta situación, cada portadora es una forma de onda DVB-S2 en la banda K_a . Por ejemplo, cada portadora puede representar un canal de televisión. En servicios de recepción directa por el telespectador (DTH), los usuarios finales generalmente son receptores-decodificadores integrados (IRD). Normalmente, estos receptores decodifican solamente una portadora en particular: esto obedece a las consideraciones de complejidad y las restricciones de acceso. A corto y a medio plazo, una estrategia atractiva es el uso continuado de dichos receptores capaces de decodificar una portadora única. Además, tal como se describirá más adelante, técnicas de

compensación efectivas deben procesar las portadoras conjuntamente. Esto garantiza que la mayor parte de la mitigación se lleve a cabo en la pasarela.

5 La figura 10a ilustra esquemáticamente un procedimiento (y sistema) en una realización de la invención, en el que se realiza la distorsión previa cuando se modulan las señales.

El procedimiento se lleva a cabo mediante un transmisor de pasarela 400 para compensar, al menos parcialmente, las no linealidades de un canal de comunicación 500. El término "pasarela" se usa cuando el transmisor constituye un punto de entrada al canal de comunicación 500.

10 El canal de comunicación 500 comprende al menos un repetidor 510. Dicho de otro modo, al menos un dispositivo de repetición intermedio o relé de comunicación está dispuesto en el canal de comunicación 500. El/los repetidor(es) 510 puede(n) comprender, por ejemplo, un transpondedor a bordo de un satélite (no ilustrado en la figura 10a) que recibe señales de un transmisor de pasarela 400 en tierra. Tal transpondedor puede comprender, en particular, un filtro IMUX, un amplificador (como, por ejemplo, un HPA) y/o un filtro OMUX. Tal transpondedor puede ser un transpondedor de banda ancha (por ejemplo, 500 MHz) que permite el procesamiento de múltiples portadoras.

15 En una realización particular, el canal de comunicación 500 comprende un único repetidor 510 (tal como se ilustra en las figuras 10a y 10b), que puede ser, por ejemplo, un transpondedor de satélite. En otra realización particular (no ilustrada en los dibujos), más de un repetidor están dispuestos en el canal de comunicación 500.

20 El/los repetidor(es) 510 puede(n) ser otros tipos de relé(s) de comunicación, tales como repetidores de microondas en tierra. La invención no solo puede aplicarse a sistemas de comunicación por satélite, sino que puede usarse en otros sistemas tales como sistemas de comunicación por microondas o sistemas de comunicación por fibra óptica. El/los repetidor(es) 510 no está(n) ubicado(s) conjuntamente con el transmisor de pasarela 400, sino que está(n) ubicado(s) de manera remota lejos del transmisor de pasarela 400 para extender la comunicación a una mayor distancia y/o evitar un obstáculo. Para hacerlo, el/los repetidor(es) 510 recibe(n) las señales de comunicación y emite(n) señales amplificadas correspondientes. En ese sentido, el/los repetidor(es) puede(n) considerarse repetidor(es) remoto(s), es decir, remoto(s) con respecto al transmisor de pasarela 400.

25 El procedimiento comprende modular s10 una pluralidad de señales digitales en una pluralidad de portadoras, respectivamente. Tras la modulación s10, los símbolos del diagrama de constelación usados en la modulación de cada portadora se distorsionan según una función de distorsión previa. Esta distorsión a nivel de símbolo es intencionada y pretende aliviar los efectos adversos de las no linealidades del canal de comunicación 500 en las señales, a fin de aumentar en última instancia la ganancia (en potencia y/o eficiencia espectral) del sistema de comunicación. Las señales digitales pueden ser, por ejemplo, pero no limitarse a, señales de difusión de TV. La velocidad de símbolos, es decir, la velocidad a la que la modulación emite los símbolos y la velocidad de bits, es decir, la velocidad de llegada de la secuencia de bits en la entrada de la modulación (velocidad de símbolos X número de bits por símbolo), pueden seleccionarse basándose en diversas condiciones. La invención no está limitada por la velocidad de símbolos y la velocidad de bits.

30 La pluralidad de portadoras a las que se hace referencia en la etapa de modulación s10 puede ser una representación de banda base de las portadoras, es decir, antes de cualquier conversión de frecuencia a frecuencia intermedia (IF) o radiofrecuencia (RF).

35 El/los esquema(s) de modulación usado(s) en la etapa s10 puede(n) comprender, pero sin limitarse a, al menos uno de QPSK, BPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK, 64APSK, 128APSK y 256APSK. Un modulador a modo de ejemplo que puede usarse en la etapa s10 es el modulador de satélite de difusión Newtec M6100 (véase la página <http://www.newtec.eu/product/m6100-broadcast-satellite-modulator>, consultada el 7 de junio de 2014).

40 La pluralidad de señales digitales moduladas se somete entonces a multiplexación por división de frecuencia s20. Esto se produce después de la modulación s10 y de la distorsión previa. Por ejemplo, la multiplexación s20 puede realizarse desplazando la frecuencia de cada una de las señales moduladas y luego sumando las señales desplazadas en frecuencia (véase en este sentido, por ejemplo, la figura 11). La multiplexación puede realizarse, por ejemplo, en la banda base.

45 Todavía con referencia a la figura 10a, la pluralidad de señales digitales moduladas, después de haberse sometido a multiplexación por división de frecuencia s20, se envían s30 para su transmisión (usando, por ejemplo, un amplificador y, para una interfaz de radio, una antena o una red de antenas), a través del canal de comunicación 500, a al menos un receptor 600. Puede haber un receptor 600 (comunicación uno a uno) o una pluralidad de receptores 600 (comunicación uno a muchos). En el sistema multiportadora, los receptores normales (es decir, a excepción de los receptores dedicados tal como se explica a continuación) están diseñados normalmente solo para el funcionamiento de portadora única, descartando todas las portadoras, excepto una.

50 La función de distorsión previa mencionada anteriormente implica una pluralidad de funciones polinómicas. Cada una de las funciones polinómicas toma como entrada los símbolos de todas las portadoras. Los coeficientes de las

funciones polinómicas se denominan en el presente documento “coeficientes de distorsión previa”. Dicho de otro modo, la distorsión previa aplicada a cada portadora se basa, respectivamente, en una o más funciones polinómicas que toman como entrada todos los símbolos de portadora (tal como se ilustra esquemáticamente mediante las flechas que llegan, en su lado izquierdo, a la casilla marcada como “Cálculo de los coeficientes de distorsión previa” en la figura 10a), siendo el conjunto de coeficientes de todas las funciones polinómicas los coeficientes de distorsión previa. Las funciones polinómicas pueden ser una suma ponderada de ciertos productos de las entradas (los símbolos de las diferentes portadoras), de modo que la función de distorsión previa es una función no lineal de las entradas. Los pesos son los coeficientes de distorsión previa.

Las funciones polinómicas toman como entrada los símbolos extraídos de la representación compleja de valores en el diagrama de constelación que se usa para la modulación. Si, por ejemplo, pueden representarse 16 valores en el diagrama de constelación, se eligen 4 bits a la vez que conducen a 16 valores posibles; cada valor se correlaciona con un punto de constelación en el plano complejo. La correlación de los valores con los puntos de la constelación es definida por el operador ya que se necesita la misma correlación en el receptor, y la función de distorsión previa usa estos símbolos.

La función de distorsión previa y los coeficientes de distorsión previa usados en un punto en el tiempo en la función forman un modelo de elemento de distorsión previa dirigido a invertir el modelo de canal, que representa la naturaleza de la no linealidad del canal.

La pluralidad de funciones polinómicas pueden ser tales que, para cada portadora, solo una de las funciones polinómicas se usa para distorsionar símbolos del diagrama de constelación usado para la modulación de esa portadora. Dicho de otro modo, en tal caso, la función de distorsión previa implica funciones polinómicas y cada una de las funciones polinómicas genera símbolos con distorsión previa aplicables a una portadora. En tal caso, cada portadora tiene sus propios coeficientes de distorsión previa (de modo que los parámetros de distorsión previa pueden variar a través de las portadoras). En una implementación, la función de distorsión previa, que toma como entrada los símbolos de todas las portadoras, puede definirse matemáticamente como $f(x)$, es decir, $f(x)$ es la función de distorsión previa que toma los símbolos de todas las portadoras. Entonces, $f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)]$, donde $f_i(x)$ es la función polinómica para la portadora “i” que toma la entrada de todas las portadoras. Cada $f_i(x)$ es una función polinómica en todos los símbolos de las portadoras, mientras que $f(x)$ es una colección de estas funciones y puede ser, por ejemplo, una función “vectorial”, es decir, un vector de funciones polinómicas. Dicho de otro modo, en esta implementación, los coeficientes de distorsión previa de todas las portadoras pueden apilarse en un vector grande, obteniéndose este vector mediante un cálculo conjunto. Una vez que se obtiene el vector, se leen de las posiciones apropiadas los coeficientes de distorsión previa aplicables a una portadora “i” particular. Por ejemplo, la primera portadora puede tener sus coeficientes de distorsión previa en los L primeros sitios, la siguiente portadora en las L posiciones siguientes, etcétera.

Sin embargo, la invención no se limita al caso de una función polinómica por portadora. Pueden usarse, por ejemplo, dos o más funciones polinómicas para una portadora, o puede usarse una función polinómica para más de una portadora.

Los coeficientes de distorsión previa pueden ser coeficientes complejos (algunos coeficientes podrían tener solo partes reales, algunos solo partes imaginarias y otros ambas partes). El procesamiento de banda base conlleva coeficientes complejos.

Los coeficientes de distorsión previa se calculan, es decir, se estiman, según un enfoque de aprendizaje directo.

Supongamos que $f(x)$ representa el canal y x la señal de entrada. Entonces, en un procedimiento de aprendizaje directo, el objetivo es estimar $f^{inversa}()$ de modo que $f(f^{inversa}(x))$ sea lo más próximo posible a x . Por el contrario, en un procedimiento de aprendizaje indirecto, el objetivo es estimar $f^{inversa}()$ de modo que $f^{inversa}(f(x))$ sea lo más próximo posible a x . En el procedimiento de aprendizaje indirecto, los coeficientes se calculan durante la fase de aprendizaje como si fueran a usarse para la compensación posterior en el receptor (de hecho, la función de canal $f(x)$ se aplica primero, luego la función inversa $f^{inversa}()$). El procedimiento de aprendizaje indirecto es sensible al ruido de receptor. El procedimiento de aprendizaje directo es más ventajoso. Un procedimiento de aprendizaje indirecto se basa en la suposición de que la compensación antes del canal con no linealidades tenga los mismos efectos que la compensación después del canal con no linealidades. Esta suposición no es válida en presencia de ruido de receptor y realizar esta suposición puede conducir a un escaso rendimiento.

El aprendizaje directo, en comparación con el aprendizaje indirecto, se describe, por ejemplo, en el documento de D. Zhou y V. E. DeBrunner, “Novel adaptive nonlinear predistorters based on the direct learning algorithm”, Actas del IEEE sobre el Procesamiento de Señales, vol. 55, n.º 1. págs. 120 a 133, enero de 2007 (que muestra, en particular, que la compensación previa y la compensación posterior no son idénticas para los casos de portadora única), y en el documento de M. Abi Hussein, V.A. Bohara, y O. Venard, “On the system level convergence of ILA and DLA for digital predistortion,” en Sistemas de Comunicaciones Inalámbricas (ISWCS), Simposio Internacional celebrado en agosto de 2012, págs. 870 a 874.

El enfoque de aprendizaje directo puede emplear, por ejemplo, pero sin limitarse a, un filtro de mínimos cuadrados recursivos (RLS) o filtro de mínimos cuadrados promediados (LMS). También pueden contemplarse variantes de LMS y RLS.

5 El cálculo de los coeficientes de distorsión previa se realiza conjuntamente para la pluralidad de portadoras, en lugar de realizar una distorsión previa monoportadora aplicada de manera independiente a cada portadora. Un cálculo conjunto de los coeficientes de distorsión previa no implica necesariamente un uso conjunto de los coeficientes de distorsión previa, tal como se comentó anteriormente. El cálculo conjunto permite generar términos que pueden usarse para minimizar la interferencia entre portadoras de la señal multiportadora.

10 El cálculo de los coeficientes de distorsión previa comprende actualizar de manera iterativa los coeficientes de distorsión previa basándose en señales recibidas que se retroalimentan desde al menos uno de entre el al menos un receptor 600 al transmisor de pasarela 400. Puede haber, por ejemplo, un receptor dedicado 600 capaz de proporcionar la retroalimentación, con una multitud de receptores “normales” 600 que no proporcionan ninguna retroalimentación. Un receptor dedicado 600 puede tener, opcionalmente, una antena más grande que los receptores “normales”, permitiendo así una mejor recepción (menor ruido). Un receptor dedicado 600 también puede ser capaz, opcionalmente, de detectar múltiples señales de portadora, mientras que los receptores “normales” están diseñados normalmente para el funcionamiento de portadora única.

20 En una realización particular, el receptor dedicado 600 está ubicado en el transmisor de pasarela 400, lo que facilita por tanto la implementación de retroalimentación. Sin embargo, la invención no está limitada por el tipo de medio de retroalimentación que se usa. Cualquier medio y/o canal puede usarse para alimentar las señales recibidas desde cualquier número de receptores 600 de vuelta al transmisor de pasarela 400. La retroalimentación puede ser, por ejemplo, a través del canal de comunicación 500 pero en el otro sentido (es decir, hacia el transmisor de pasarela 400), o a través de cualquier otro canal, como, por ejemplo, un enlace terrestre (a través de, por ejemplo, fibras ópticas).

30 Los coeficientes de distorsión previa se actualizan basándose en señales recibidas que se retroalimentan al transmisor de pasarela 400. En particular, una copia de los símbolos de datos recibidos puede compararse, por ejemplo, con los símbolos de datos transmitidos correspondientes. Los coeficientes se cambian de tal manera que (es decir, en el sentido de que) se minimicen las diferencias entre la señal transmitida y la señal recibida. Los coeficientes de distorsión previa se actualizan en la función de distorsión previa, por ejemplo, después de comparar la copia de la señal digital recibida y la señal digital correspondiente que se había transmitido. Se repite el proceso de “comparación → minimización → actualización de coeficientes” para mejorar los coeficientes de distorsión previa.

35 La realización descrita anteriormente, que implica distorsión previa de múltiples portadoras llevada a cabo antes de la multiplexación (es decir, una técnica DPD de datos, en lugar de una técnica DPD de señales) junto con el uso de un procedimiento de aprendizaje directo para calcular los coeficientes de distorsión previa, en un proceso iterativo de bucle cerrado, proporciona una mejora del rendimiento gracias a la mayor robustez al ruido de receptor. En particular, las no linealidades potencialmente significativas inducidas por la existencia, en el canal de comunicación 500, del/de los repetidor(es) 510 (tal como, por ejemplo, pero sin limitarse a, un transpondedor a bordo de un satélite), diseñado(s) para manipular (filtrar, amplificar, etc.) señales multiportadora, hacen que el uso del procedimiento sea particularmente útil y esté justificado. En cuanto al ejemplo de un repetidor que es un transpondedor a bordo de un satélite, el interés no es sólo compensar las no linealidades del amplificador, sino también las introducidas por los filtros a bordo. Las medidas de distorsión previa realizadas en el transmisor de pasarela 400 pueden usarse para compensar conjuntamente estas diversas no linealidades.

50 La figura 10b ilustra esquemáticamente un procedimiento (y sistema) en una realización de la invención, que difiere del procedimiento (y sistema) de la figura 10a en que la distorsión previa se realiza después de modular las señales digitales (es decir, el elemento de distorsión previa está ubicado después del modulador en la cadena de procesamiento). En general, la modulación puede estar seguida por tanto por la distorsión previa (figura 10b) o la distorsión previa puede producirse cuando se realiza la modulación (figura 10a). Ambas realizaciones proporcionan ventajas similares.

55 En una realización, antes de que estén disponibles señales de retroalimentación recibidas, los coeficientes de distorsión previa se establecen como si el canal de comunicación 500 tuviese una ganancia lineal, siendo el factor de ganancia la unidad. Esto proporciona un proceso de inicialización simple.

60 En una realización, antes de que estén disponibles señales de retroalimentación recibidas, los coeficientes de distorsión previa se establecen basándose en los parámetros de modelo de canal obtenidos de antemano a través de al menos una de las pruebas, simulaciones y estudios llevados a cabo en, o con respecto a, un canal de comunicación 500 y/o al menos uno de entre el al menos un repetidor 510. Esto permite proporcionar valores iniciales para configurar el procedimiento. Por ejemplo, si el repetidor es un transpondedor de satélite, pueden llevarse a cabo pruebas, simulaciones y/o estudios en tierra en el transpondedor de satélite sin la necesidad de realmente someter a prueba el canal de comunicación completo. Los valores iniciales pueden basarse en la información proporcionada por el fabricante con respecto al transpondedor de satélite. Hay varios modos según los

cuales puede obtenerse un modelo de canal para deducir en última instancia valores iniciales adecuados.

En una realización, las señales digitales de entrada (es decir, las señales que se someten a modulación) están originalmente en forma de paquetes. A cada uno de los paquetes se les asigna un identificador de paquete, y se almacenan, es decir, se almacenan en memoria intermedia, en el transmisor de pasarela 400 junto con sus identificadores de paquete, después de haberse transmitido. Las señales de retroalimentación recibidas también están en forma de paquetes o reorganizadas, mediante el transmisor de pasarela 400, en forma de paquetes. Si el receptor de donde se origina la retroalimentación está ubicado junto con el transmisor de pasarela 400, la transmisión de la señal de retroalimentación puede producirse, por ejemplo, en un bus. En tal caso, puede ser innecesario someter las señales a modulación para obtener retroalimentación. El cálculo de los coeficientes de distorsión previa implica comparar el contenido de los paquetes de las señales de retroalimentación recibidas con el contenido de los paquetes almacenados en memoria intermedia para estimar la tasa de errores provocada por el canal de comunicación 500. El uso de identificadores de paquetes se describirá adicionalmente con referencia en particular a la figura 19a.

Sin embargo, el uso de identificadores de paquetes no es esencial. Pueden usarse otros mecanismos en su lugar, tales como un mecanismo de retardo (véase, por ejemplo, el documento WO 2006/031156, figura 2, "retardo" 6). El uso de identificadores de paquetes es un mecanismo simple para obtener la información requerida para calcular los coeficientes de distorsión previa.

En una realización, se requiere información de retroalimentación acerca de las señales recibidas en todas las portadoras activas para activar el proceso de cálculo de los coeficientes de distorsión previa.

A continuación se hace referencia a la figura 11, que ilustra esquemáticamente un procedimiento y sistema en una realización de la invención. La arquitectura de la figura 11 es similar a la de la figura 7, excepto en que se aplica DPD de datos a todos los símbolos de entrada $u_1 \dots u_m \dots u_M$ en las portadoras. Los datos acerca de las portadoras con distorsión previa $x_1 \dots x_m \dots x_M$ se someten a conformación de pulsos mediante las funciones $p_1 \dots p_m \dots p_M$ respectivamente, y después a conversión de frecuencia mediante $f_1 \dots f_m \dots f_M$ (respectivamente) antes de superponerse y transmitirse por enlace ascendente. Las salidas de receptor $y_1, \dots, y_m, \dots, y_M$ se retroalimentan al DPD en el transmisor de pasarela 400.

La función de distorsión previa puede funcionar en tiempo real en el transmisor de pasarela 400. Los casos esporádicos de retroalimentación los proporcionan uno o más receptores 600 para actualizar los coeficientes de distorsión previa de la función de distorsión previa.

La figura 12 es un diagrama de flujo de un procedimiento en una realización de la invención, que puede describirse de la siguiente manera:

- Etapa 100: El vector de parámetros de canal se inicializa para la identidad (canal con ganancia unitaria).
- Etapa 110: Los parámetros del elemento de distorsión previa (es decir, los coeficientes de distorsión previa) se inicializan para la función de identidad (una función con ganancia unitaria).
- Etapa 120: Pueden crearse dos procesos que pueden ejecutarse en paralelo e independientemente entre sí. El primero sirve para estimar en segundo plano los parámetros con distorsión previa (es decir, los coeficientes de distorsión previa). El segundo es para el funcionamiento normal en línea del transmisor de pasarela (es decir, el funcionamiento para gestionar el tráfico mediante el transmisor de pasarela).
- Etapa 130: Este proceso está inactivo esperando recibir los paquetes de retroalimentación desde el/los receptor(es). El transmisor de pasarela puede dotar a los paquetes de un ID único para permitir la recuperación del paquete transmitido original almacenado previamente, una vez que los paquetes de retroalimentación se reciben con su ID. Una vez que se recupera un conjunto de paquetes coherente en el tiempo para todas las portadoras, el proceso avanza hasta la siguiente etapa.
- Etapa 140: El conjunto de paquetes recibidos y transmitidos de todas las portadoras se usa para actualizar la estimación de los parámetros de modelo de canal que se usa para la estimación de parámetros de distorsión previa subsiguiente (etapa 150). Una implementación a modo de ejemplo de la etapa 140 se ilustra en la figura 13.
- Etapa 150: Se usa un procedimiento numérico iterativo para actualizar los parámetros con distorsión previa estimados (es decir, los coeficientes de distorsión previa) usando el conjunto de datos proporcionado correspondiente a los paquetes transmitidos y recibidos, así como los parámetros de modelo de canal. Una implementación a modo de ejemplo de la etapa 150 se ilustra en la figura 14.
- Etapa 160: Según el funcionamiento normal en línea, el transmisor aplica la función de distorsión previa a todos los paquetes entrantes que van a transmitirse por enlace ascendente. Los símbolos y paquetes de

diferentes portadoras se transmiten de manera síncrona. Todas las portadoras tienen la misma velocidad de transmisión en baudios.

La figura 13 es un diagrama de flujo de la etapa 140 tal como se describe con referencia a la figura 12, en una realización de la invención. El diagrama de flujo puede describirse de la siguiente manera:

- Etapa 141: Dados los paquetes recibidos desde una ventana coherente en el tiempo, se extrae el ID del paquete.
- Etapa 142: Usando el ID del paquete, se recuperan los paquetes correspondientes transmitidos originalmente.
- Etapa 143: Considerando los símbolos transmitidos, se generan las combinaciones no lineales $\Phi(\mathbf{u}_{[0-P]}(n))$, donde $\mathbf{u}_{[0-P]}(n)$ es un vector que recoge los símbolos transmitidos de todas las portadoras $u_1 \dots u_m \dots u_M$ desde el instante de tiempo (n-P)-ésimo hasta el instante de tiempo enésimo, donde P es la profundidad de memoria del modelo y M es el número de portadoras. La función $\Phi(\cdot)$ toma este vector de entrada y genera a partir de sus elementos un vector de columna de términos polinómicos.
- Etapa 144: Usando las combinaciones no lineales generadas y la estimación de los parámetros de distorsión previa actuales w (es decir, los coeficientes de distorsión previa actuales), se evalúan los símbolos x con distorsión previa correspondientes:

$$x(n) = \sum_{k=0}^P \sum_{\Delta f} W_k^{(1)} \mathbf{u}_k(n) + W_{k,\Delta f}^{(3)} e^{j2\pi\Delta f n} \mathbf{u}_k(n) \times \mathbf{u}_k(n) \times \mathbf{u}_k(n)^*$$

donde:

$W_k^{(r)}$ es la matriz que incorpora los coeficientes de elemento de distorsión previa de grado r-ésimo en relación con los símbolos de entrada de orden n-k-ésimo, Δf es la separación de frecuencia, * es el operador de conjugada compleja

$$\mathbf{x}(n) = [x_1(n), \dots, x_M(n)]^T$$

$$\mathbf{u}_k(n) = [u_1(n-k), \dots, u_M(n-k)]^T$$

$x_i(n)$: símbolo con distorsión previa enésimo en la portadora i-ésima

$u_i(n)$: símbolo de datos enésimo en la portadora i-ésima

La función de distorsión previa puede reescribirse como una operación lineal única en el vector de columna de coeficiente desconocido w

$$\mathbf{x}(n) = \Phi(\mathbf{u}_{[0-P]}(n)) \mathbf{w} \quad \text{o simplemente} \quad \mathbf{x}(n) = \Phi(n) \mathbf{w}$$

donde $\mathbf{u}_{[0-P]}(n) = [u_0(n), \dots, u_P(n)]^T$

Obsérvese que $\mathbf{x}_k(n) = \Phi(n-k) \mathbf{w}$

- Etapa 145: Una vez que se obtienen los símbolos con distorsión previa, las combinaciones no lineales de los símbolos de elemento de distorsión previa x se obtienen como $\Psi(\mathbf{x}_{[0-P]}(n))$,

donde $\mathbf{x}_{[0-P]}(n)$ es un vector que recoge los símbolos con distorsión previa de todas las portadoras $x_1 \dots x_m \dots x_M$ desde el instante de tiempo n-P-ésimo hasta el instante de tiempo enésimo. La función $\Psi(\cdot)$, de manera similar a $\Phi(\cdot)$, toma este vector de entrada y genera los términos polinómicos.

- Etapa 146: Usando un filtro adaptativo RLS, se obtiene el vector de parámetros de canal minimizando la función de coste de dos normas definida como $\|y - \Psi(\mathbf{x}_{[0-P]}(n)) \mathbf{h}\|^2$, donde y es la colección de símbolos de

salida obtenidos de la retroalimentación, y h es el vector de parámetros de canal. Obsérvese en este caso que $\|d\|^2$ de cualquier vector d es la suma de cuadrados de amplitudes de todas las entradas (dos normas).

5 La figura 14 es un diagrama de flujo de la etapa 150 tal como se describe con referencia a la figura 12, en una realización de la invención. El diagrama de flujo puede describirse de la siguiente manera:

- Etapa 151: Un contador para acceder a todos los símbolos de los paquetes recibidos se inicializa a 1.
- 10 - Etapa 152: Dados los símbolos transmitidos, se generan las combinaciones no lineales $\Phi(u_{[0-P]}(n))$.
- Etapa 153: El uso de las combinaciones no lineales generadas y la estimación de parámetros de elemento de distorsión previa actuales w (es decir, los coeficientes de distorsión previa actuales), se evalúan los símbolos con distorsión previa x correspondientes:

$$x(n) = \sum_{k=0}^P \sum_{\Delta f} W_k^1 \mathbf{u}_k(n) + W_{k,\Delta f}^3 e^{j2\pi\Delta f n} \mathbf{u}_k(n) \times \mathbf{u}_k(n) \times \mathbf{u}_k(n)^*$$

donde:

$$x(n) = [x_1(n), \dots, x_M(n)]^T$$

$$\mathbf{u}_k(n) = [u_1(n-k), \dots, u_M(n-k)]^T$$

$x_i(n)$: símbolo i -ésimo con distorsión previa en la portadora i -ésima

$u_i(n)$: símbolo de datos i -ésimo en la portadora i -ésima

La función de distorsión previa puede reescribirse como una operación lineal única en un vector de columna de coeficiente desconocido w

$$x(n) = \Phi(u_{[0-P]}(n)) w \quad \text{o simplemente} \quad x(n) = \Phi(n) w$$

donde $\mathbf{u}_{[0-P]}(n) = [\mathbf{u}_0(n), \dots, \mathbf{u}_P(n)]^T$

35 Obsérvese que $x_k(n) = \Phi(n-k) w$

Etapa 154: Usando los parámetros de canal $H^{1,3}$, donde $H^{(r)}$ es la matriz que incorpora los coeficientes de distorsión previa de grado r -ésimo extraídos del vector de parámetros h y siendo $\Phi(n)$ el vector de combinación de entradas no lineal, el vector de salida de canal puede expresarse como:

$$y(n) = \sum_{k=0}^K \sum_{\Delta f} H_k^1 \Phi(n-k) w + H_{k,\Delta f}^3 e^{j2\pi\Delta f n} \Phi(n-k) \times \Phi(n-k) \times \Phi(n-k)^* w \times w \times w^*$$

A partir de esta expresión, la salida de canal puede diferenciarse con respecto a w , obteniéndose así el gradiente requerido para la optimización:

$$\frac{\partial y}{\partial w} = \sum_{k=0}^K \sum_{\Delta f} H_k^1 \Phi(n-k) + H_{k,\Delta f}^3 e^{j2\pi\Delta f n} \Phi(n-k) \times \Phi(n-k) \times \Phi(n-k)^* (w \times I + I \times w) \times w^*$$

- Etapa 155: Usando la matriz de gradiente obtenida en el etapa 154, pueden calcularse la matriz de ganancia de iteración K y la matriz de propagación P

$$K(i) = P(i-1) \frac{\partial y}{\partial w} \left(I + \alpha^{-1} \frac{\partial y^H}{\partial w} P(i-1) \frac{\partial y}{\partial w} \right)^{-1}$$

$$P(i) = \alpha^{-1}(P(i-1) - K(i) \frac{\partial \mathbf{y}^H}{\partial \mathbf{w}} P(i-1))$$

donde $P(1) = I$ (matriz de identidad) y α es el factor de olvido (escalar).

- 5 - Etapa 156: Se calcula el vector de error instantáneo medido en los símbolos recibidos de todas las portadoras : $\mathbf{e}(n) = \mathbf{u}(i) - \mathbf{y}(i)$
- Etapa 157: Se actualizan los coeficientes de elemento de distorsión previa, el vector de error y la matriz de ganancia. La ecuación de actualización de los coeficientes de elemento de distorsión previa es:

$$\mathbf{w}(i+1) = \mathbf{w}(i) + \mu K(n) \mathbf{e}(n)$$

donde μ es el parámetro de etapa que controla la propiedad de convergencia del algoritmo.

- 15 - Etapa 158: Usando los coeficientes de distorsión previa actualizados y la función de canal, se estiman los símbolos recibidos.

$$\mathbf{y}(n) = \sum_{k=0}^K \sum_{\Delta f} H_k^1 \Phi(n-k) \mathbf{w} + H_{k,\Delta f}^3 e^{j2\pi\Delta f n} \Phi(n-k) \times \Phi(n-k) \times \Phi(n-k)^* \mathbf{w} \times \mathbf{w} \times \mathbf{w}^*$$

- 20 - Etapa 159: Se incrementa el contador de símbolos i .

En lo que sigue, se describe el rendimiento de un procedimiento según una realización de la invención en una situación en la que un HPA de satélite amplifica tres portadoras conjuntamente. El rendimiento se evalúa en este caso como la pérdida relativa, en decibelios (dB), de la energía por símbolo necesaria para alcanzar una tasa de errores de bit objetivo de 0,00001. Se evalúa la pérdida con respecto al caso de un HPA ideal que no introduce ninguna no linealidad (no requiriendo por tanto ninguna distorsión previa).

Las figuras 15 a 18 ilustran el rendimiento con respecto a la eficiencia del amplificador para las técnicas consideradas: "Signal DPD" (N. Kelly *et al*, 2013, referencia completa proporcionada anteriormente), "MC-DPD" (R. Piazza *et al*, " Multicarrier Digital Predistortion/ Equalization Techniques for Non-linear Satellite Channels", Actas de la trigésima Conferencia Internacional de Sistemas de Satélites de Comunicaciones AIAA (ICSSC-2012), Ottawa, Canadá, del 24 a 27 de septiembre de 2012) y "Memoryless linear Equalization", es decir, un caso sin compensación en el que se usa una ganancia simple y control de fase como ecualizador. Las curvas marcadas como "Estimación directa de DPD" y "Estimación directa de DPD + modelo mejorado" corresponden a dos realizaciones de la invención, respectivamente.

Algunas realizaciones de la invención usan la estimación directa de DPD sin el denominado "modelo mejorado", mientras que otras realizaciones de la invención usan la estimación directa de DPD con el modelo mejorado. El uso del modelo mejorado es, por tanto, opcional, donde la estimación directa admite diversos modelos de elemento de distorsión previa. En particular, el modelo mejorado tiene en cuenta artefactos adicionales, que se relacionan con los términos $e^{j2\pi\Delta f n}$ en las ecuaciones o, dicho de otro modo, los términos fuera de banda. El modelo mejorado se divulga en el documento de B. F. Beidas, "Intermodulation Distortion in Multicarrier Satellite Systems: Analysis and Turbo Volterra Equalization", IEEE Trans. Commun., vol. 59, n.º 6, págs. 1580-1590, junio de 2011, pero nunca se usó en combinación con un enfoque de aprendizaje directo para calcular los coeficientes de distorsión previa.

En particular, la figura 15 muestra una comparación de rendimiento para el canal central 16APSK 9/10; la figura 16 muestra una comparación para el canal externo 16APSK 9/10; la figura 17 muestra una comparación para el canal central 32APSK 9/10, y la figura 18 muestra una comparación para el canal externo 32APSK 9/10 (la notación "9/10" se refiere a la velocidad de codificación, lo que indica que, por cada 9 bits de información, se generan 10 bits y el bit adicional proporciona redundancia). Puede observarse que se produce una mayor degradación en la portadora central debido a la naturaleza de la interferencia de canal adyacente no lineal.

Se obtienen ganancias sustanciales, de aproximadamente 0,5 a 0,75 dB para una realización de la invención sin la aplicación del modelo "mejorado" (curva marcada como "Estimación directa de DPD") y de aproximadamente 1 a 2 dB para una realización de la invención con la aplicación del modelo "mejorado" (curva marcada como "Estimación directa de DPD + modelo mejorado"), con respecto a las técnicas DPD de la técnica anterior, mientras que la distorsión previa de la señal proporciona, en comparación con DPD de datos, un rendimiento ligeramente mejor para regímenes de reducción de potencia más altos. Sin embargo, la DPD de señales requiere un procesamiento de mayor complejidad tanto para operaciones en línea como fuera de línea ya que requiere procesamiento de banda ancha. De hecho, el procesamiento en la DPD de datos se produce a nivel de portadora en el dominio de datos, mientras que, para la DPD de señales, el procesamiento se produce después de la multiplexación. La multiplexación

aumenta el ancho de banda de señal y, por tanto, se necesita un procesador de mayor velocidad para manejar el gran ancho de banda.

En una realización (no ilustrada en los dibujos), un procedimiento implica almacenar en memoria intermedia paquetes en el transmisor de pasarela 400, y usar identificadores de paquete para realizar una comparación para actualizar en última instancia los coeficientes de distorsión previa. El procedimiento, en esta realización, comprende las siguientes etapas:

- a) proporcionar, en el transmisor de pasarela 400, una estimación de modelo de canal; (la estimación de modelo de canal inicial puede elegirse como identidad: canal de ganancia unitaria).
- b) recibir, en el transmisor de pasarela 400, una pluralidad de señales digitales que van a transmitirse (de manera síncrona, en el sentido de que los símbolos transmitidos se alinean en el tiempo) a través del canal de comunicación 500;
- c) someter a distorsión previa, en el transmisor de pasarela 400, la señal de cada una de la pluralidad de portadoras de señal; esta etapa se produce durante o después de la etapa de modulación s10 descrita anteriormente, pero antes de la etapa de multiplexación s20 y la transmisión s30 a través del canal de comunicación 500;
- d) transmitir (de manera síncrona), en el transmisor de pasarela 400, cada paquete de datos a su portadora asignada;
- e) recibir, en el transmisor de pasarela 400, paquetes de retroalimentación a través de un canal de retroalimentación, donde se recibe al menos un paquete de retroalimentación por portadora a través del canal de retroalimentación;
- f) actualizar la estimación de modelo de canal; (con los paquetes transmitidos y recibidos, el transmisor de pasarela 400 puede usar un enfoque iterativo para obtener las estimaciones de canal. Tras la recepción de cada paquete, puede usarse un procedimiento RLS convencional para actualizar la estimación de modelo de canal. La estimación de modelo de canal obtenida a partir de la estimación previa sirve entonces como la estimación inicial para la siguiente actualización del algoritmo de estimación de parámetros de canal).
- g) actualizar los coeficientes de distorsión previa (la obtención de los coeficientes de distorsión previa w puede implicar un proceso iterativo en el que se actualiza la estimación actual del vector de parámetros para aproximarse a la solución del problema de optimización. La estimación inicial para el proceso iterativo puede ser la unidad (sin distorsión previa). Este proceso de actualización, también conocido como aprendizaje, tiene lugar para varias iteraciones);
- h) aplicar los coeficientes de distorsión previa actualizados de la función de distorsión previa a los paquetes que van a transmitirse; y
- i) determinar si se completa el aprendizaje/actualización, por ejemplo, basándose en un umbral.

En una realización (ilustrada en la figura 19a), un procedimiento también implica el almacenamiento en memoria intermedia de paquetes en el transmisor de pasarela 400, así como el uso de identificadores de paquetes para realizar una comparación para actualizar en última instancia los coeficientes de distorsión previa. El procedimiento comprende las siguientes etapas, suponiendo que todas las portadoras están activas (es decir, la potencia de señal de cada una de las portadoras es mayor de cero):

- a) La base de la comunicación son los paquetes de datos.
- b) Usando los datos de entrada en una portadora en particular, el transmisor de pasarela 400 genera un paquete para la transmisión en esa portadora. La estructura del paquete está predefinida. Cada paquete de datos tiene un número predefinido de símbolos.
- c) Además de la parte de datos de información (es decir, que contiene información para usuarios finales), cada paquete tiene un campo de identificación denominado "ID de paquete". Los paquetes que están planificados para su transmisión en diferentes portadoras al mismo tiempo tienen el mismo ID de paquete. Los paquetes transmitidos en diferentes momentos tienen ID diferentes. El ID de paquete se incrementa en uno para cada paquete.
- d) El transmisor de pasarela 400 almacena en memoria intermedia una pluralidad de paquetes de cada portadora (indicado por N) en la memoria intermedia de datos; el número de paquetes almacenados en la memoria intermedia es al menos tan grande como (u opcionalmente el doble de) el producto de la velocidad de transmisión de paquetes de datos y el retardo en la recepción de retroalimentación. La

memoria intermedia puede ser un sistema de tipo primero en entrar, primero en salir (FIFO).

- 5
- e) El transmisor de pasarela 400 verifica el ID de paquete entre las portadoras y planifica paquetes que tengan el mismo ID de paquete para su transmisión.
- f) El transmisor de pasarela 400 aplica entonces el modelo de elemento de distorsión previa actual (es decir, los coeficientes de distorsión previa actuales) en los paquetes planificados para distorsionar sus símbolos. Si el modelo de elemento de distorsión previa se ha actualizado, el transmisor de pasarela 400 almacena el ID de paquete del primer paquete modificado por el elemento de distorsión previa actualizado en el registro de ID. El transmisor de pasarela 400 puede usar dos elementos de almacenamiento de datos:
- 10
- a. Una memoria intermedia de datos para almacenar N paquetes de todas las portadoras, y
- 15
- b. Un registro de ID para almacenar el ID de paquete del paquete que se modificó primero por el elemento de distorsión previa actualizado.
- g) El receptor 600, tras recibir el paquete, cuantifica cada uno de los símbolos usando un número predefinido de bits. Preferentemente, el número de bits es lo bastante grande como para proporcionar un error de cuantificación inferior a al menos -30 dB.
- 20
- h) Después de la cuantificación, el receptor 600 modula el flujo de bits obtenido mediante cuantificación usando una modulación predefinida. Puede usarse un esquema robusto como QPSK. El receptor 600 crea entonces un paquete de retroalimentación con un indicador de inicio de trama (un patrón predefinido de símbolos), seguido de los datos modulados. Esto se retroalimenta al transmisor de pasarela 400 usando alguna conexión libre de errores. Los paquetes de diferentes portadoras se envían en diferentes canales predefinidos (sin interferencia) en esta conexión. El paquete de retroalimentación se añade al paquete transmitido, además del indicador de "inicio de trama", tal como se muestra en la figura 19b.
- 25
- i) Un único receptor 600 puede recibir paquetes de todas las portadoras. Alternativamente, los paquetes de diferentes portadoras pueden recibirlos diferentes receptores 600 ubicados conjuntamente o separados espacialmente. Cada receptor 600 realiza la operación de las etapas g) y h). Su ubicación es a discreción del operador. Si bien es suficiente con tener uno de tales receptores 600 capaz de decodificar múltiples portadoras, también pueden proporcionarse múltiples receptores 600 capaces de decodificar solamente portadoras únicas. Se necesitan datos de todas las portadoras y una conexión para retroalimentar los datos. Los receptores de usuario final 600 típicos no pueden retroalimentar los datos. Generalmente se requieren receptores dedicados 600.
- 30
- 35
- j) Hay un retardo predefinido asociado a la comunicación desde el transmisor de pasarela 400 al receptor 600 y desde el receptor 600 de vuelta al transmisor de pasarela 400, y para entonces se habrán transmitido N paquetes.
- 40
- k) Tras recibir los paquetes en diferentes portadoras, el transmisor de pasarela 400 los decodifica y determina la disponibilidad de paquetes de todas las portadoras que tienen el mismo ID y espera hasta que suceda tal evento.
- 45
- l) Una vez que se han hallado los paquetes en todas las portadoras con el mismo ID, el transmisor de pasarela 400 verifica el ID de paquete con el registro de ID. Si se determina que el ID de paquete es igual a la entrada en el registro de ID, el transmisor de pasarela 400 recupera los paquetes correspondientes (en todas las portadoras y se indexan mediante el ID del paquete) de la memoria intermedia de datos. Si la ID de paquete es menor que la entrada en el registro de ID, el transmisor de pasarela 400 avanza a la etapa k).
- 50
- m) Con los paquetes transmitidos y recibidos, el transmisor de pasarela 400 puede usar un enfoque iterativo para obtener el modelo de canal. La estimación de modelo de canal inicial puede elegirse como identidad: canal de ganancia unitaria. Con la recepción de cada paquete, puede usarse, por ejemplo, una técnica RLS convencional para actualizar la estimación de modelo de canal. La estimación de modelo de canal obtenida a partir de la estimación previa sirve entonces como estimación inicial para la siguiente actualización del algoritmo de parámetros de canal. Alternativamente a este mecanismo de estimación dinámica, los parámetros de modelo de canal pueden obtenerse fuera de línea usando datos del fabricante del transpondedor o la prueba del transpondedor sobre el terreno antes del lanzamiento.
- 55
- 60
- n) La estimación de parámetros de distorsión previa, es decir, los coeficientes de distorsión previa w , se
- 65

actualiza de la siguiente manera: el elemento de distorsión previa implementa la función $\mathbf{x}(n)=\Phi(n) \mathbf{w}$ donde $\Phi(u(n))$ es una función no lineal que toma entradas actuales y otras anteriores de todas las portadoras y \mathbf{w} es el vector de parámetros de elemento de distorsión previa. La obtención de los parámetros de elemento de distorsión previa \mathbf{w} implica resolver un problema de optimización compleja a nivel computacional. Por tanto, se considera un proceso iterativo en el que se actualiza la estimación actual del vector de parámetros para aproximarse a la solución del problema de optimización. La estimación inicial para el proceso iterativo puede ser la unidad (sin elemento de distorsión previa). Este proceso de actualización, conocido como aprendizaje directo (tal como se explicó anteriormente), se repite para varias iteraciones.

- o) El número de iteraciones para determinar los coeficientes del elemento de distorsión previa se selecciona basándose en la comparación de la mejora en la calidad de la señal con respecto a la iteración anterior con un umbral. La calidad de señal se determina comparando la señal retroalimentada con la señal transmitida correspondiente, usando un algoritmo predefinido, y el umbral puede establecerse al inicio de las operaciones. Si se supera el umbral, entonces se detienen las iteraciones. De lo contrario, el transmisor de pasarela 400 avanza hasta la etapa a). El proceso de actualización del modelo de canal y los coeficientes de distorsión previa se conoce como proceso de aprendizaje. La duración del proceso está predefinida para ser un proceso continuo o finalizar después de que la mejora de la calidad de señal a través de las iteraciones disminuya por debajo de un umbral predefinido.

La figura 20 es un diagrama esquemático de una implementación a modo de ejemplo de un ordenador 300 que puede usarse en realizaciones de la invención, por ejemplo para calcular los coeficientes de distorsión previa, para el cálculo del modelo de canal (si lo hubiera), para la generación de los paquetes (si se usan), para la modulación y/o para generar el flujo con distorsión previa. Un transmisor de pasarela 400 y/o un receptor dedicado 600 pueden implicar un ordenador 300 de este tipo, tal como se ilustra esquemáticamente en la figura 20. Tal como se ilustra, el ordenador 300 puede incluir un bus 305, una unidad de procesamiento 303, una memoria principal 307, una ROM 308, un dispositivo de almacenamiento 309, un dispositivo de entrada 302, un dispositivo de salida 304 y una interfaz de comunicación 306. El bus 305 puede incluir una trayectoria que permite la comunicación entre los componentes del ordenador 300.

La unidad de procesamiento 303 puede incluir un procesador, un microprocesador o una lógica de procesamiento que pueda interpretar y ejecutar instrucciones. La memoria principal 307 puede incluir una RAM u otro tipo de dispositivo de almacenamiento dinámico que pueda almacenar información e instrucciones para su ejecución mediante la unidad de procesamiento 303. La ROM 308 puede incluir un dispositivo ROM u otro tipo de dispositivo de almacenamiento estático que pueda almacenar información estática e instrucciones para su uso por la unidad de procesamiento 303. El dispositivo de almacenamiento 309 puede incluir un medio de grabación magnética y/u óptica y su unidad correspondiente.

El dispositivo de entrada 302 puede incluir un mecanismo que permite que un operador introduzca información en el ordenador 300, tal como un teclado numérico, un teclado, un ratón, un lápiz, mecanismos de reconocimiento de voz y/o biométricos, etc. y/o un mecanismo que reciba la entrada de, por ejemplo, una antena seguido de un convertidor de analógico a digital. El dispositivo de salida 304 puede incluir un mecanismo que proporcione información al operador, incluyendo una pantalla, una impresora, un altavoz, etc. y/o un mecanismo que proporcione una salida, por ejemplo, a un convertidor de digital a analógico para la conversión de frecuencias. La interfaz de comunicación 306 puede incluir cualquier mecanismo similar a un transceptor que permita que el ordenador 300 se comunique con otros dispositivos y/o sistemas. Por ejemplo, la interfaz de comunicación 306 puede incluir mecanismos para comunicarse con otro dispositivo o sistema a través de una red.

El ordenador 300 puede realizar ciertas operaciones o procesos descritos en el presente documento. Estas operaciones pueden realizarse en respuesta a la unidad de procesamiento 303 que ejecuta las instrucciones de software contenidas en un medio legible por ordenador, tal como la memoria principal 307, la ROM 308 y/o el dispositivo de almacenamiento 309. Un medio legible por ordenador puede definirse como un dispositivo de memoria física o lógica. Por ejemplo, un dispositivo de memoria lógica puede incluir espacio de memoria dentro de un único dispositivo de memoria física o distribuirse a través de múltiples dispositivos de memoria física. Cada uno de la memoria principal 307, la ROM 308 y el dispositivo de almacenamiento 309 puede incluir medios legibles por ordenador. Los medios de grabación magnética y/u óptica (por ejemplo, CD o DVD legibles) del dispositivo de almacenamiento 309 también pueden incluir medios legibles por ordenador. Las instrucciones de software pueden leerse en la memoria principal 307 desde otro medio legible por ordenador, tal como el dispositivo de almacenamiento 309, o desde otro dispositivo a través de la interfaz de comunicación 306.

Las instrucciones de software contenidas en la memoria principal 309 pueden hacer que la unidad de procesamiento 303 realice operaciones o procesos descritos en el presente documento, tales como el cálculo de los coeficientes de distorsión previa. Alternativamente, pueden usarse conjuntos de circuitos cableados en lugar de, o en combinación con, las instrucciones de software para implementar operaciones y/o procesos descritos en el presente documento.

Por tanto, las implementaciones descritas en el presente documento no se limitan a ninguna combinación específica de hardware y software.

5 La figura 21 ilustra esquemáticamente un transmisor de pasarela 400 configurado para compensar, al menos parcialmente, las no linealidades de un canal de comunicación 500 que comprende al menos un repetidor 510. El transmisor de pasarela 400 puede implementarse al menos parcialmente en un ordenador 300 tal como se indicó con referencia a la figura 20.

10 El transmisor de pasarela 400 comprende una unidad de modulación 401, una unidad de multiplexación 402 y una unidad de envío 403. La unidad de modulación 401 está configurada para modular una pluralidad de señales digitales en una pluralidad de portadoras, respectivamente (es decir, correlación de bits con la constelación), donde, en funcionamiento, los símbolos del diagrama de constelación usado para la modulación de cada portadora se distorsionan según una función de distorsión previa. La distorsión real de los símbolos puede llevarse a cabo en la
 15 unidad de modulación 401 (esto puede aplicarse, por ejemplo, a realizaciones en las que se produce la distorsión previa cuando se realiza la modulación, véase la figura 10a) o en otra unidad funcional del transmisor de pasarela 400 (esto puede aplicarse, por ejemplo, a realizaciones en las que la distorsión previa tiene lugar después de la modulación, véase la figura 10b). La unidad de multiplexación 402 está configurada para multiplexar por división de frecuencia la pluralidad de señales digitales moduladas. La unidad de envío 403 está configurada para enviar la pluralidad sometida a multiplexación por división de frecuencia de señales digitales moduladas para la transmisión, a
 20 través del canal de comunicación 500, a al menos un receptor 600. El transmisor de pasarela 400 es tal que la función de distorsión previa implica una pluralidad de funciones polinómicas, tomando cada una como entrada los símbolos de todas las portadoras y siendo los coeficientes de las funciones polinómicas los “coeficientes de distorsión previa”. Los coeficientes de distorsión previa se calculan según un enfoque de aprendizaje directo, realizándose el cálculo conjuntamente para la pluralidad de portadoras y comprendiendo el cálculo actualizar de
 25 manera iterativa los coeficientes de distorsión previa basándose en señales recibidas que se retroalimentan desde al menos uno entre el al menos un receptor 600 al transmisor de pasarela 400.

30 Inicialmente, es decir, antes de que estén disponibles las señales de retroalimentación recibidas, los coeficientes de distorsión previa pueden establecerse en el transmisor de pasarela 400 como si el canal de comunicación 500 tuviese una ganancia lineal, siendo el factor de ganancia la unidad. Alternativamente, los coeficientes de distorsión previa pueden establecerse en el transmisor de pasarela 400 basándose en parámetros de modelo de canal obtenidos de antemano a través de al menos una de las pruebas, simulaciones y estudios llevados a cabo en, o con respecto a, al menos uno del canal de comunicación 500 y al menos uno de entre el al menos un repetidor 510.

35 Cuando se usan los términos “unidad de modulación”, “unidad de multiplexación”, “unidad de envío”, etc. en el presente documento, no se realiza ninguna restricción en cuanto a cómo pueden estar distribuidos estos elementos y con respecto a cómo pueden reunirse los elementos. Es decir, los elementos constitutivos de las mismas pueden distribuirse en diferentes componentes o dispositivos de software o de hardware para producir la función prevista. También pueden reunirse una pluralidad de elementos distintos para proporcionar las funcionalidades previstas.

40 Una cualquiera de las unidades a las que se hizo referencia anteriormente de un transmisor de pasarela puede implementarse en hardware, en software, en matriz de puertas programable en campo (FPGA), en circuitos integrados para aplicaciones específicas (ASIC), y/o firmware, o similar.

45 En realizaciones adicionales de la invención, una cualquiera de la unidad de modulación 401, la unidad de multiplexación 402, la unidad de envío 403, etc. mencionadas anteriormente se sustituye por medios de modulación 401, medios de multiplexación 402, una unidad de envío 403, etc., respectivamente, o, por un modulador 401, un multiplexor 402, un elemento transmisor 403, etc. para realizar las funciones de la unidad de modulación 401, la
 50 unidad de multiplexación 402, la unidad de envío 403, etc. mencionadas anteriormente.

55 En realizaciones adicionales de la invención, una cualquiera de las etapas o procesos descritos anteriormente puede implementarse usando instrucciones ejecutables por ordenador, por ejemplo en forma de métodos, procedimientos ejecutables por ordenador, o similares, en cualquier clase de lenguaje informático, y/o en forma de software integrado en firmware, circuitos integrados o similares.

Aunque se ha descrito la presente invención basándose en ejemplos detallados, los ejemplos detallados solo sirven para proporcionar un mejor entendimiento al experto, y no están destinados a limitar el alcance de la invención. El alcance de la invención está definido más bien por las reivindicaciones adjuntas.

60 Abreviaturas:

ACI	Interferencia de canal adyacente
APSK	Modulación por desplazamiento de fase y amplitud
BPSK	Modulación por desplazamiento de fase binaria
65 DPD	Distorsión previa digital
DTH	Recepción directa por el telespectador

	DVB-S2	Difusión de vídeo digital - satélite - segunda generación
	EQ	Ecualización
	FIFO	Primero en entrar, primero en salir
	HPA	Amplificador de alta potencia
5	IMUX	Multiplexación de entrada
	ID	Identificador
	IF	Frecuencia intermedia
	RF	Radiofrecuencia
	IRD	Receptor-decodificador integrado
10	ISI	Interferencia entre símbolos
	LMS	Mínimos cuadrados promediados
	MC	Multiportadora
	OBO	Reducción de potencia de salida
	OFDM	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal
15	OMUX	Multiplexación de salida
	PSK	Modulación por desplazamiento de fase
	QPSK	Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura
	RLS	Mínimos cuadrados recursivos
20	TWTA	Amplificador de tubo de onda progresiva

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento, llevado a cabo por un transmisor (400), denominado en lo sucesivo “transmisor de pasarela (400)”, para compensar, al menos parcialmente, las no linealidades de un canal de comunicación (500) que comprende al menos un repetidor (510), comprendiendo el procedimiento:
- modular (s10) una pluralidad de señales digitales en una pluralidad de portadoras, respectivamente, donde los símbolos del diagrama de constelación usado para la modulación de cada portadora se distorsionan según una función, denominada en lo sucesivo “función de distorsión previa”;
- someter a multiplexación por división de frecuencia (s20) la pluralidad de señales digitales moduladas; y
- enviar (s30) la pluralidad sometida a multiplexación por división de frecuencia de señales digitales moduladas para su transmisión, a través del canal de comunicación (500), a al menos un receptor (600);
- en el que
- la función de distorsión previa implica una pluralidad de funciones polinómicas, tomando cada una como entrada los símbolos de todas las portadoras, y denominándose en lo sucesivo los coeficientes de las funciones polinómicas “coeficientes de distorsión previa”;
- estando el procedimiento caracterizado por que
- los coeficientes de distorsión previa se calculan según un enfoque de aprendizaje directo, realizándose el cálculo conjuntamente para la pluralidad de portadoras y comprendiendo el cálculo actualizar de manera iterativa los coeficientes de distorsión previa basándose en señales recibidas que se retroalimentan desde al menos uno de entre el al menos un receptor (600) al transmisor de pasarela (400).
2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el al menos un repetidor (510) comprende un transpondedor a bordo de un satélite, donde, preferiblemente, el transpondedor a bordo del satélite comprende al menos uno de un filtro de multiplexación de entrada, un amplificador y un filtro de multiplexación de salida.
3. Procedimiento según la reivindicación 1 ó 2, en el que el al menos un receptor (600) es una pluralidad de receptores (600).
4. Transmisor (400), denominado en lo sucesivo “transmisor de pasarela (400)”, para compensar, al menos parcialmente, las no linealidades de un canal de comunicación (500) que comprende al menos un repetidor (510), comprendiendo el transmisor de pasarela (400):
- medios de modulación (401) para modular una pluralidad de señales digitales en una pluralidad de portadoras, respectivamente, donde, en funcionamiento, los símbolos del diagrama de constelación usado para la modulación de cada portadora se distorsionan según una función, denominada en lo sucesivo “función de distorsión previa”;
- medios de multiplexación (402) para multiplexar por división de frecuencia la pluralidad de señales digitales moduladas;
- medios de envío (403) para enviar la pluralidad sometida a multiplexación por división de frecuencia de señales digitales moduladas para su transmisión, a través del canal de comunicación (500), a al menos un receptor (600);
- estando el transmisor de pasarela (400) configurado de tal manera que
- la función de distorsión previa incluye una pluralidad de funciones polinómicas, tomando cada una como entrada los símbolos de todas las portadoras, y denominándose en lo sucesivo los coeficientes de las funciones polinómicas “coeficientes de distorsión previa”;
- estando el transmisor de pasarela (400) caracterizado porque está configurado además de tal manera que los coeficientes de distorsión previa se calculan según un enfoque de aprendizaje directo, realizándose el cálculo conjuntamente para la pluralidad de portadoras y comprendiendo el cálculo actualizar de manera iterativa los coeficientes de distorsión previa basándose en señales recibidas que se retroalimentan desde al menos uno de entre el al menos un receptor (600) al transmisor de pasarela (400).
5. Transmisor de pasarela (400) según la reivindicación 4, de tal manera que, en funcionamiento, antes de que estén disponibles las señales de retroalimentación recibidas, los coeficientes de distorsión previa se

establecen como si el canal de comunicación (500) tuviese una ganancia lineal, siendo el factor de ganancia la unidad.

- 5 6. Transmisor de pasarela (400) según la reivindicación 4, de tal manera que, en funcionamiento, antes de que estén disponibles las señales de retroalimentación recibidas, los coeficientes de distorsión previa se establecen basándose en parámetros de modelo de canal obtenidos de antemano a través de al menos uno de pruebas, simulaciones y estudios llevados a cabo en, o con respecto a, al menos uno de
- 10 el canal de comunicación (500); y
- al menos uno de entre el al menos un repetidor (510).
- 15 7. Transmisor de pasarela (400) según una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 6, que es tal que, para cada portadora, solo una de la pluralidad de funciones polinómicas se usa para distorsionar símbolos del diagrama de constelación usado para la modulación de esa portadora.
- 20 8. Transmisor de pasarela (400) según una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 7, en el que el enfoque de aprendizaje directo emplea al menos uno de un filtro de mínimos cuadrados recursivos y un filtro de mínimos cuadrados promediados.
- 25 9. Transmisor de pasarela (400) según una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 8, que es tal que, en funcionamiento,
- la pluralidad de señales digitales que están sometiendo a modulación están originalmente en forma de paquetes,
- 30 a cada uno de los paquetes se le asigna un identificador de paquete,
- los paquetes se mantienen almacenados en el transmisor de pasarela (400) junto con sus identificadores de paquetes, después de la transmisión,
- 35 las señales de retroalimentación recibidas están en forma de paquete o se reorganizan, mediante el transmisor de pasarela (400), en forma de paquetes, y
- el cálculo de los coeficientes de distorsión previa implica comparar el contenido de los paquetes de las señales de retroalimentación recibidas con el contenido de los paquetes almacenados en memoria intermedia para estimar la tasa de errores generada por el canal de comunicación (500).
- 40 10. Transmisor de pasarela (400) según una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 9, que es tal que la información de retroalimentación de las señales recibidas en todas las portadoras activas se requiere para desencadenar el proceso de cálculo de los coeficientes de distorsión previa.
- 45 11. Sistema que comprende un transmisor de pasarela (400) según una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 10, y el al menos un repetidor (510).
- 50 12. Sistema según la reivindicación 11, que comprende además el al menos un receptor (600).
- 55 13. Programa informático que comprende instrucciones legibles por ordenador configuradas, cuando se ejecutan en un ordenador, para hacer que el ordenador
- determine coeficientes, denominados en lo sucesivo "coeficientes de distorsión previa", implicados en una función, denominada en lo sucesivo "función de distorsión previa", para su uso en la distorsión de símbolos de cada uno de los diagramas de constelación usados para la modulación (s10) de, respectivamente, una pluralidad de portadoras que portan una pluralidad de señales digitales,
- 60 donde
- la distorsión es adecuada, en un transmisor (400), denominado en lo sucesivo "transmisor de pasarela (400)", para compensar, al menos particularmente, las no linealidades de un canal de comunicación (500) que comprende al menos un repetidor (510);
- 65 la distorsión se lleva a cabo antes de multiplexar por división de frecuencia (s20) la pluralidad de señales digitales moduladas y antes de enviar (s30) la pluralidad sometida a multiplexación por división de frecuencia de señales digitales moduladas para su transmisión, a través del canal de comunicación (500), a al menos un receptor (600),

la función de distorsión previa incluye una pluralidad de funciones polinómicas, tomando cada una como entrada los símbolos de todas las portadoras, y siendo los coeficientes de las funciones polinómicas los coeficientes de distorsión previa mencionados anteriormente, y

- 5 caracterizado porque los coeficientes de distorsión previa se calculan según un enfoque de aprendizaje directo, realizándose el cálculo conjuntamente para la pluralidad de portadoras, y comprendiendo el cálculo actualizar de manera iterativa los coeficientes de distorsión previa basándose en señales recibidas que se retroalimentan desde al menos uno de entre el al menos un receptor (600).
- 10 14. Producto de programa informático que comprende un programa informático según la reivindicación 13.
15. Medio de almacenamiento que almacena un programa informático según la reivindicación 13.

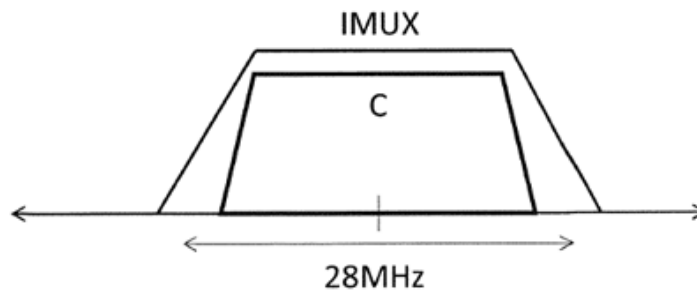
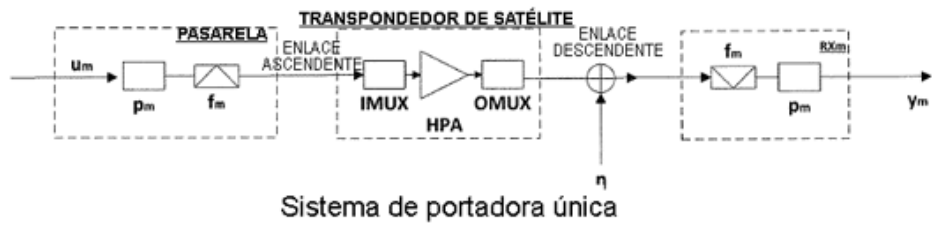
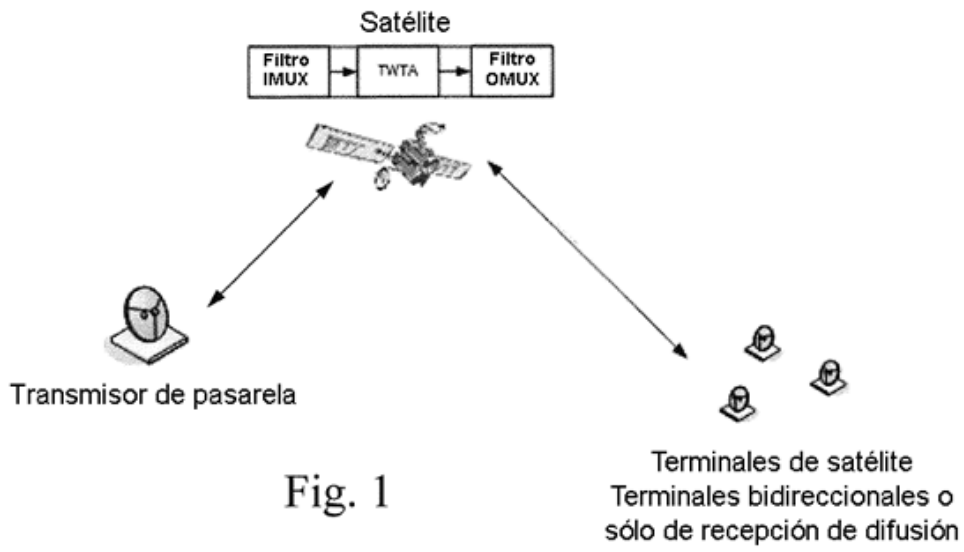


Fig. 3

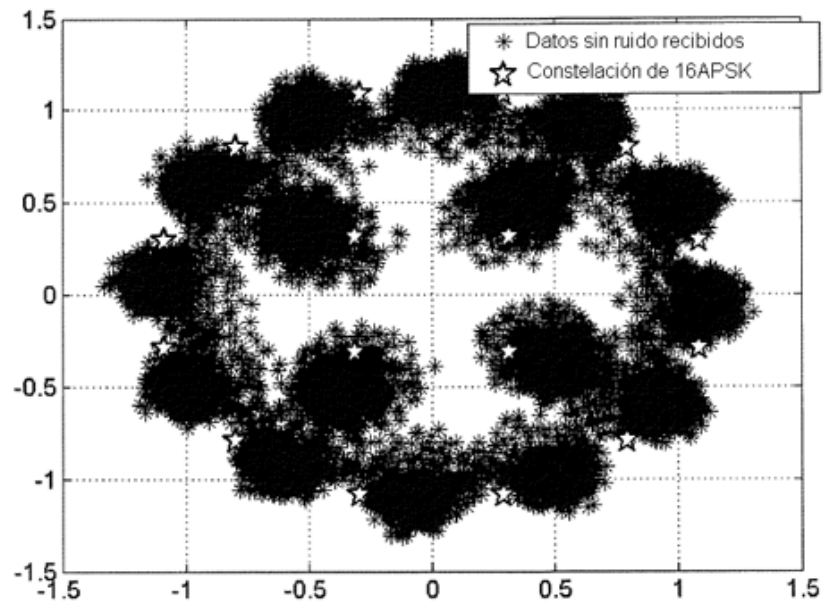


Fig. 4

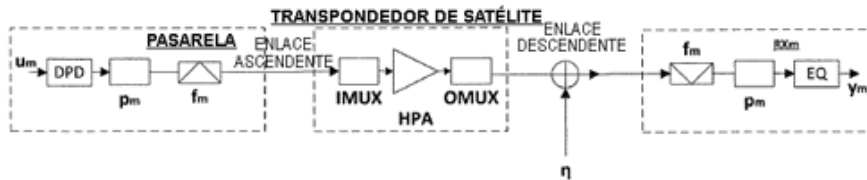


Fig. 5

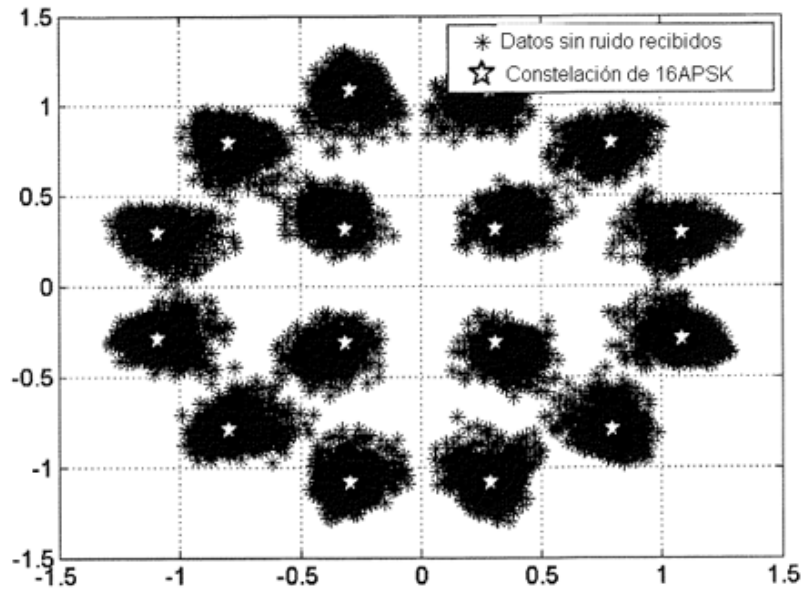


Fig. 6

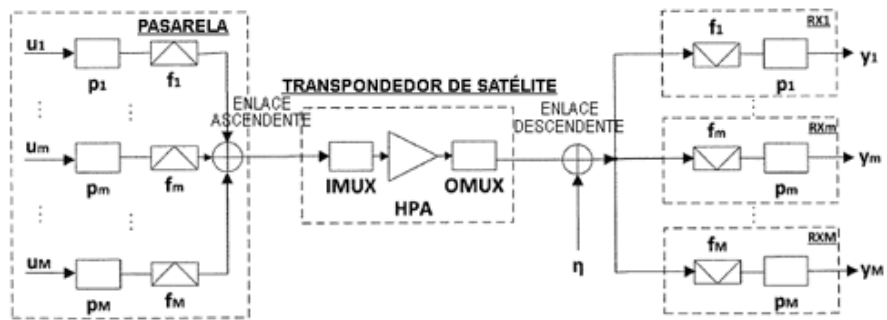


Fig. 7

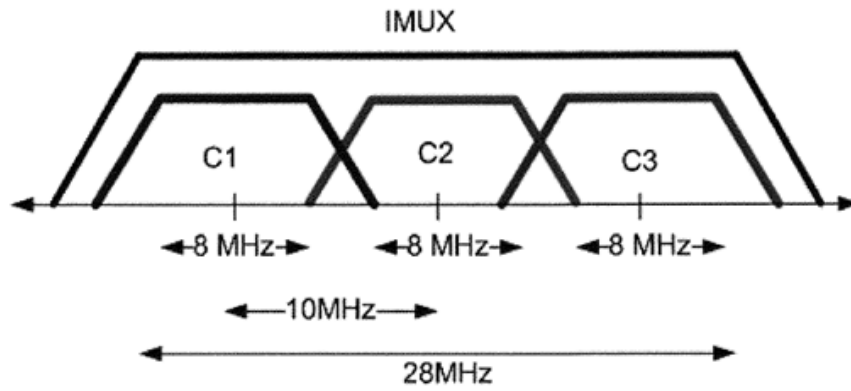


Fig. 8

salida de canal externo F1 no ecualizada

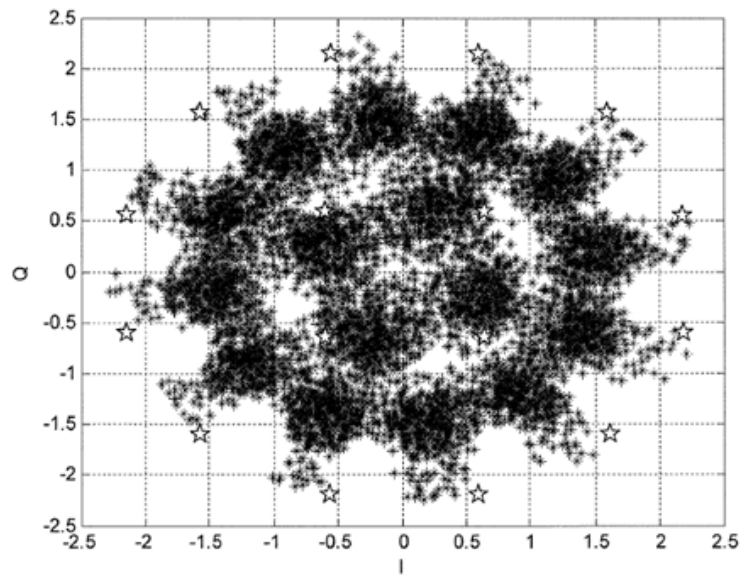


Fig. 9a

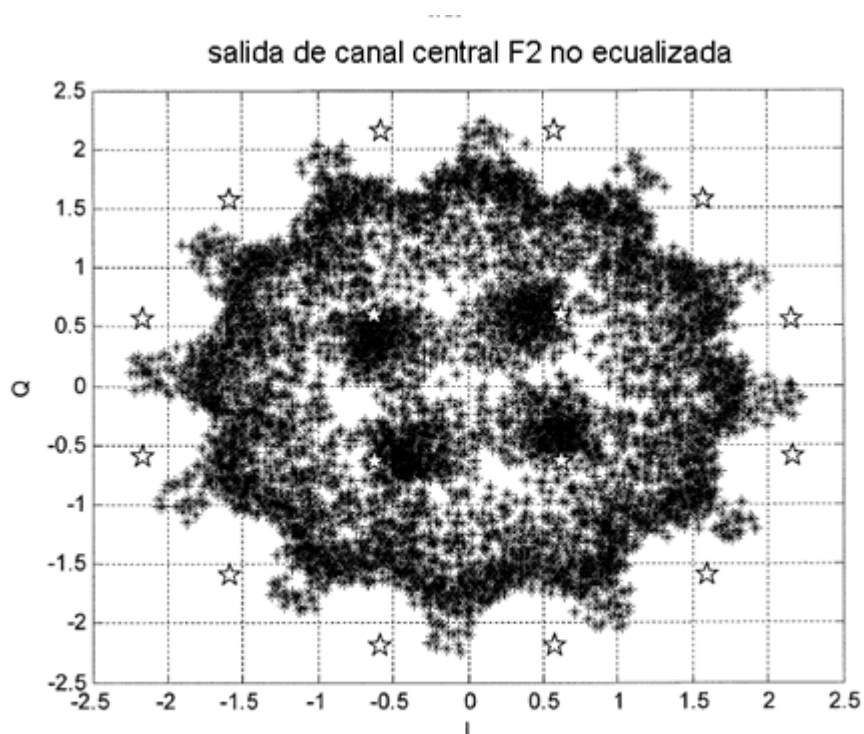


Fig. 9b

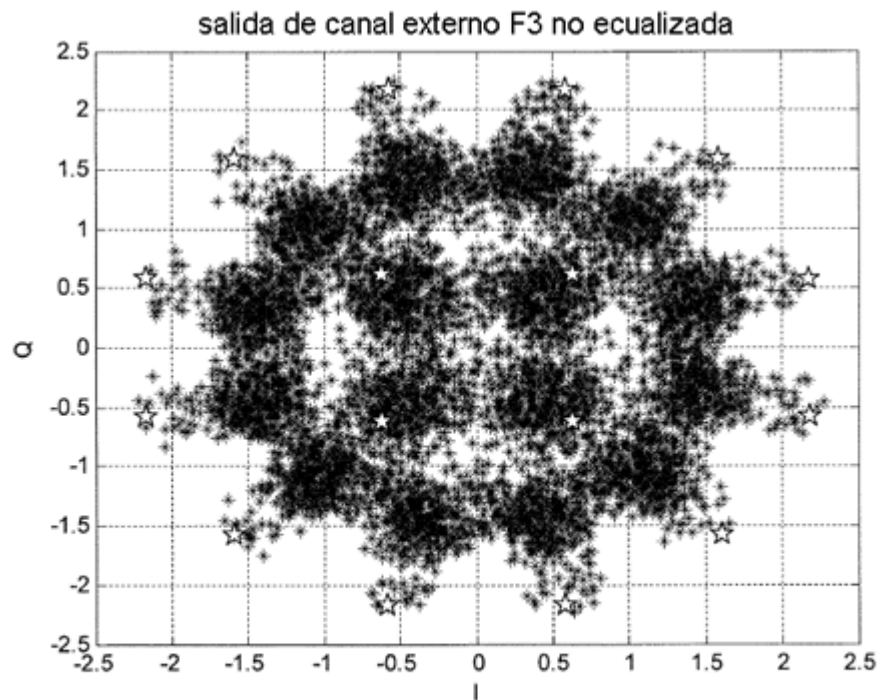


Fig. 9c

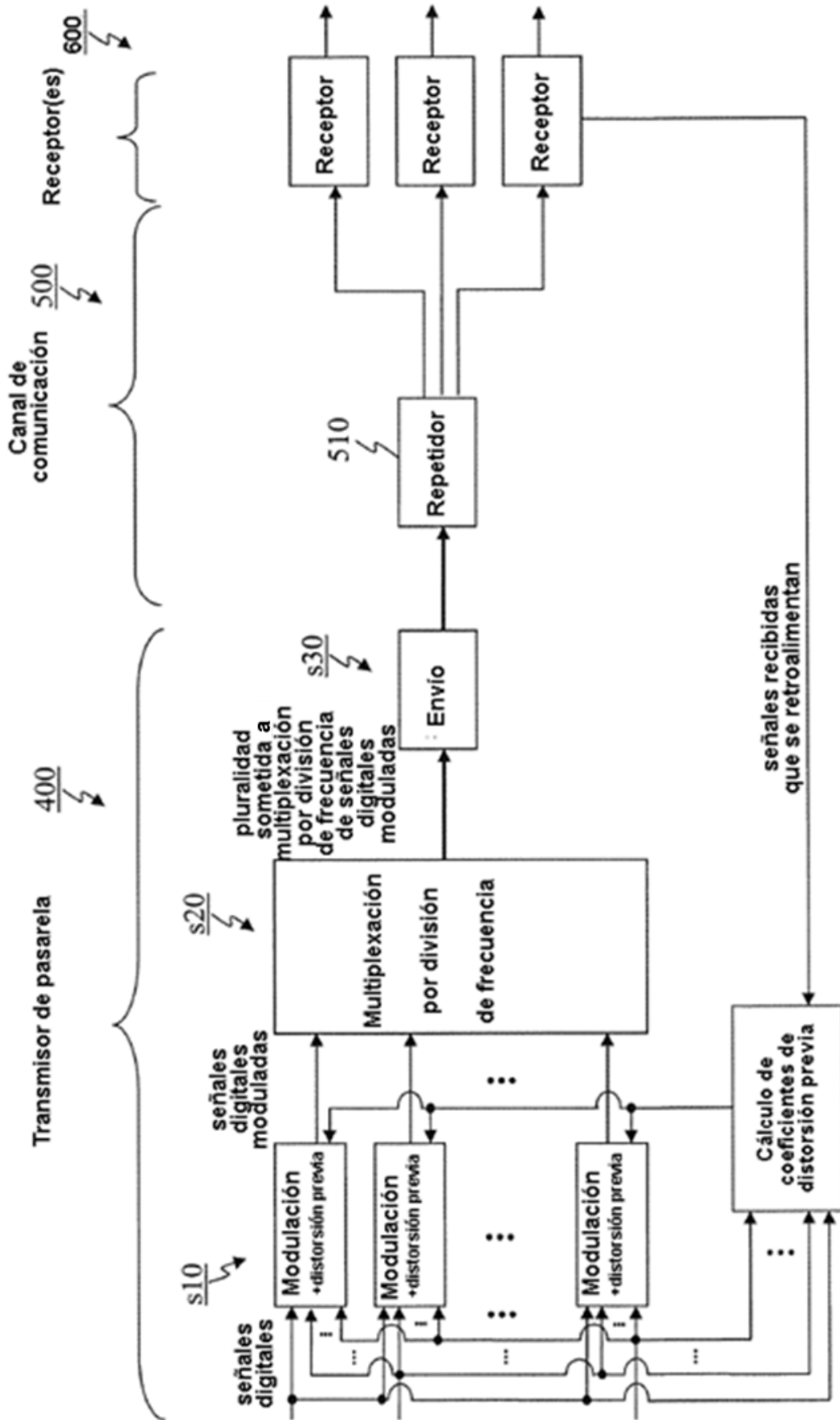


Fig. 10a

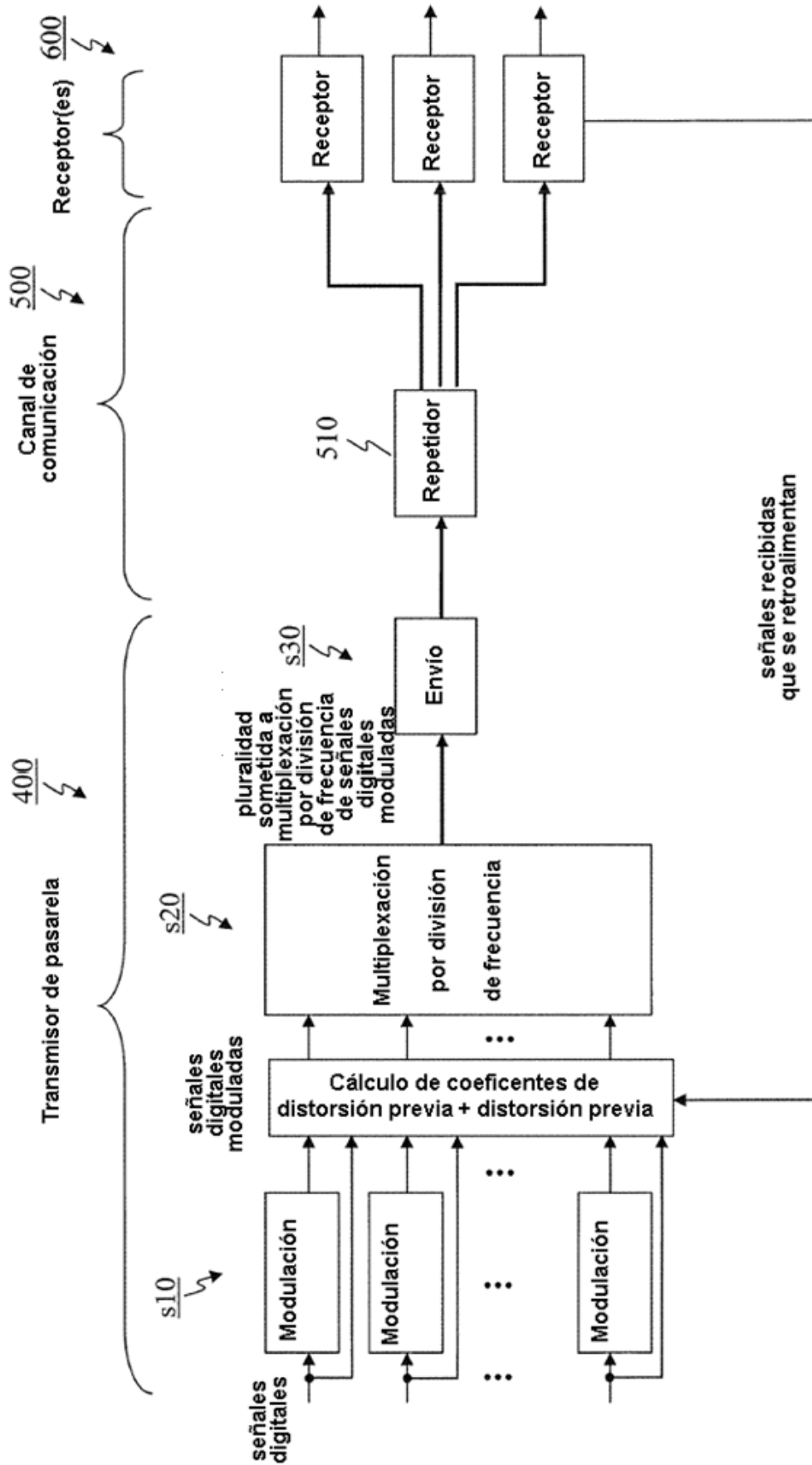


Fig. 10b

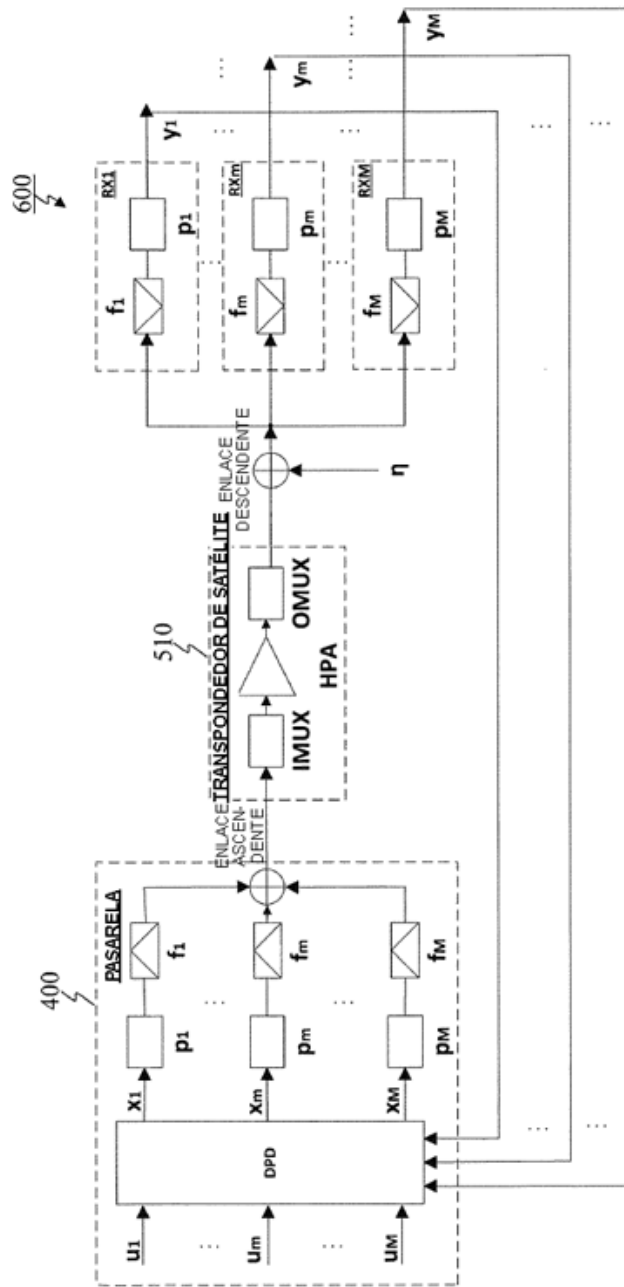


Fig. 11

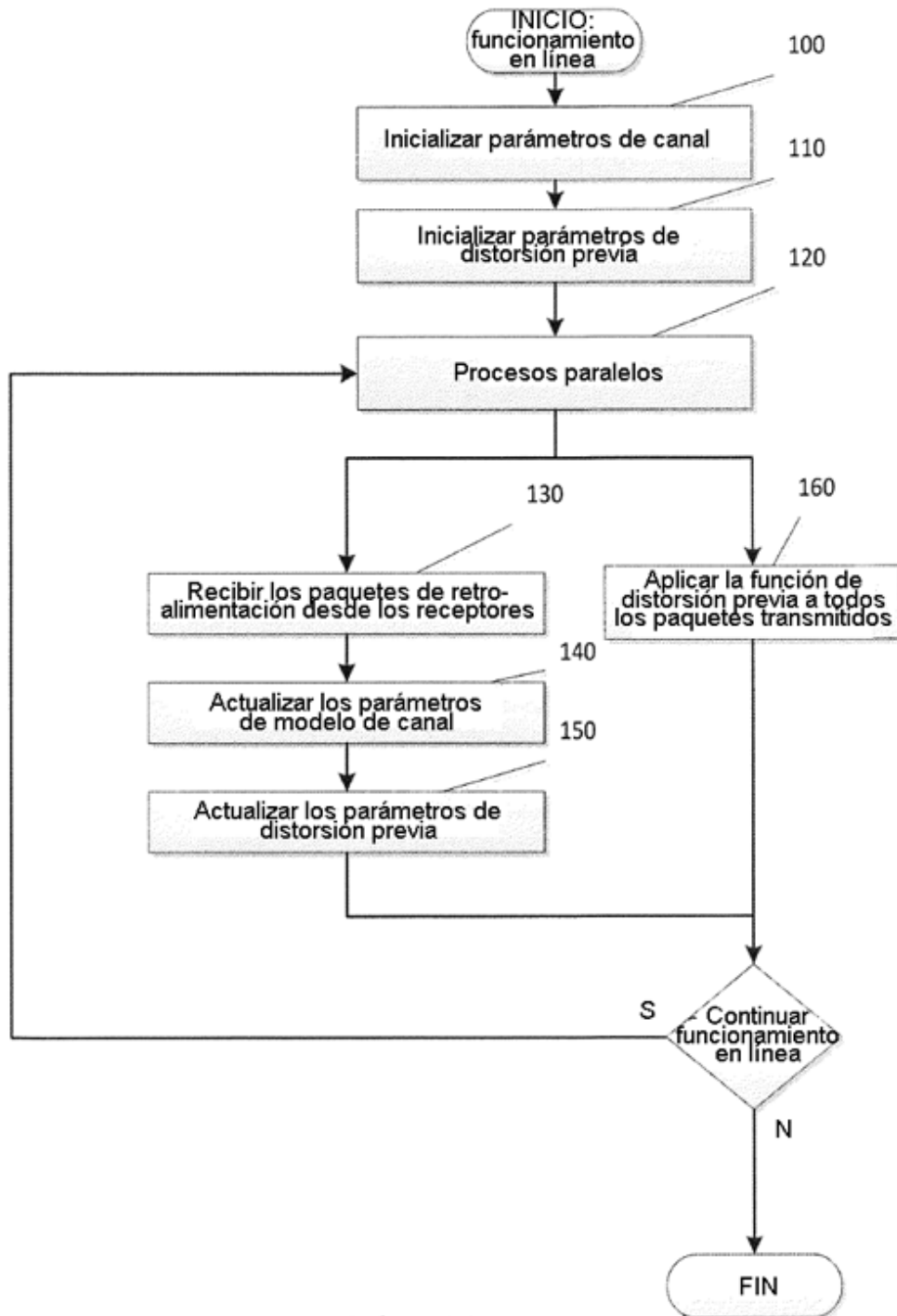


Fig. 12

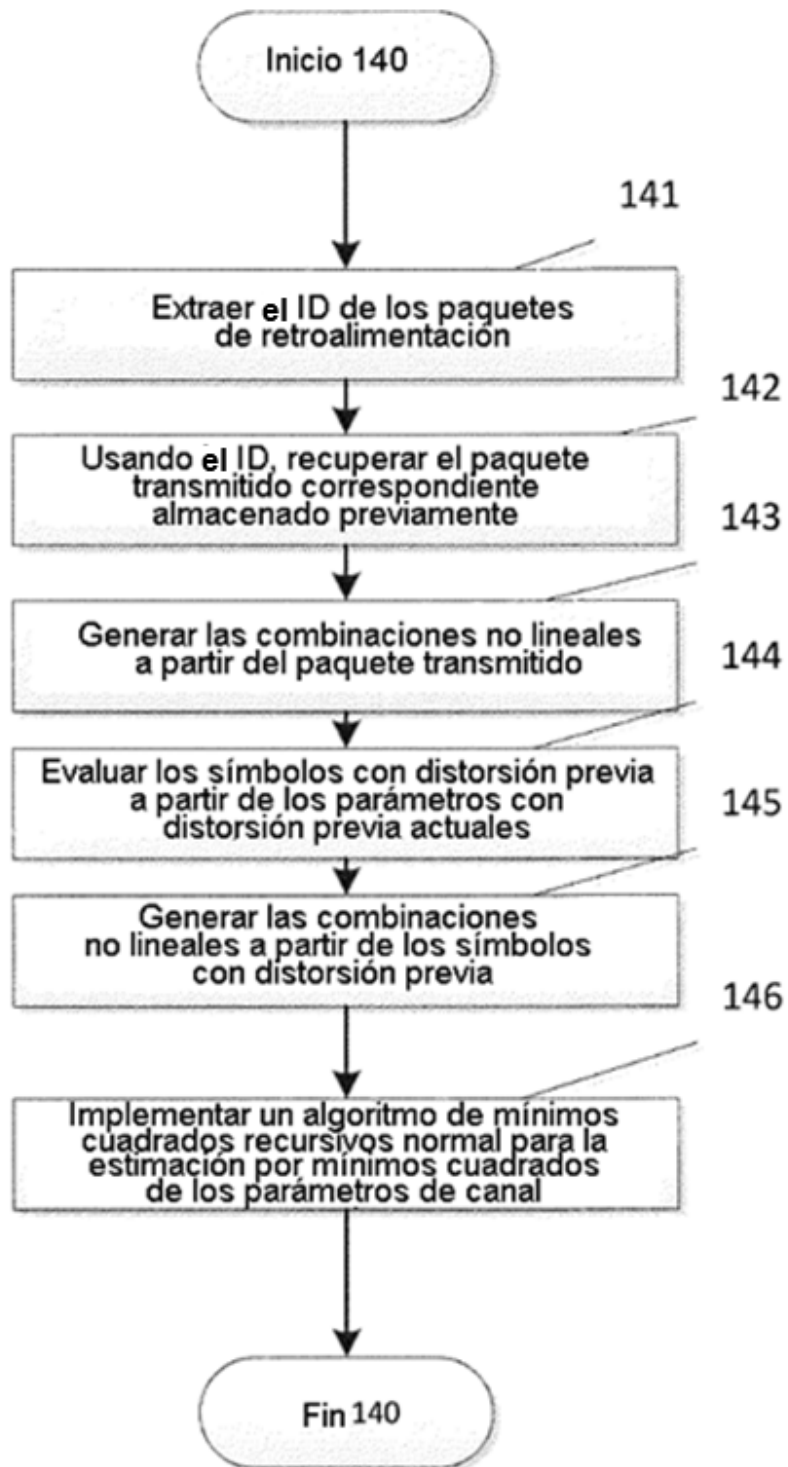


Fig. 13

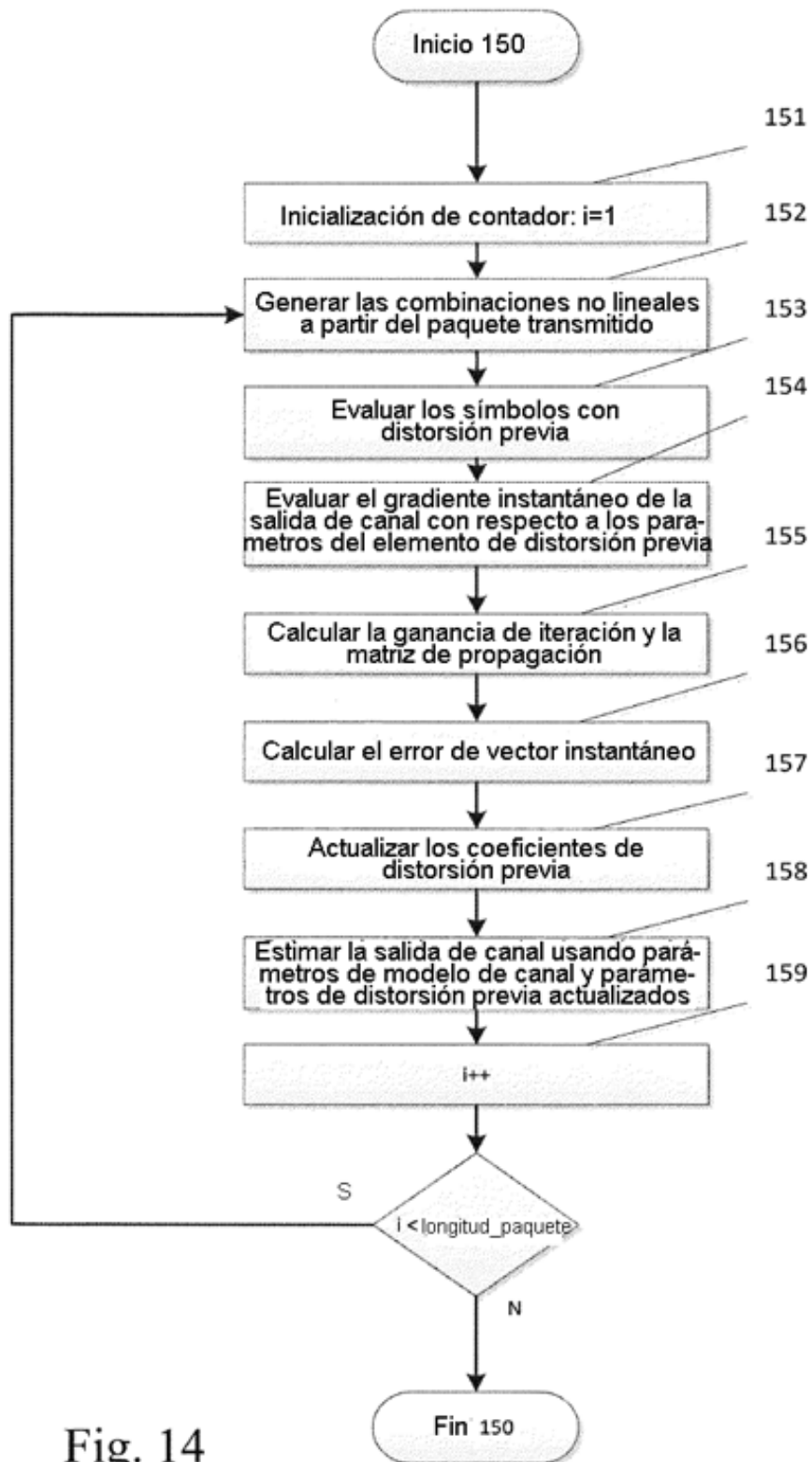


Fig. 14

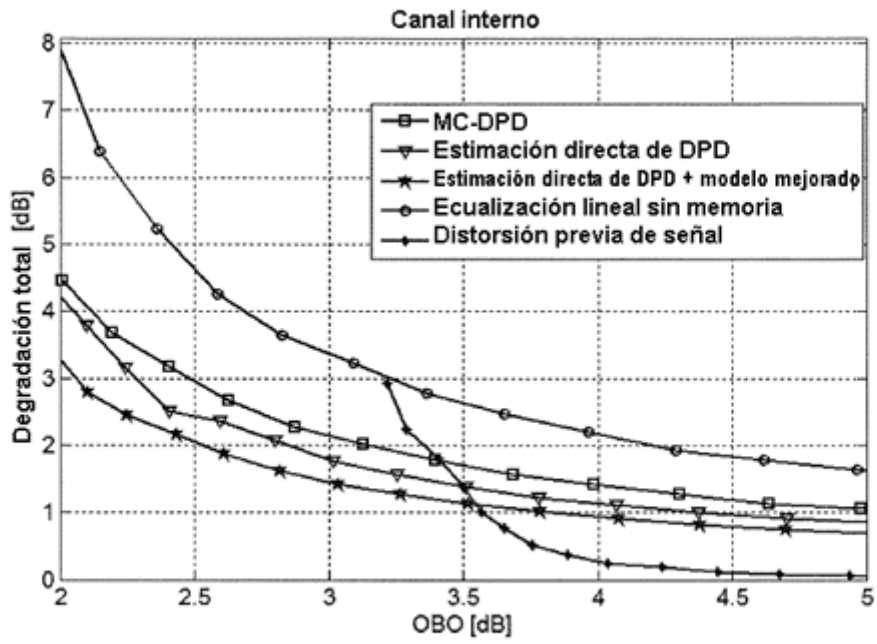


Fig. 15

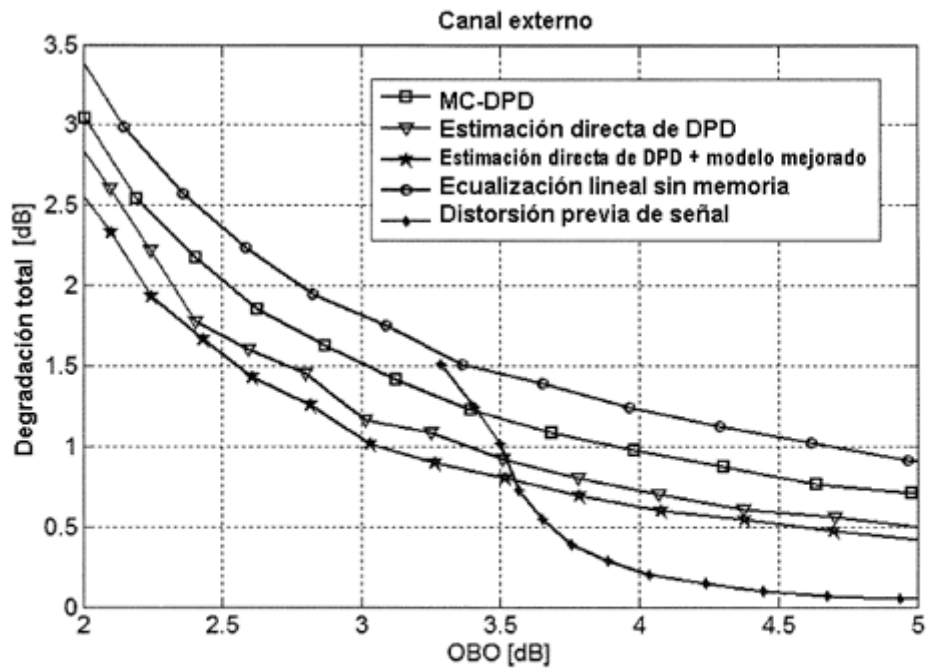


Fig. 16

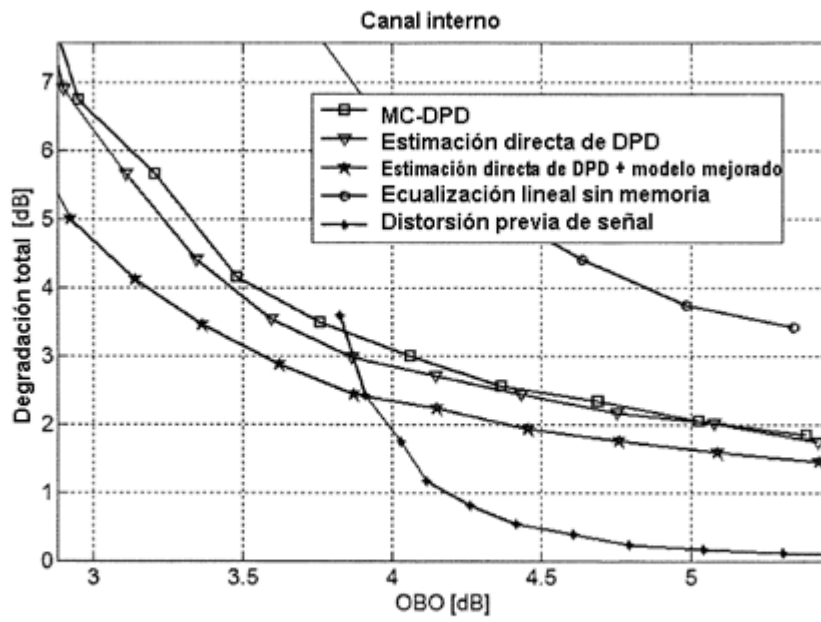


Fig. 17

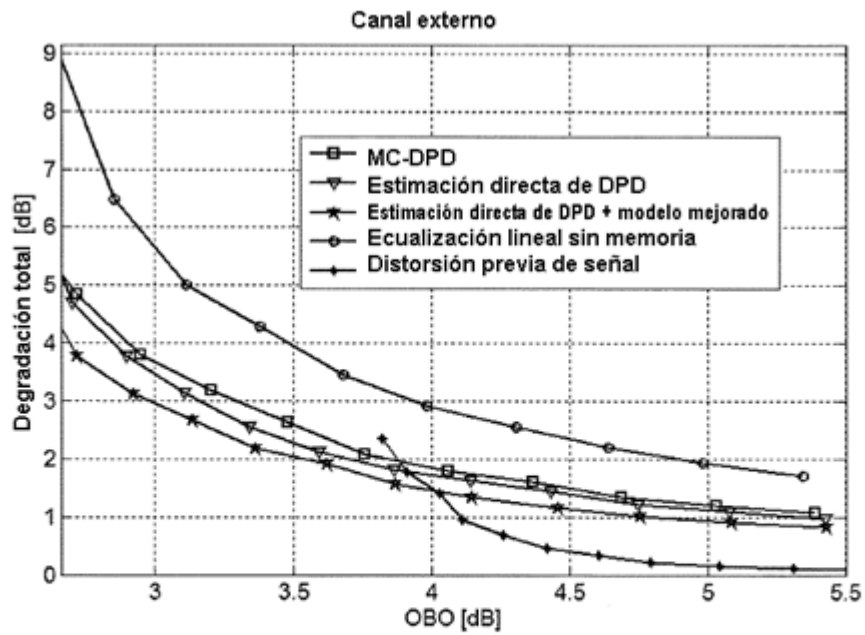


Fig. 18

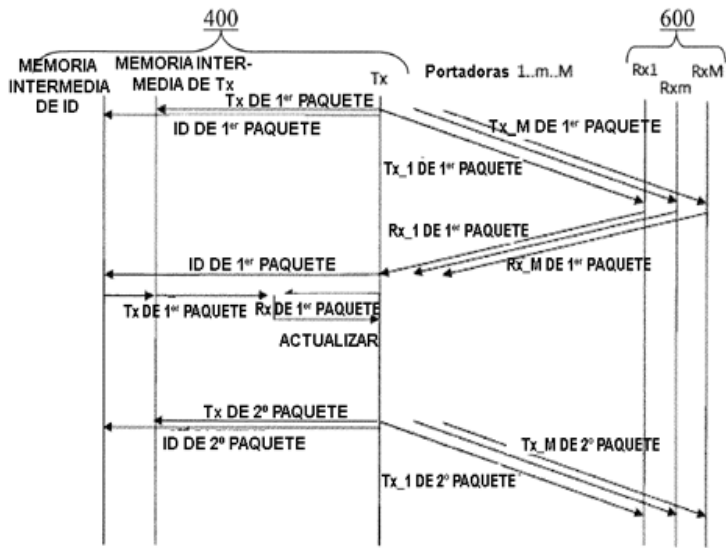


Fig. 19a

TRAMA DE PAQUETES DE DATOS:

Inicio de trama	ID de paquete	Simbolo 1	Simbolo 2	...	Simbolo n
-----------------	---------------	-----------	-----------	-----	-----------

Fig. 19b

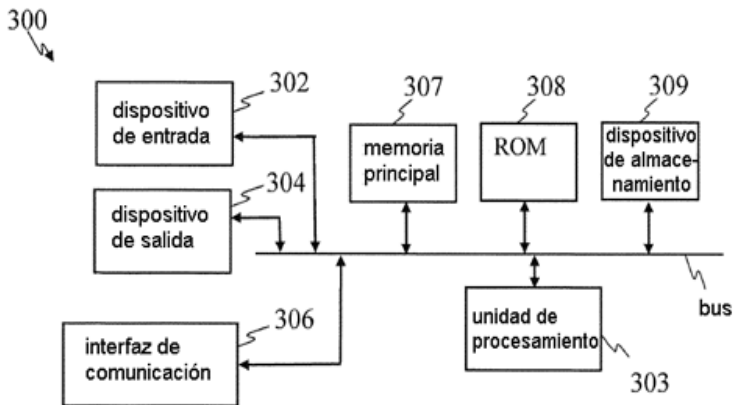


Fig. 20

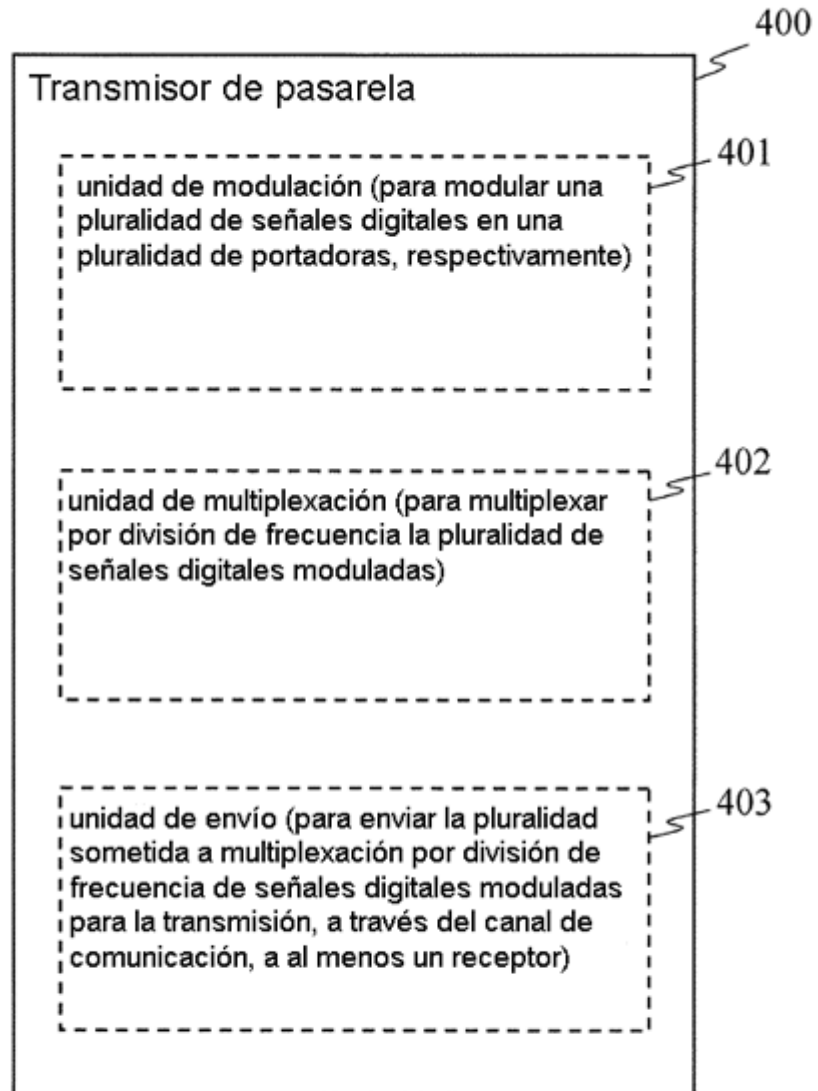


Fig. 21