

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 703 435**

51 Int. Cl.:

H04L 27/26 (2006.01)

H04B 10/079 (2013.01)

H04B 10/2513 (2013.01)

H04B 10/61 (2013.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.02.2011 PCT/CN2011/071048**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.08.2012 WO12109792**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.02.2011 E 11818936 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.10.2018 EP 2502366**

54 Título: **Estimador de dispersión cromática y método de estimación de una dispersión cromática**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
08.03.2019

73 Titular/es:
**HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD. (100.0%)
Huawei Administration Building, Bantian,
Longgang District
Shenzhen, Guangdong 518129, CN**

72 Inventor/es:
NEBOJSA, STOJANOVIC

74 Agente/Representante:
LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 703 435 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

Estimador de dispersión cromática y método de estimación de una dispersión cromática

5 CAMPO TÉCNICO

La invención se refiere al campo del procesamiento de señales digitales y, en particular, al procesamiento de señales para receptores ópticos.

10 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

En diversos sistemas de transmisión de datos, los datos se transmiten por medio de una señal óptica a través de una trayectoria óptica o canal óptico. En un receptor de dicho sistema de comunicación, la señal óptica puede transformarse en una señal eléctrica, que puede muestrearse digitalmente para un procesamiento adicional.

15 Sin embargo, la trayectoria óptica o el canal óptico puede comprender imperfecciones del canal, de manera que la señal óptica recibida comprende distorsiones introducidas por la trayectoria óptica. Una de dichas posibles distorsiones es una dispersión cromática, según la cual diferentes longitudes de onda de la señal óptica se transportan con diferentes velocidades dentro de un medio óptico de la trayectoria óptica o del canal óptico, resultando, por ejemplo, en pulsos ampliados de la señal óptica recibida. Para compensar dichas distorsiones, la señal recibida puede procesarse en consecuencia para revertir los efectos de una cierta dispersión cromática del medio óptico. Sin embargo, la dispersión cromática del medio óptico puede no conocerse de antemano, por lo que puede ser necesaria una estimación de la dispersión cromática determinada.

25 Se pueden desarrollar diversas técnicas de estimación para estimar una dispersión cromática. Por ejemplo, puede aplicarse una función de correlación automática promedio de la señal de recepción en el dominio de la frecuencia. Además, un error cuadrático medio de una señal compensada puede evaluarse para encontrar una cierta dispersión cromática. Sin embargo, dichas técnicas de estimación pueden mostrar un rendimiento degradado con respecto a la rotación de polarización o el retardo de grupo diferencial.

30 HAUSKE FN ET AL: "Estimación de la dispersión cromática en el dominio de la frecuencia", COMUNICACIÓN DE FIBRA ÓPTICA (OFC), CONFERENCIA DE INGENIEROS ÓPTICOS DE FIBRA NACIONAL COLOCADA, 2010 CONFERENCIA EN (OFC/NFOEC), IEEE, PISCATAWAY, NJ, ESTADOS UNIDOS, 21 de marzo de 2010 (21-03-2010), páginas 1-3, XP031677288 se relaciona con un algoritmo robusto y preciso, de baja complejidad, que emplea una función de autocorrelación simplificada del espectro de señal para la estimación de dispersión cromática a ciegas para adaptar la función de compensación de dominio de frecuencia en receptores digitales coherentes.

35 El documento WO 2011/000171 A1 se refiere a un filtro adaptativo que está configurado para filtrar una señal de entrada que comprende medios de transformación de Fourier, medios de ponderación, medios de correlación y medios de adaptación.

El documento WO 2010/100334 A1 se refiere a un aparato y a un método para ecualizar la dispersión cromática y un receptor óptico digital coherente.

45 Kuschnerov M ET AL: "Ecuación adaptativa de la dispersión cromática para sistemas coherentes no gestionados por dispersión" da a conocer una ecualización adaptativa a ciegas de la dispersión cromática para receptores multiplexados de polarización coherente (NRZ/RZ)-QPSK.

50 Maxim Kuschnerov ET AL: "DSP para receptores de portadora única coherentes" da a conocer un algoritmo de procesamiento de señal con estimación a ciegas para receptores de diversidad de polarización óptica coherentes de 100 G en sistemas de portadora única.

SUMARIO DE LA INVENCION

55 El objetivo de la presente invención es proporcionar un concepto eficiente para estimar una dispersión cromática de una señal de recepción óptica.

Este objeto se consigue mediante las características de las reivindicaciones independientes. Otras formas de realización son evidentes a partir de las reivindicaciones dependientes.

60 La presente invención se basa en el descubrimiento de que una señal, que se procesa con un procedimiento de compensación de dispersión cromática, que emplea una cierta dispersión cromática correspondiente a una dispersión cromática de la señal, puede filtrarse eficientemente para obtener una señal filtrada que tenga las propiedades deseadas. Por lo tanto, si una cierta dispersión cromática aplicada en un procedimiento de compensación de dispersión cromática no corresponde a la dispersión cromática de la señal, una señal filtrada con las propiedades deseadas puede no lograrse o solo lograrse parcialmente. La compensación y el filtrado se pueden

probar con diferentes dispersiones cromáticas determinadas para encontrar la dispersión cromática de la señal.

Según un primer aspecto de la idea inventiva, la invención se refiere a un estimador de dispersión cromática para
 5 estimar una dispersión cromática en un bloque de señal de entrada. El estimador de dispersión cromática
 comprende un transformador para transformar el bloque de señal de entrada en un bloque de señal transformado en
 el dominio de la frecuencia, un compensador de dispersión cromática para compensar cierta dispersión cromática en
 el bloque de señal transformado para obtener un bloque de señal transformado compensado, un transformador
 10 inverso para transformar inversamente el bloque de señal transformado compensado en el dominio temporal para
 obtener una señal de salida. El estimador de dispersión cromática comprende, además, un filtro adaptativo para
 filtrar la señal de salida para obtener una señal filtrada, y un determinador para determinar, sobre la base de la señal
 filtrada, si cierta dispersión cromática corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada.

El transformador puede ser un transformador de Fourier, y el transformador inverso puede ser un transformador de
 15 Fourier inverso. En particular, dicho transformador de Fourier y dicho transformador de Fourier inverso pueden
 emplear un algoritmo de transformada de Fourier rápida, FFT.

En el compensador de dispersión cromática, una cierta dispersión cromática dentro del bloque de señal se
 20 compensa en el dominio de la frecuencia. Después de transformar el bloque de la señal de transformación
 compensado en el dominio temporal, la señal de salida resultante se proporciona al filtro adaptativo para obtener la
 señal filtrada. La señal filtrada se evalúa dentro del determinador para encontrar si la cierta dispersión cromática
 utilizada para la compensación se eligió de manera apropiada para la dispersión cromática que está presente en el
 bloque de la señal de entrada.

De conformidad con una primera forma de puesta en práctica del primer aspecto de la idea inventiva, la invención se
 25 refiere a un estimador de dispersión cromática, en donde el filtro adaptativo está configurado para filtrar
 repetidamente la señal de salida para adaptar los coeficientes del filtro a los coeficientes de filtro adaptados, y para
 filtrar la señal de salida para obtener una señal filtrada utilizando los coeficientes de filtro adaptados. Por ejemplo, la
 señal filtrada que se evaluará en el determinador no se obtiene mediante el filtro adaptativo con una operación de
 30 filtro de una sola vez, sino con operaciones de filtro repetidas. Por lo tanto, la misma señal de salida se puede filtrar
 repetidamente para obtener una señal filtrada respectiva, en donde con cada operación de filtro, los coeficientes de
 filtro del filtro adaptativo se adaptan, por ejemplo, sobre la base de la señal de salida y los valores de señal filtrada
 respectivos de una operación previa del filtro. La señal filtrada puede proporcionarse al determinador después de un
 cierto número de operaciones de filtro repetidas, por ejemplo. Por lo tanto, una decisión del determinador de si cierta
 35 dispersión cromática corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada puede depender de un
 resultado del algoritmo de adaptación del filtro adaptativo.

De conformidad con una segunda forma de puesta en práctica del primer aspecto de la idea inventiva, la invención
 se refiere a un estimador de dispersión cromática, en donde el filtro adaptativo está configurado para adaptar los
 40 coeficientes de filtro sobre la base de un algoritmo de módulo constante mediante el filtrado repetido de la señal de
 salida. Por ejemplo, de conformidad con el algoritmo de módulo constante, el objetivo es adaptar los coeficientes de
 filtro de modo que se pueda restaurar una propiedad de módulo constante de una señal de entrada, por ejemplo, de
 tal manera que un valor absoluto sea igual o básicamente igual para todos los valores en la señal de salida, o que un
 45 valor absoluto sea mayor que un cierto valor umbral. Si la cierta dispersión cromática no corresponde a la dispersión
 cromática en el bloque de señal de entrada, este objetivo puede no lograrse con el algoritmo de módulo constante, lo
 que indica una desviación de la cierta dispersión cromática con respecto a la dispersión cromática en el bloque de
 señal de entrada.

De conformidad con una tercera forma de puesta en práctica del primer aspecto de la idea inventiva, la invención se
 50 refiere a un estimador de dispersión cromática, en donde el filtro adaptativo es un filtro de respuesta de impulso
 finito, FIR. Por ejemplo, los coeficientes de filtro del filtro FIR pueden tener un valor complejo.

Según una cuarta forma de puesta en práctica del primer aspecto de la idea inventiva, la invención se refiere a un
 55 estimador de dispersión cromática, en donde el determinador está configurado para evaluar una distribución de
 amplitud de muestras de la señal filtrada para determinar si cierta dispersión cromática corresponde a la dispersión
 cromática en el bloque de señal de entrada. Por ejemplo, se evalúa si las amplitudes de las muestras de la señal
 filtrada muestran una propiedad de módulo constante.

De conformidad con una quinta forma de puesta en práctica del primer aspecto de la idea inventiva, la invención se
 60 refiere a un estimador de dispersión cromática, en donde el determinador está configurado para determinar que la
 cierta dispersión cromática corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada, si un número de
 muestras de la señal filtrada que tienen una amplitud dentro de un cierto margen de amplitud, en particular dentro de
 un margen de amplitud circular en un plano de amplitud compleja, son iguales o más pequeñas que un valor umbral.
 Por ejemplo, si se restaura la propiedad de módulo constante de una muestra, entonces la muestra filtrada tiene una
 65 cierta amplitud o está dentro de un cierto margen de amplitud. Dicho de otro modo, dichas muestras están fuera de
 un cierto margen de amplitud, por ejemplo, un círculo interno de un plano de amplitud complejo. Si solo un número
 predefinido, a saber, el valor umbral, de muestras no cumple con los requisitos de la propiedad de módulo constante,

se puede suponer que podría lograrse el objetivo de lograr una propiedad de módulo constante de la señal filtrada. Por lo tanto, se puede suponer que la cierta dispersión cromática corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada en este caso.

5 De conformidad con una sexta forma de puesta en práctica del primer aspecto de la idea inventiva, la invención se refiere a un estimador de dispersión cromática, en donde el determinador está configurado para determinar que la cierta dispersión cromática corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada, si un número de
10 muestras de la señal filtrada que tiene una amplitud dentro de un cierto margen de amplitud, en particular dentro de un margen de amplitud circular en un plano complejo de amplitud, es más pequeña que una cantidad de
15 muestras de una señal filtrada obtenida previamente que tiene una amplitud dentro de un cierto margen de amplitud. Por ejemplo, la distribución de amplitud de una primera señal filtrada correspondiente a una primera cierta dispersión cromática se compara con una distribución de amplitud de una segunda señal filtrada de una segunda cierta dispersión cromática. Si la primera señal filtrada tiene menos muestras dentro del cierto margen de amplitud que la segunda señal filtrada, se puede suponer que la primera dispersión cromática corresponde mejor a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada que la segunda dispersión cromática.

Según una séptima forma de puesta en práctica del primer aspecto de la idea inventiva, la invención se refiere a un estimador de dispersión cromática, en donde el determinador está configurado para activar el compensador de dispersión cromática para compensar una cierta dispersión cromática adicional en el bloque de señal transformado para obtener un bloque de señal transformado compensado adicional, en particular, si la cierta dispersión cromática no corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada. El transformador inverso está configurado para transformar inversamente el bloque de señal transformado compensado adicional en el dominio temporal para obtener una señal de salida adicional. El filtro adaptativo está configurado para filtrar, de forma adaptativa, la señal de salida adicional para obtener una señal filtrada adicional, y el determinador está configurado
20 para determinar, sobre la base de la señal filtrada adicional, si la dispersión cromática adicional corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada. Por consiguiente, se pueden probar dos o más determinadas dispersiones cromáticas para encontrar la cierta dispersión cromática, que corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada. La compensación de la dispersión cromática determinada respectiva se realiza en el mismo bloque de señal transformado para todas las operaciones de compensación. Por lo tanto, los resultados de la
25 compensación, filtrado y determinación son mejores en su comparación.

De conformidad con una octava forma de puesta en práctica, la invención se refiere a un estimador de dispersión cromática, en donde el compensador de dispersión cromática está configurado para procesar el bloque de señal transformado usando una cierta función de transferencia que está asociada con una cierta dispersión cromática. Por ejemplo, los coeficientes correspondientes a dicha función de transferencia determinada pueden determinarse por anticipado sobre la base de la dispersión cromática determinada. Por ejemplo, los coeficientes CD_n^1 pueden determinarse de conformidad con

$$CD_n^1(DL) = \exp\left(-j\left(\frac{2\pi n f_s}{N}\right)^2 \frac{\lambda_0^2 DL}{4\pi c}\right),$$

40 donde λ_0 es una señal de longitud de onda, f_s es una frecuencia de muestreo, N es el tamaño de FFT, c es la velocidad de la luz, n es el número de derivación de los N coeficientes, L es una longitud de fibra y D es un coeficiente de dispersión.

Según una novena forma de puesta en práctica del primer aspecto de la idea inventiva, la invención se refiere a un estimador de dispersión cromática, en donde el compensador de dispersión cromática está configurado para compensar una pluralidad de ciertas dispersiones cromáticas en el bloque de señal transformado con el fin de que el determinador, sobre la base de una pluralidad de señales filtradas correspondientes, proporcionadas por el filtro, determine si una cierta dispersión cromática de la pluralidad de ciertas dispersiones cromáticas corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada.

50 De conformidad con una décima forma de puesta en práctica del primer aspecto de la idea inventiva, la invención se refiere a un estimador de dispersión cromática, en donde el bloque de señal de entrada incluye un primer bloque de señal asociado con una primera polarización óptica y un segundo bloque de señal asociado con una segunda polarización óptica. El transformador está configurado para obtener el bloque de señal transformado en el dominio de la frecuencia que incluye un primer bloque transformado asociado con la primera polarización óptica y un segundo bloque transformado asociado con la segunda polarización óptica. En particular, el transformador transforma el primer bloque de señal en el primer bloque transformado y transforma el segundo bloque de señal en el segundo bloque transformado. El compensador de dispersión cromática está configurado para obtener el bloque de señal transformado compensado en el dominio de la frecuencia, que incluye un primer bloque compensado asociado con la primera polarización óptica, y un segundo bloque compensado asociado con una segunda polarización óptica. En particular, el primer bloque transformado se procesa para obtener el primer bloque compensado y el segundo bloque transformado se procesa para obtener el segundo bloque compensado. El transformado inverso está configurado para obtener la señal de salida que incluye una primera señal asociada con

una primera polarización óptica y una segunda señal asociada con la segunda polarización óptica. En particular, la primera señal se obtiene a partir del primer bloque compensado y la segunda señal se obtiene a partir del segundo bloque compensado. El filtro adaptativo está configurado para filtrar la primera señal y la segunda señal para obtener la señal filtrada, que está asociada con la primera polarización óptica. En particular, el filtro adaptativo puede configurarse de modo que la primera y la segunda señales correspondientes a la primera y segunda polarización óptica se procesen para obtener la señal filtrada, que solo puede asociarse con la primera polarización óptica, pero no o solamente en una magnitud insignificante asociada con la segunda polarización óptica. Por ejemplo, el filtro adaptativo es un filtro de entrada múltiple, salida única, MISO.

De conformidad con una undécima forma de puesta en práctica del primer aspecto de la idea inventiva, la invención se refiere a un estimador de dispersión cromática, que comprende un modo de estimación para la estimación de la dispersión cromática, y un modo de compensación para compensar la dispersión cromática en un flujo de señal de entrada. El estimador de dispersión cromática comprende además una entrada para recibir el bloque de señal de entrada y un conmutador para desacoplar la entrada desde el compensador de dispersión cromática en el modo de estimación, y para acoplar la entrada al compensador de dispersión cromática en el modo de compensación. Por lo tanto, se puede conseguir que el mismo bloque transformado se proporcione al compensador de dispersión cromática en el modo de estimación para estimar la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada, mientras que los bloques de señal transformados del flujo de señal de entrada se puedan compensar en el modo de compensación.

De conformidad con un segundo aspecto, la invención se refiere a un método para estimar una dispersión cromática en un bloque de señal de entrada. De conformidad con dicho método, un bloque de señal de entrada se transforma en un bloque de señal de señal transformado en un dominio de la frecuencia. El método comprende, además, compensar una cierta dispersión cromática en un bloque de señal transformado para obtener un bloque de señal transformado compensado, la transformación inversa del bloque de señal transformado compensado, en el dominio temporal, para obtener una señal de salida, el filtrado de la señal de salida para obtener una señal filtrada y la determinación, sobre la base de la señal filtrada, de si la cierta dispersión cromática corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada.

De conformidad con algunas formas de puesta en práctica, el filtrado de la señal de salida se basa en coeficientes de filtro, en donde los coeficientes de filtro se ajustan adaptativamente sobre la base de un algoritmo de módulo constante filtrando repetidamente la señal de salida.

Otras formas de puesta en práctica del método, de conformidad con el segundo aspecto de la idea inventiva, la invención se deriva a partir de las formas de puesta en práctica descritas en conjunción con el primer aspecto de la invención.

DESCRIPCION DE LOS DIBUJOS

Se describirán formas de realización adicionales de la invención con referencia a las siguientes figuras, en las que:

la Figura 1 muestra un estimador de dispersión cromática según una forma de puesta en práctica;

la Figura 2 muestra un filtro según una forma de puesta en práctica;

la Figura 3 muestra un filtro adaptativo según una forma de puesta en práctica;

la Figura 4 muestra diagramas de constelación ejemplo, según una forma de puesta en práctica;

la Figura 5 muestra un estimador de dispersión cromática según una forma de puesta en práctica;

la Figura 6 muestra un diagrama de dispersión residual según una forma de puesta en práctica;

la Figura 7 muestra un método para estimar una dispersión cromática según una forma de puesta en práctica;

la Figura 8 muestra un diagrama de dispersión residual según una forma de puesta en práctica; y

la Figura 9 muestra un diagrama de dispersión residual según una forma de puesta en práctica.

DESCRIPCION DE LAS FORMAS DE PUESTA EN PRÁCTICA DE LA INVENCION

La Figura 1 muestra una forma de puesta en práctica de un estimador de dispersión cromática 100 que comprende un transformador 110, un compensador de dispersión cromática 120, un transformador inverso 130, un filtro adaptativo 140 y un determinador 150. El transformador 110 está configurado para transformar un bloque de señal de entrada, en su entrada, en un bloque de señal transformado en el dominio de la frecuencia, a su salida, para proporcionarle el compensador de dispersión cromática 120. Por ejemplo, el transformador 110 emplea un algoritmo

FFT y está adaptado para transformar un bloque de señal de entrada de valor complejo, en el dominio temporal, en un bloque transformado de valor complejo en el dominio de la frecuencia. El bloque de señal de entrada puede ser un bloque de valores digitalmente muestreados de una señal eléctrica, que se deriva de una señal óptica y se recibe a través de un canal óptico, por ejemplo, una fibra óptica.

5 El compensador de dispersión cromática 120 se ajusta a una cierta dispersión cromática a compensarse, por ejemplo, proporcionando un conjunto de coeficientes de compensación complejos al compensador 120, lo que da lugar a una cierta función de transferencia que se adapta para compensar la cierta dispersión cromática. Por lo tanto, en una salida del compensador 120, se proporciona un bloque de señal transformado compensador y se procesa adicionalmente por el transformador inverso 130. En particular, el transformado inverso está configurado para transferir el bloque de señal transformado compensado, en el dominio temporal, para obtener una señal de salida. Por ejemplo, en el transformado inverso, se utiliza un algoritmo FFT inverso, denominado IFFT.

15 La señal de salida se filtra en el filtro adaptativo 140 para obtener una señal filtrada, que se proporciona al determinador 150. El filtrado puede incluir varias etapas de adaptación de los coeficientes de filtro del filtro adaptativo 140, en donde la adaptación puede basarse en la señal de salida y/o la señal filtrada de cada etapa de adaptación.

20 El determinador 150 está configurado para determinar sobre la base de la señal filtrada si la cierta dispersión cromática empleada en el compensador de dispersión cromática 120 corresponde a una dispersión cromática en el bloque de señal de entrada.

25 Por ejemplo, el determinador 150 verifica si la señal filtrada, en particular la señal filtrada después de una última etapa de adaptación, tiene propiedades deseadas que indican que una dispersión cromática en el bloque de señal de entrada fue compensada satisfactoriamente con la cierta dispersión cromática, de modo que la cierta dispersión cromática corresponda a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada. Para finalidad, se puede evaluar una distribución de amplitud de la señal filtrada en el determinador 150. El procedimiento descrito anteriormente se puede repetir con una pluralidad de ciertas dispersiones cromáticas utilizadas para compensar, en el compensador 120, con el fin de encontrar la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada. Por lo tanto, la dispersión cromática del bloque de señal de entrada puede ser objeto de estimación.

35 Por ejemplo, el bloque de señal de entrada incluye un primer bloque de señal asociado con una primera polarización óptica y un segundo bloque de señal asociado con una segunda polarización óptica. Por consiguiente, el transformador 110, el compensador 120 y el transformador inverso 130 están configurados para procesar bloques respectivos asociados con la primera y la segunda polarización óptica. Por lo tanto, también la señal de salida comprende una primera señal y una segunda señal asociadas con la primera y la segunda polarización óptica, respectivamente.

40 La Figura 2 muestra una forma de puesta en práctica de un filtro adaptativo 200, que está configurado para procesar dos señales de entrada de valor complejo, por ejemplo, la primera señal y la segunda señal. A modo ejemplo, la primera señal está asociada con una polarización X y puede expresarse como una señal de valor complejo

$$\bar{U}_X = \bar{I}_X + j\bar{Q}_X,$$

45 y la segunda señal está asociada con una polarización Y y puede expresarse como una señal de valor complejo

$$\bar{U}_Y = \bar{I}_Y + j\bar{Q}_Y.$$

50 El filtro 200 es un filtro de entrada múltiple, salida múltiple, MIMO, con dos entradas y dos salidas. El filtro 200 comprende cuatro bloques de filtro 210, 220, 230 y 240, en donde el bloque de filtro 210 pertenece a una relación de X a X, el bloque de filtro 220 pertenece a una relación Y a X, el bloque de filtro 230 pertenece a una relación de X a Y y el bloque de filtro 240 pertenecen a una relación de Y a Y. Por consiguiente, las salidas de los bloques de filtro 210, 220 se suman en un primer elemento sumador 250, y las salidas de los bloques de filtro 230, 240 se suman en un segundo elemento sumador 260.

55 Por lo tanto, el filtro 200 proporciona dos valores complejos.

$$\bar{m}_X = \bar{W}_X^H \bar{U}_X, \quad \bar{m}_Y = \bar{W}_Y^H \bar{U}_Y,$$

60 en donde

$$\bar{\mathbf{U}}_X = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{u}}_X \\ \bar{\mathbf{u}}_Y \end{pmatrix}; \bar{\mathbf{W}}_X = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{h}}_{XX} \\ \bar{\mathbf{h}}_{YX} \end{pmatrix}; \bar{\mathbf{U}}_Y = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{u}}_Y \\ \bar{\mathbf{u}}_X \end{pmatrix}; \bar{\mathbf{W}}_Y = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{h}}_{YY} \\ \bar{\mathbf{h}}_{XY} \end{pmatrix}$$

y donde los vectores complejos $\bar{\mathbf{h}}$ representan coeficientes de filtro complejos.

5 Los elementos de adaptación del filtro 200 no se muestran aquí por razones de una mejor visión general. Sin embargo, los coeficientes de los bloques de filtro 210, 220, 230, 240 se adaptan de manera que una constelación deseada de muestras de la señal filtrada puede lograr una distribución deseada en el plano complejo.

10 La Figura 3 muestra una forma de puesta en práctica de un filtro adaptativo 300 que se realiza como un filtro MISO con dos entradas de filtro y una salida de filtro. El filtro 300 comprende un primer y un segundo bloque de filtro 310, 320 y un elemento sumador 350. Por ejemplo, los bloques de filtro 310, 320 pueden corresponder a dos bloques de filtro 210, 220 del filtro 200, mientras que el elemento sumador 350 corresponde al primer elemento sumador 250. El filtro 300 comprende, además, un bloque de adaptación 360 que está configurado para realizar un cálculo de adaptación de los coeficientes de filtro o derivaciones de los bloques de filtro 310, 320. Por ejemplo, las derivaciones

15 de filtro se actualizan utilizando un algoritmo de módulo constante, CMA, que toma las señales de salida $\bar{\mathbf{U}}_X, \bar{\mathbf{U}}_Y$ y la señal filtrada $\bar{\mathbf{m}}_X$ como entrada para el bloque de adaptación 360. Por ejemplo, las derivaciones de filtro o los coeficientes de filtro se actualizan de conformidad con:

$$\bar{\mathbf{W}}_{k+1} = (1 - \alpha) \bar{\mathbf{W}}_k + \mu \mathbf{e}_k \bar{\mathbf{m}}_k^* \bar{\mathbf{U}}_k,$$

20 con

$$\mathbf{e}_k = 1 - |\bar{\mathbf{m}}_k|^2,$$

25 donde μ es un coeficiente de actualización, k es un número de iteraciones del algoritmo de adaptación y α es un factor de fuga. El error \mathbf{e}_k se calcula utilizando muestras de la polarización X en este ejemplo.

30 En la Figura 4, se muestran las constelaciones de señales de las señales QPSK, a modo de ejemplo, para una polarización X y una polarización Y. La Figura 4A muestra la constelación de señales de las muestras antes del filtro adaptativo, y la Figura 4B muestra la constelación de señales después del filtrado. Se puede ver que, después del filtrado FIR, la constelación de salida está dispuesta circularmente alrededor del origen en el plano complejo, y fuera del margen prohibido o no deseado indicado por el círculo.

35 En las señales de la Figura 4, la cierta dispersión cromática empleada en el compensador de dispersión cromática corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada, de modo que el filtro fue capaz de adaptarse para restablecer la propiedad de módulo constante dentro de la señal filtrada.

40 Si una dispersión residual, RD, es decir, la dispersión cromática restante dentro de la señal compensada, es demasiado alta porque la cierta dispersión cromática no corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada, es posible que el filtro no pueda limpiar el área dentro del círculo. Por lo tanto, si varias muestras en la señal filtrada están situadas dentro del círculo, es decir, tienen una amplitud menor que el radio del círculo, es más pequeño que un umbral, entonces se puede suponer que una dispersión residual es negligentemente pequeña y la cierta dispersión cromática empleada en el compensador de dispersión cromática corresponde a la dispersión cromática real en el bloque de señal de entrada.

45 Por ejemplo, el filtro adaptativo es capaz de realizar un desacoplamiento de polarización, una dispersión de modo de fase, PMD, una compensación y una compensación de dispersión cromática residual. Un número de coeficientes de cada uno de los bloques de filtro puede estar en el margen de 9 a 15 derivaciones, por ejemplo, si se van a procesar dos muestras por intervalo de símbolo.

50 La Figura 5 muestra una forma de puesta en práctica adicional de un estimador de dispersión cromática 500. El estimador de dispersión cromática 500 comprende un primer bloque de procesamiento 510, que puede materializarse en hardware, y un segundo bloque de procesamiento 520, que puede materializarse en software. Por ejemplo, por medio de un procesador de señal digital.

55 El primer bloque de procesamiento 510 comprende transformadores 530, 531 para realizar una transformación de un bloque de señal de entrada en el dominio de la frecuencia para la polarización X y la polarización Y,

respectivamente. Las salidas de los transformadores 530, 531 están conectadas a los bloques de datos 540, 541 para almacenar los bloques de señales transformados por medio de los conmutadores 535, 536. Si los conmutadores 535, 536 están cerrados, se pueden proporcionar nuevos datos de salida de los transformadores 530, 531 a los bloques de datos 540, 541. Sin embargo, el contenido de los bloques de datos 540, 541 permanece sin cambios, si los conmutadores 535, 536 están abiertos. Los bloques de señal almacenados en los bloques de datos 540, 541 se proporcionan a los compensadores de dispersión cromática 545, 546 que realizan una compensación con una cierta dispersión cromática proporcionada por el segundo bloque de procesamiento 520. Los bloques compensados, que son emitidos por los compensadores de dispersión cromática 545, 546, se transforman inversamente al dominio temporal por los transformadores inversos 550, 551.

El segundo bloque de procesamiento 520 comprende un bloque de carga 560, un filtro FIR 570, un determinador 580 y un bloque de control 590. El bloque de carga 560 está configurado para cargar un cierto número de muestras de salida de los transformadores inversos 550, 551 para procesamiento adicional por el filtro adaptativo 570. Por ejemplo, el filtro adaptativo 570 puede realizarse según las formas de puesta en práctica descritas para los filtros 200 y 300 anteriores. La señal filtrada es evaluada por el determinador 580, por ejemplo, para determinar si una constelación de señales de la señal filtrada cumple con el requisito de distribución de amplitud deseado como se describe de conformidad con la Figura 4. El resultado de la evaluación se puede almacenar, por ejemplo, para una posterior comparación con otros resultados de la evaluación. En particular, mediante el bloque de control 590, se puede cargar otra cierta dispersión cromática en los compensadores 555, 556 con el fin de que los compensadores 555, 556 procesen los bloques de señal almacenados en los bloques de datos 540, 541 con una dispersión cromática diferente.

A modo de ejemplo, la cierta dispersión cromática, en la que se basan la compensación y los compensadores 545, 546, se intercambia en un rango predefinido de dispersiones cromáticas con una etapa predeterminada. Los mismos bloques de señal se compensan y se proporcionan al segundo bloque de procesamiento 520, de manera que para cada bloque compensado se realiza una operación de filtrado con la adaptación de los coeficientes del filtro. Además, para cada señal filtrada, se realiza una evaluación, en particular una determinación de una dispersión residual y/o una evaluación de la distribución de amplitud de la señal filtrada. Después de la última evaluación u operación de filtrado, respectivamente, una de las determinadas dispersiones cromáticas, que se utilizaron para la compensación, puede elegirse como la dispersión cromática estimada en el bloque de señal de entrada, por ejemplo, la que tiene la menor dispersión residual.

Por ejemplo, si se aplica un método FFT "adición y seguridad", la mitad de las muestras en medio de un bloque de datos prospectivos se compensan correctamente por dispersión cromática en el bloque de salida compensado. Por lo tanto, la mitad de las muestras procedentes de la mitad del bloque de salida de IFFT pueden cargarse en el segundo bloque de procesamiento 520. El número de muestras cargadas puede ser menor, pero no debería ser mayor, si se utiliza el método de FFT mencionado anteriormente. Por lo tanto, si se asume un tamaño FFT $N = 1024$, se pueden pasar 512 muestras a través del filtro 570. Suponiendo M derivaciones para los filtros, el filtro puede ejecutarse $N/2 - M + 1$ veces, de manera que $N/2 - M + 1$ muestras de salida estén disponibles. Cada muestra de salida se puede utilizar para la actualización de las tomas de filtro. Este procedimiento puede repetirse L veces para cada valor de la dispersión cromática RD desde una mínima dispersión cromática RD_{min} hasta un máximo valor de la dispersión cromática RD_{max} con un tamaño de paso de RDS . Las muestras de salida dentro de un ciclo definido por su radio R en el plano complejo se pueden contar para cada valor de RD para ambas polarizaciones y se pueden almacenar en un parámetro de error $RDE(i)$, donde i indica un i -ésimo valor de RD . Por último, se puede seleccionar el valor de RD que produce el mínimo de RDE . La estimación puede mejorarse aún más, si se utiliza el mínimo vecino más próximo para la interpolación RD .

Suponiendo que estos valores son $RD(i)$ y $RD(i + 1)$, entonces el valor interpolado se puede calcular mediante

$$RD_{est} = RD(k) + \frac{RDS}{\sqrt{\frac{RDE(k+1) + \xi}{RDE(k) + \xi} + 1}}$$

donde $\xi \ll 1$ puede usarse para evitar una división por cero.

La Figura 6 muestra un diagrama de dispersión residual a modo de ejemplo, en el que el número de muestras dentro del radio de amplitud R se muestra sobre los valores de RD utilizados para la compensación. Por lo tanto, en este ejemplo, se puede suponer una dispersión cromática de 10.000 ps/nm para la señal de entrada.

La Figura 7 muestra un diagrama de flujo del método de estimación de dispersión cromática que puede realizarse en las disposiciones descritas anteriormente. En la etapa 701, se configuran los parámetros del algoritmo de estimación, por ejemplo, valores para RD_{min} , RDS , RD_{max} , tamaño de FFT N , longitud de filtro M o el número de repeticiones de filtro L . Los bloques de señales de entrada se transforman a dominio de la frecuencia en el bloque 705 y se congelan de modo que los mismos bloques transformados puedan usarse para todas las operaciones

posteriores.

5 En la etapa 710, se inicia un bucle sobre valores de dispersión cromática RD con un valor de dispersión cromática mínimo RDmin que se incrementa en un RDS de tamaño de etapa hasta un valor máximo de distorsión cromática RDmax.

10 En la etapa 715, una dispersión cromática en el bloque de señal transformado se compensa con el valor real de RD. El bloque compensado se transforma a dominio temporal mediante una FFT inversa en la etapa 720. Suponiendo un FFT de tamaño N se cargan N/2 muestras de la señal de salida del dominio temporal a un software de evaluación, por ejemplo, materializado en el segundo bloque de procesamiento 520, que se puede realizar con un procesador de señal digital.

15 En la etapa 730, se inicia un bucle sobre L iteraciones para el procesamiento del filtro. En el bloque 735, se inicia un bucle para calcular N/2-M + 1 muestras de salida de un filtro, en donde en la etapa 740 se calculan las muestras de salida del filtro FIR, y en la etapa 745 se actualizan los coeficientes del filtro FIR utilizando un algoritmo de módulo constante, CMA. En la etapa 750, se cierra un bucle a la etapa 735, mientras que en la etapa 755, se cierra el bucle respectivo a la etapa 730.

20 Después de finalizar los bucles de filtro, en la etapa 760, se calcula un valor de error RDE para el valor RD real. En la etapa 765, se establece un bucle de retorno a la etapa 710 para seleccionar el siguiente valor de RD o, si se ha alcanzado RDmax, se continúa con la etapa 770. En la etapa 770, se encuentra el valor de RDE mínimo y se puede seleccionar el respectivo valor de RD para dispersión cromática. El método puede interrumpirse en este punto. Sin embargo, para mejorar posiblemente el resultado de la estimación de la dispersión cromática, se pueden seleccionar los mínimos RDE próximos y se podría iniciar una interpolación, en la etapa 775. Por último, en la etapa 780, se puede proporcionar la dispersión cromática estimada basada en el valor RD seleccionado.

30 Con respecto a la interpolación, la Figura 8 muestra un diagrama de dispersión residual, en el que se puede observar que se encuentran dos valores RD RD1, RD2 con un número bajo comparable de muestras dentro del círculo. Por lo tanto, se puede suponer que se puede encontrar un mínimo de RDE entre los valores de dispersión cromática RD1, RD2. En consecuencia, un procedimiento similar al descrito anteriormente se puede repetir con nuevos valores para RDmin y RDmax, a saber, RDmin = RD1 y RDmax = RD2. En consecuencia, se puede elegir un RDS de tamaño de etapa más pequeño.

35 Como resultado, la Figura 9 muestra un diagrama de dispersión residual a modo de ejemplo con la estimación repetida de la dispersión cromática, que resulta en un mínimo para los valores de RD de aproximadamente 9950 ps/nm y 10000 ps/nm marcado con un círculo. El procedimiento puede repetirse de nuevo, o uno de los dos valores de RD podría tomarse como la dispersión cromática estimada.

40

45

REIVINDICACIONES

1. Estimador de dispersión cromática (100, 500) para estimar una dispersión cromática en un bloque de señal de entrada, comprendiendo el estimador de dispersión cromática (100, 500):
- 5 un transformador (110, 530, 531) para transformar el bloque de señal de entrada en un bloque de señal transformado en el dominio de la frecuencia;
- 10 un compensador de dispersión cromática (120, 545, 546) para compensar una cierta dispersión cromática en el bloque de señal transformado para obtener un bloque de señal transformado compensado;
- un transformador inverso (130, 550, 551) para transformar inversamente el bloque de señal transformado compensada en el dominio temporal para obtener una señal de salida;
- 15 un filtro adaptativo (140, 200, 300, 570) para filtrar la señal de salida para obtener una señal filtrada; y
- un determinador (150, 580) para determinar sobre la base de la señal filtrada si la cierta dispersión cromática corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada;
- 20 caracterizado por cuanto que
- el filtro adaptativo (140, 200, 300, 570) está configurado para filtrar repetidamente la señal de salida para adaptar los coeficientes de filtro sobre la base de un algoritmo de módulo constante hacia coeficientes de filtro adaptados; y
- 25 el determinador (150, 580) está configurado para determinar sobre la base de la señal filtrada si la señal filtrada tiene propiedades deseadas que indican que una dispersión cromática en el bloque de señal de entrada se compensó satisfactoriamente con dicha dispersión cromática correspondiente a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada.
- 30 2. El estimador de dispersión cromática (100, 500) según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el filtro adaptativo (140, 200, 300, 570) es un filtro de respuesta de impulso finito.
3. El estimador de dispersión cromática (100, 500) según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el determinador (150, 580) está configurado para evaluar una distribución de amplitud de muestras de la
- 35 señal filtrada para determinar si cierta dispersión cromática corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada.
4. El estimador de dispersión cromática (100, 500) según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el determinador (150, 580) está configurado para determinar que la cierta dispersión cromática corresponde a
- 40 la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada si un número de muestras de la señal filtrada que tiene una amplitud dentro de un cierto margen de amplitud, en particular dentro de un margen de amplitud circular en un plano de amplitud compleja, es igual o menor que un umbral.
5. El estimador de dispersión cromática (100, 500) según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el determinador (150, 580) está configurado para determinar que la cierta dispersión cromática corresponde a
- 45 la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada si un número de muestras de la señal filtrada que tiene una amplitud dentro de un cierto margen de amplitud, en particular dentro de un margen de amplitud circular en un plano complejo de amplitud, es más pequeña que un número de muestras de una señal filtrada obtenida previamente que tiene una amplitud dentro de cierto margen de amplitud.
- 50 6. El estimador de dispersión cromática (100, 500) según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el determinador (150, 580) está configurado para activar el compensador de dispersión cromática (120, 545, 546) para compensar una cierta dispersión cromática adicional en el bloque de señal transformado para obtener un
- 55 bloque de señal transformado compensado adicional si la dispersión cromática determinada no corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada, en donde el transformador inverso (130, 550, 551) está configurado para transformar inversamente el bloque de señal transformado compensada adicional en el dominio temporal para obtener una señal de salida adicional, en donde el filtro adaptativo (140, 200, 300, 570) está configurado para filtrar, de manera adaptativa, la señal de salida adicional para obtener una señal filtrada adicional, y
- 60 en donde el determinador (150, 580) está configurado para determinar sobre la base de la señal filtrada adicional si la dispersión cromática determinada adicional corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada.
7. El estimador de dispersión cromática (100, 500) según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el compensador de dispersión cromática (120, 545, 546) está configurado para procesar el bloque de señal
- 65 transformado utilizando una cierta función de transferencia que está asociada con la cierta dispersión cromática.

- 5 8. El estimador de dispersión cromática (100, 500) según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el compensador de dispersión cromática (120, 545, 546) está configurado para compensar una pluralidad de ciertas dispersiones cromáticas en el bloque de señal transformado con el fin de que el determinador (150, 580) determine, sobre la base de una pluralidad de señales filtradas correspondientes proporcionadas por el filtro (140, 200, 300, 570), que cierta dispersión cromática de la pluralidad de ciertas dispersiones cromáticas corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada.
- 10 9. El estimador de dispersión cromática (100, 500) según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el bloque de señal de entrada incluye un primer bloque de señal asociado con una primera polarización óptica y un segundo bloque de señal asociado con una segunda polarización óptica;
- 15 en donde el transformador (110, 530, 531) está configurado para obtener el bloque de señal transformado en el dominio de la frecuencia que incluye un primer bloque transformado asociado con la primera polarización óptica y un segundo bloque transformado asociado con la segunda polarización óptica;
- 20 en donde el compensador de dispersión cromática (120, 545, 546) está configurado para obtener el bloque de señal transformado compensado en el dominio de la frecuencia que incluye un primer bloque compensado asociado con la primera polarización óptica y un segundo bloque compensado asociado con la segunda polarización óptica;
- 25 en donde el transformador inverso (130, 550, 551) está configurado para obtener la señal de salida que incluye una primera señal asociada con la primera polarización óptica y una segunda señal asociada con la segunda polarización óptica; y
- en donde el filtro adaptativo (140, 300, 570) está configurado para filtrar la primera señal y la segunda señal para obtener la señal filtrada que está asociada con la primera polarización óptica.
- 30 10. El estimador de dispersión cromática (100, 500) según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el transformador (110, 530, 531) es un transformador de Fourier, y en donde el transformador inverso (130, 550, 551) es un transformador de Fourier inverso.
- 35 11. El estimador de dispersión cromática (100, 500) según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende un modo de estimación para la estimación de la dispersión cromática y un modo de compensación para compensar la dispersión cromática en un flujo de señal de entrada, en donde el estimador de dispersión cromática (100, 500) comprende, además, una entrada para recibir el bloque de señal de entrada, y un conmutador (535, 536) para desacoplar la entrada del compensador de dispersión cromática (120, 545, 546) en el modo de estimación, y para acoplar la entrada al compensador de dispersión cromática (120, 545, 546) en el modo de compensación.
- 40 12. Método para estimar una dispersión cromática en un bloque de señal de entrada, comprendiendo dicho método:
- 45 transformar un bloque de señal de entrada en un bloque de señal transformado en el dominio de la frecuencia;
- compensar una cierta dispersión cromática en el bloque de señal transformado para obtener un bloque de señal transformado compensado;
- 50 transformar inversamente el bloque de señal transformado compensado en el dominio temporal para obtener una señal de salida;
- filtrar la señal de salida para obtener una señal filtrada; y
- 55 determinar sobre la base de la señal filtrada si la cierta dispersión cromática corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada;
- caracterizado por
- 60 filtrar repetidamente la señal de salida para adaptar los coeficientes de filtro sobre la base de un algoritmo de módulo constante hacia coeficientes de filtro adaptados; y
- determinar sobre la base de la señal filtrada si la señal filtrada tiene propiedades deseadas que indican que una dispersión cromática en el bloque de señal de entrada se compensó satisfactoriamente con la dispersión cromática determinada que corresponde a la dispersión cromática en el bloque de señal de entrada.
- 65

Fig. 1

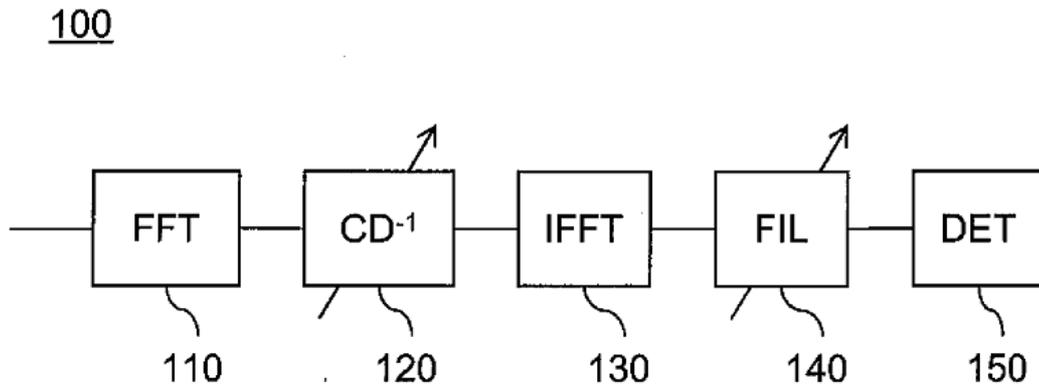


Fig. 2

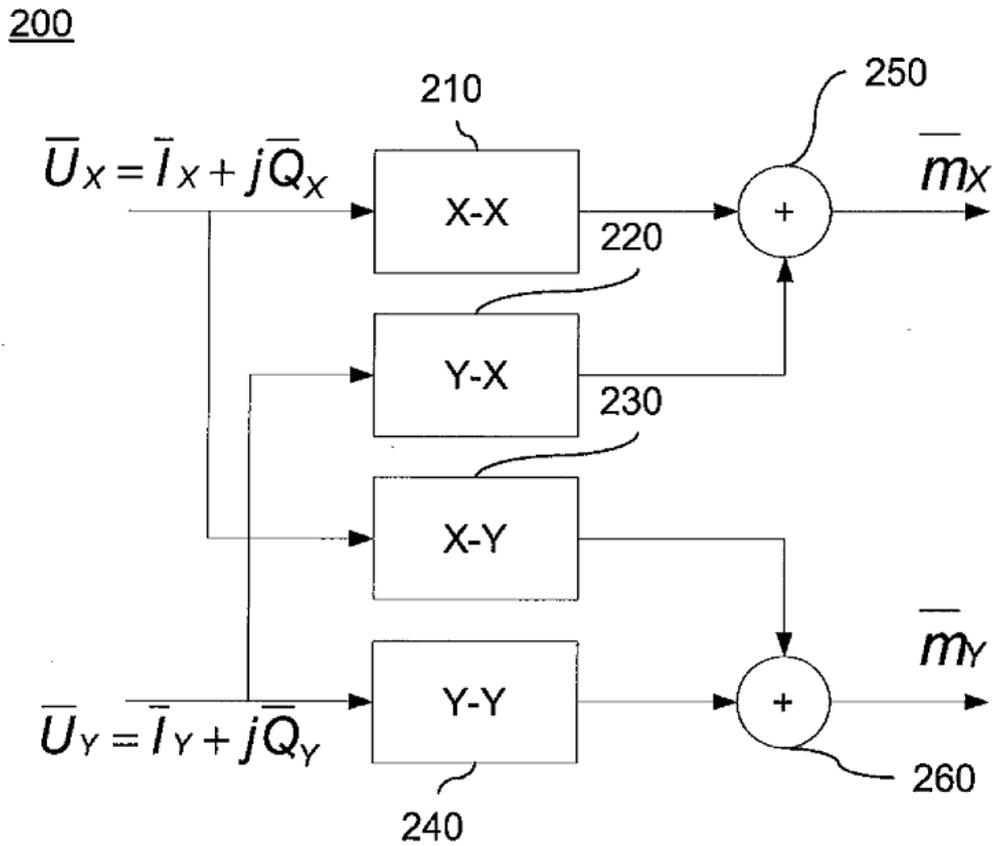


Fig. 3

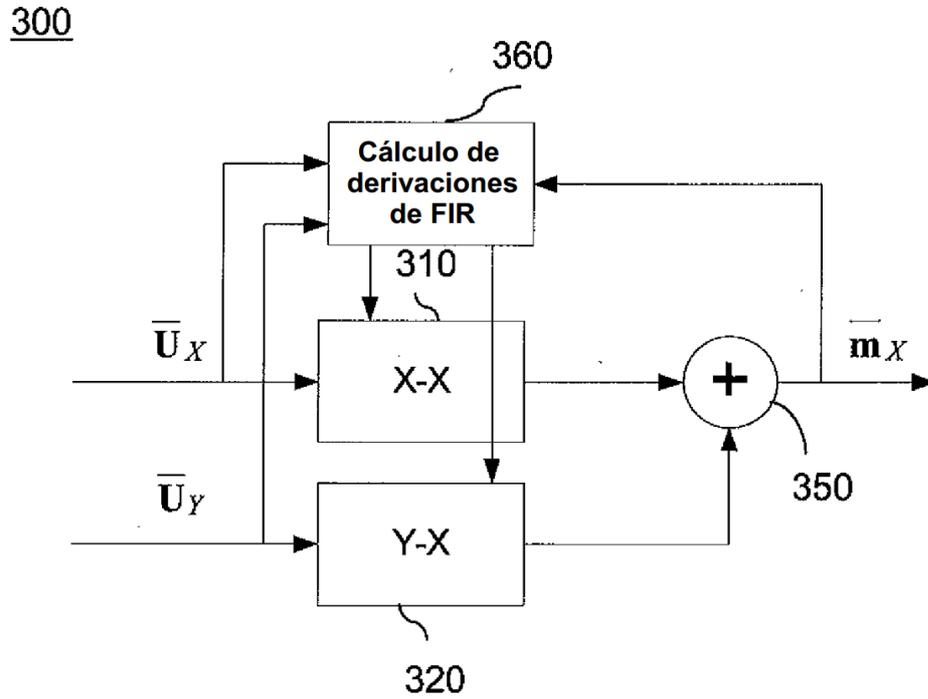


Fig. 4

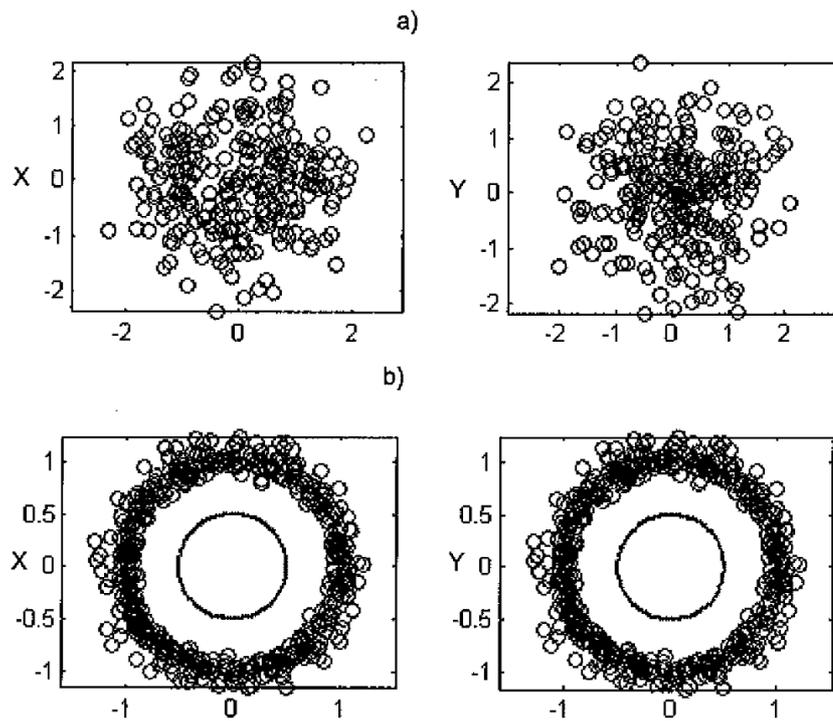


Fig. 5

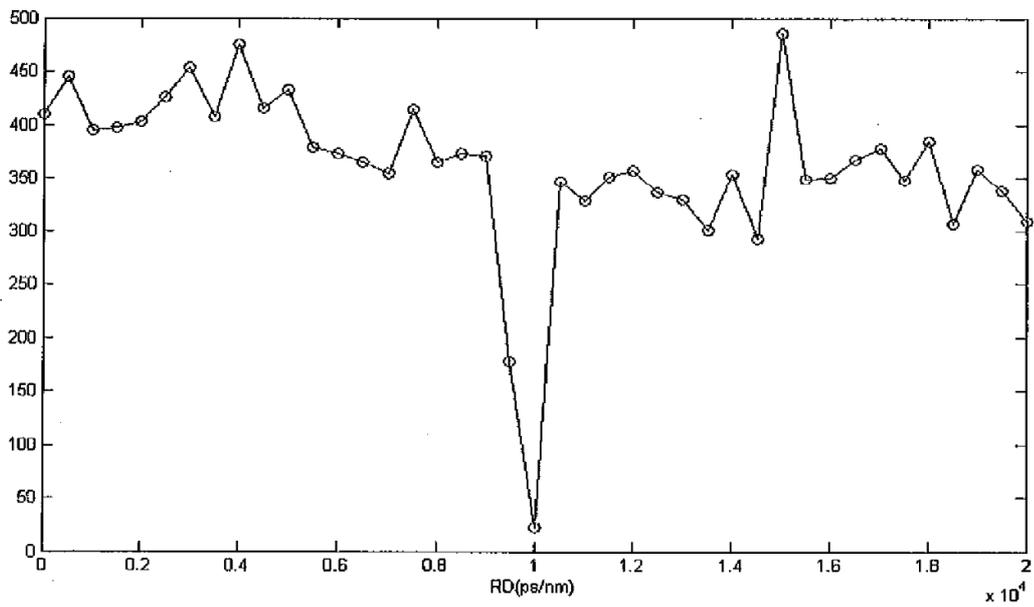
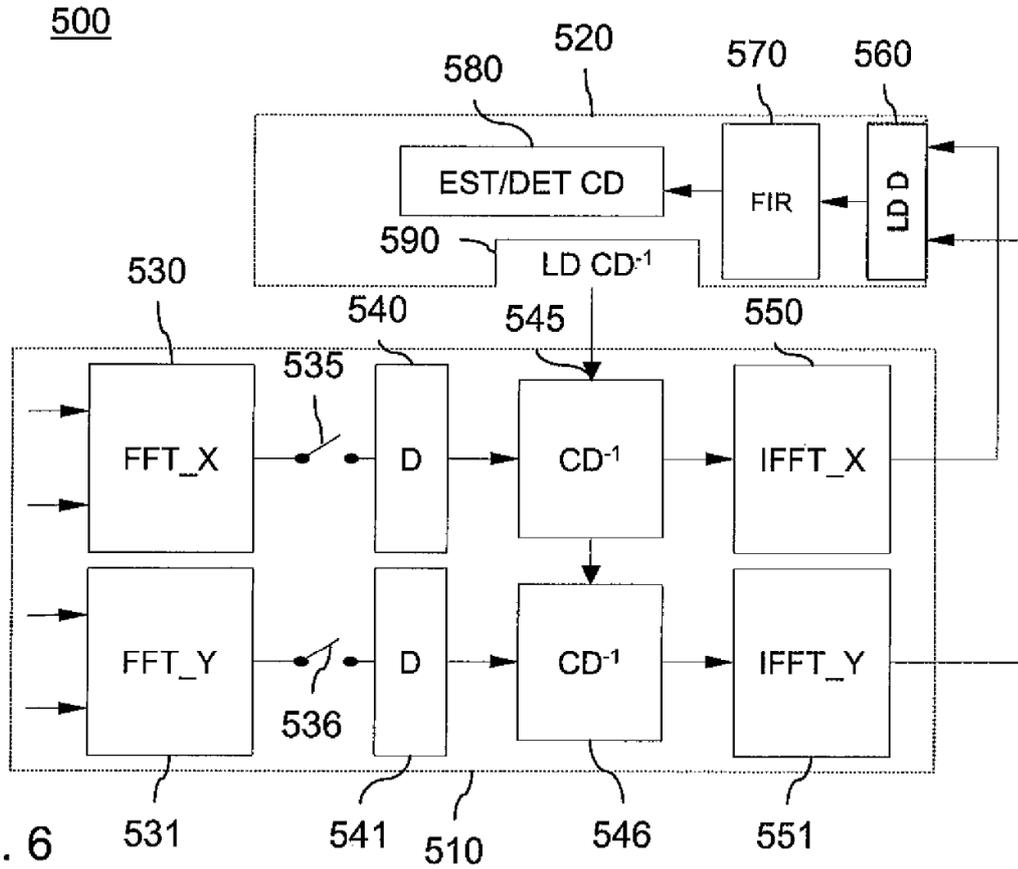


Fig. 7

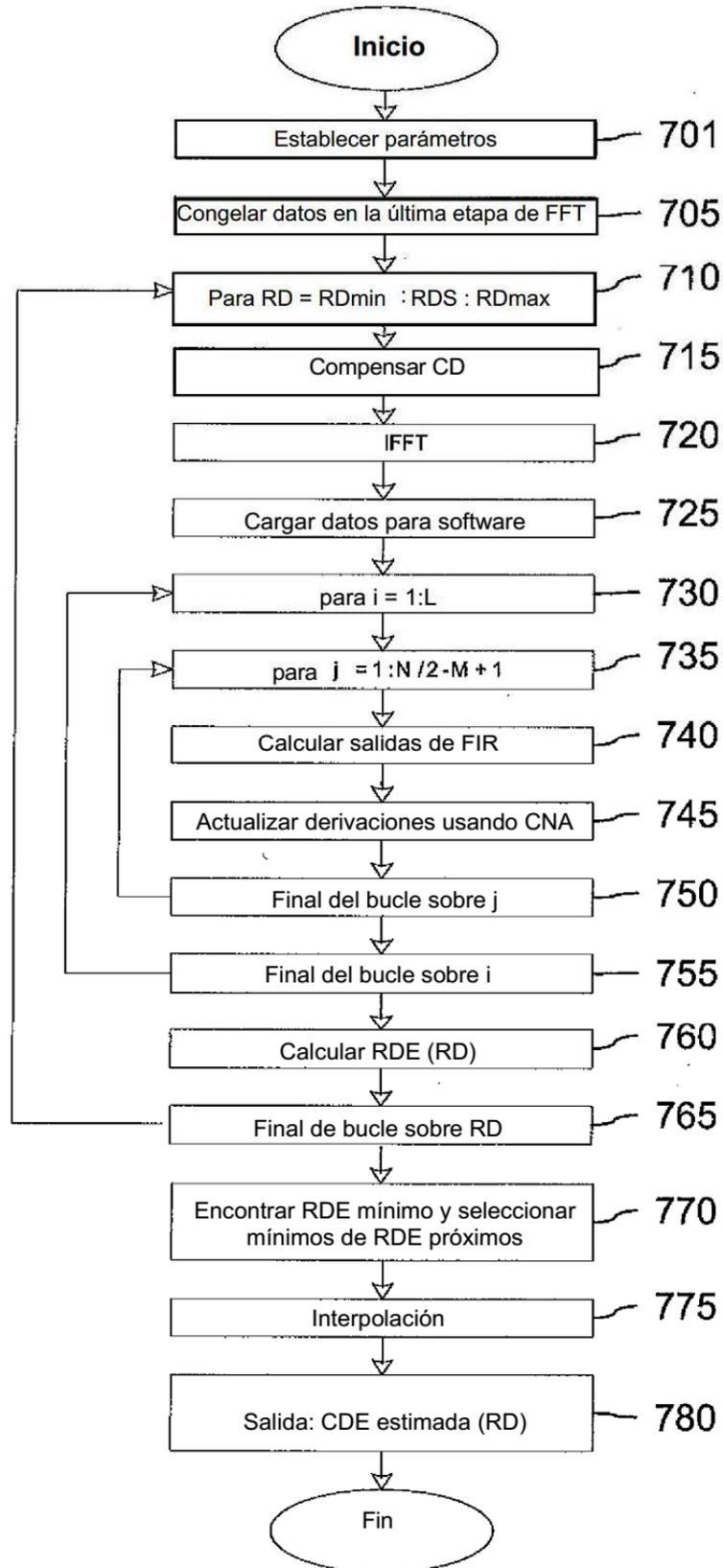


Fig. 8

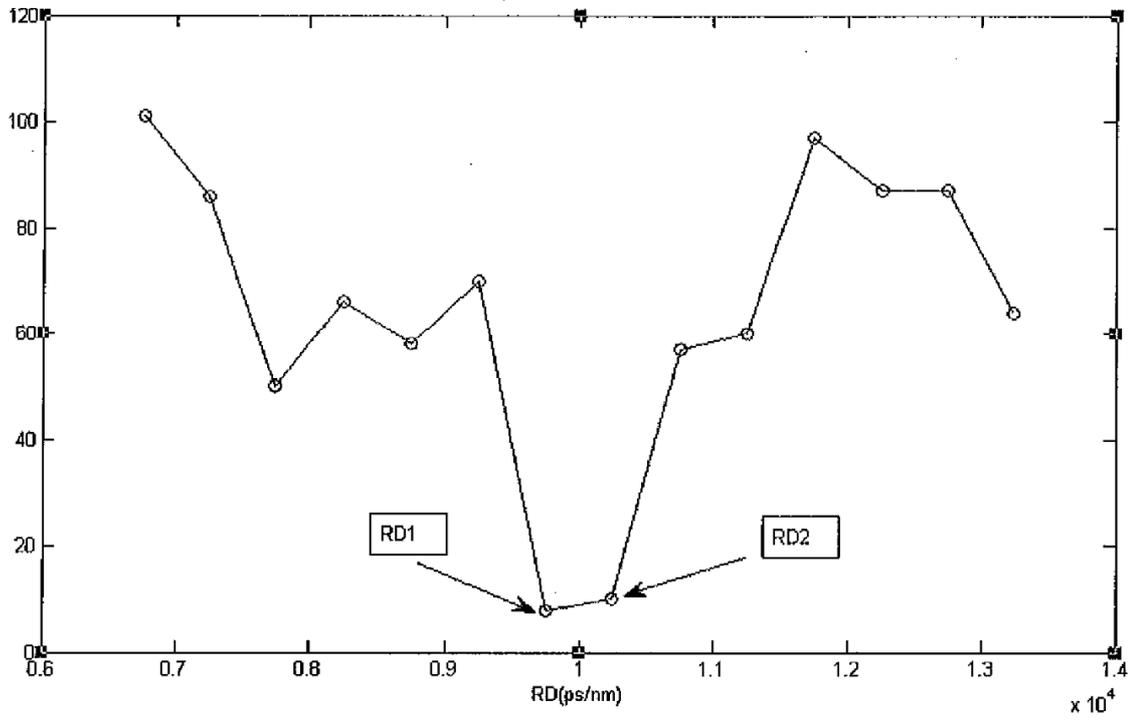


Fig. 9

