

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 795 403**

51 Int. Cl.:

G01J 3/45 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.11.2008 PCT/EP2008/064975**

87 Fecha y número de publicación internacional: **28.05.2009 WO09065736**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.11.2008 E 08851352 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.03.2020 EP 2217896**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para la inversión interferométrica con muestreo libre**

30 Prioridad:

19.11.2007 FR 0759135

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

23.11.2020

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES
(100.0%)**

**2 Place Maurice Quentin
75001 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**ROSAK, ALAIN y
PIERANGELO, CLÉMENCE**

74 Agente/Representante:

CURELL SUÑOL, S.L.P.

ES 2 795 403 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo para la inversión interferométrica con muestreo libre

5 El campo de la invención es el de la interferometría para la caracterización de una fuente de radiación y/o de un medio atravesado por la radiación entre la fuente y un interferómetro.

10 La invención se refiere más precisamente a un procedimiento de inversión interferométrica para la caracterización de una fuente de radiación y/o de un medio atravesado por la radiación entre la fuente y un interferómetro, que utiliza una inversión interferométrica aprovechando directamente la información contenida en el interferograma elaborado por el interferómetro.

15 En la figura 1 se ha representado una fuente de radiación S y un medio M atravesado por la radiación procedente de la fuente S.

La fuente S puede ser una fuente natural (por ejemplo una superficie terrestre, el sol, etc.) o una fuente artificial (por ejemplo una lámpara, un láser, etc.), cuyas propiedades son por ejemplo la temperatura, la emisividad/reflectancia (ligadas a la composición química, mineralógica, con las tasas de humedad, etc.).

20 El medio M puede ser la atmósfera terrestre o planetaria, una célula de gas o de líquido, una preparación que contiene una molécula de interés químico o biológico, etc., cuyas propiedades son por ejemplo la temperatura, la composición química y la concentración de los diferentes elementos, la presencia de partículas sólidas o líquidas en un gas, etc.

25 De una manera general, se busca caracterizar la fuente S y/o el medio M encontrando una o varias propiedades de la fuente S y/o del medio M a partir de un interferograma elaborado por un interferómetro que recoge la radiación emitida por la fuente S, después de atravesar el medio M. Estas propiedades encontradas pueden ser cualitativas (presencia de una determinada molécula) o cuantitativas (medición de la concentración de un gas, o de un perfil de temperatura atmosférica).

30 Una técnica conocida consiste en llevar la radiación procedente de la fuente S y que ha atravesado el medio M a la entrada de un interferómetro (no representado) apto para elaborar un interferograma de la radiación creando un número finito de diferencias de trayectoria óptica entre dos rayos que han seguido el mismo camino entre la fuente y el interferómetro.

35 El interferograma representa así la transformada de Fourier óptica del espectro de luminancia a la entrada del interferómetro.

40 La técnica clásica de utilización de un espectrómetro de transformada de Fourier pasa por la reconstrucción de un espectro muestreado a partir del interferograma para invertir las propiedades interesantes que permiten caracterizar la fuente de radiación y/o el medio atravesado por la radiación.

45 La reconstrucción del espectro necesita calcular una transformada de Fourier inversa. El paso del interferograma al espectro necesita entonces un muestreo del interferograma relativamente regular con el fin de que se realice la condición de Shannon o Nyquist. Esto significa que la distancia máxima entre dos muestras no debe exceder $1/(2\Delta\sigma)$, siendo $\Delta\sigma$ la anchura de la banda espectral observada, por lo tanto, un número de puntos mínimo en el interferograma de $2\Delta\sigma D$ para una diferencia de trayectoria máxima de D. Este criterio de muestreo del interferograma es una gran restricción a nivel del instrumento, en particular para la realización de un espectrómetro de transformada de Fourier clásico. En efecto, para alcanzar una alta resolución espectral (por ejemplo para detectar una raya fina en el espectro), se requiere un gran valor de D y por lo tanto, el interferograma debe contener una gran cantidad de muestras.

50 Existen unas técnicas que permiten reconstruir un espectro a partir de un interferograma muestreado irregularmente. Sin embargo, estas técnicas adolecen de las limitaciones siguientes:

- 55
- pueden implicar unas restricciones en el muestreo del interferograma, que, aunque irregular, no es entonces totalmente libre;
 - pueden permitir reconstruir únicamente una parte del espectro (algunas rayas en emisión, generalmente)
- 60 y no son aplicables por lo tanto a los espectros en absorción.

65 La técnica clásica que utiliza una reconstrucción del espectro a partir del interferograma, y la inversión del espectro para caracterizar la fuente S y/o el medio M, está ilustrada por los elementos con líneas de puntos en la figura 1.

La invención se inscribe en el marco de técnicas que utilizan por su parte una inversión interferométrica que utiliza

directamente la información contenida en el interferograma, y sin reconstrucción de espectro. Estas técnicas permiten "acortar" el bucle de caracterización suprimiendo las etapas con líneas de puntos en la figura 1.

Unos ejemplos de estas técnicas los proporcionan los documentos de patente WO9629582, US6061582, WO2007057016, FR2787186 así como los artículos "Experimental design protocol for the pattern recognition analysis of bandpass filtered Fourier transform infrared interferograms" de Shaffer *et al.*, Chemometrics and intelligent laboratory systems, 1995; "Detection of atmospheric pollutants by direct analysis of passive Fourier transform infrared interferograms" de G. Small, Anal. Chem., 1988; Rapid signal processing techniques for Fourier transform infrared remote sensing" de Small *et al.*, trends in analytical chemistry, vol. 10, nº 5, 1991; "Application of digital filtering and pattern recognition techniques to interferogram-based Fourier transform infrared qualitative analysis" de Small *et al.*, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1992; y "Raman spectral estimation via fast orthogonal search" de Korenberg *et al.*, 1997.

Los mismos algoritmos de inversión que los utilizados para pasar del espectro a las propiedades del medio atravesado y/o de la fuente, se pueden utilizar para realizar una inversión interferométrica que aprovecha directamente la información contenida en el interferograma. Por ejemplo, son convenientes unos algoritmos como la estimación óptima, o un reconocimiento de proximidad. A este respecto, se ha demostrado que la inversión sobre un determinado espectro o sobre un interferograma muestreado de manera que se obtenga el espectro dado conduce a los mismos rendimientos finales en términos del número de informaciones encontradas y de sus precisiones asociadas.

Se comprende así que en el contexto de la invención, se busca utilizar directamente la información contenida en un interferograma para conocer las características de la fuente de radiación y/o del medio atravesado por la radiación entre la fuente y el interferómetro, y sin reconstrucción de espectro. Esto permite obtener unas características tales como la composición química, la concentración de una determinada especie molecular, la temperatura, la emisividad, etc. de la fuente y/o del medio atravesado, sin efectuar la transformada de Fourier del interferograma (es decir, sin adquirir ningún espectro) y por lo tanto sin restricción de muestreo del interferograma.

El aprovechamiento directo del interferograma ya se ha propuesto por ejemplo:

- para el sondeo atmosférico, por ejemplo en:
 - o Kyle, "Temperature soundings with partially scanned interferograms", 1977
 - o Spankuch *et al.*, "Investigations on temperature soundings using partial interferograms", 1987
- o también para la identificación de compuestos en química, por ejemplo en:
 - o De Haseth *et al.*, "Interferogram-based infrared search system", 1981

Sin embargo, todos los estudios presentados en estos artículos utilizan un interferograma, eventualmente parcial, constituido por un único segmento muestreado regularmente. Estos estudios no permiten por lo tanto eliminar las restricciones en la regularidad del muestreo del interferograma.

A partir de esta constatación, la invención tiene por objetivo proponer una técnica que permita librarse de las limitaciones del muestreo de manera que se permita en particular una inversión a partir de un interferograma muestreado irregularmente, o submuestreado, que no respete la condición de Shannon o Nyquist.

Con este fin, la invención propone un procedimiento de inversión interferométrica para la medición de una variable característica de una fuente de radiación y/o de un medio atravesado por la radiación entre la fuente y un interferómetro, tal como está definido por las reivindicaciones 1 o 2.

Otros aspectos, objetivos y ventajas de la presente invención aparecerán mejor con la lectura de la descripción detallada siguiente de formas de realización preferidas de ésta, dada a modo de ejemplo no limitativo, y hecha con referencia a los dibujos adjuntos en los que, además de la figura 1 ya descrita:

- la figura 2 representa una simulación de la observación del espectro de la luminancia atmosférica en lo alto de la atmósfera en la que se observa una parte del peine de rayas del monóxido de carbono;
- la figura 3 representa la transformada de Fourier del espectro de la figura 2, y corresponde a la señal de la figura 2 en el campo del interferograma;
- la figura 4 muestra la Jacobiana del monóxido de carbono en el interferograma de la figura 3;
- la figura 5 ilustra el contenido de información relativa al perfil de monóxido de carbono en función de la diferencia de trayectoria.

La invención encuentra aplicación por ejemplo en el campo espacial. Se trata por ejemplo de realizar una teledetección, tal como un sondeo atmosférico y la inversión de los perfiles de gases absorbentes, como el CO, el CO₂, etc. (gases cuya regularidad del peine de rayas se traduce por una fuerte localización de la información en el interferograma, por lo tanto un óptimo muy ventajoso con respecto a un muestreo regular del interferograma, necesario en la espectrometría clásica).

La invención encuentra aplicación asimismo fuera del campo espacial. Se trata por ejemplo de la espectroscopía infrarroja aplicada a la química o la biología (por ejemplo, en la investigación como en la industria, para la medición de la concentración de una molécula diana en un gas o un líquido por un interferómetro). Generalmente, cualquier medición realizada por espectroscopia, en particular infrarroja, puede ser realizada por inversión interferométrica con muestreo libre/óptimo de acuerdo con la presente invención, siendo la ganancia aportada, como se detallará con mayor detalle a continuación, tan grande como concentrada es la información útil en el interferograma.

Se observará que la invención, cuando se aplica a un interferómetro estático, también puede permitir obtener una buena resolución temporal, necesaria para caracterizar unos fenómenos transitorios.

Generalmente, y según un primer modo de realización, el procedimiento según la invención utiliza una inversión interferométrica aprovechando directamente la información contenida en el interferograma, sin reconstrucción de un espectro de la radiación muestreada a partir del interferograma. Se trata así de aprovechar directamente la información contenida en el interferograma para conocer las características de la fuente de radiación y/o del medio atravesado por la radiación entre la fuente y el interferómetro, y sin reconstrucción de espectro. Esto permite obtener unas características tales como la composición química, la concentración de una determinada especie molecular, la temperatura, la emisividad, etc. de la fuente y/o del medio atravesado, sin efectuar la transformada de Fourier del interferograma (es decir, sin adquirir ningún espectro) y por lo tanto sin restricción de muestreo del interferograma.

Más precisamente, se propone en el marco de la invención muestrear libremente el interferograma utilizando únicamente unas diferencias de trayectoria óptica seleccionadas sin restricción de muestreo, del cual se determina como influyente la contribución a la inversión de una variable característica de la fuente y/o del medio.

En otras palabras, la invención propone muestrear libremente el interferograma, seleccionando únicamente las diferencias de trayectoria ópticas que contienen la información buscada y evitando la introducción de señales parásitas que estuvieran concentradas en otras diferencias de trayectoria. Se trabaja de esta manera en un muestreo óptimo, lo cual permite minimizar el número de muestras medidas, maximizando al mismo tiempo los rendimientos de la inversión de las propiedades diana.

El procedimiento según este modo de realización de la invención resulta así ventajoso en particular porque permite:

- obtener también un buen rendimiento final con menos muestras,
- o con tantas muestras obtener un mejor rendimiento final (precisión de la medición de una o varias características del medio observado),
- o ganar en parte en los dos niveles a la vez disminuyendo el número de muestras y aumentando los rendimientos finales de la inversión.

La disminución del número de muestras permite obtener un espectrómetro más sencillo y compacto en el caso de un espectrómetro de rejillas estático, o con una mejor relación señal/ruido, por ejemplo gracias a una superficie de integración más grande. En el caso de un espectrómetro de Michelson, el tiempo de adquisición de un interferograma libre puede ser reducido (medición más rápida) cuando la primera muestra no tiene diferencia de trayectoria nula.

La disminución del número de muestras permite asimismo disminuir el número de datos que se deben procesar o transmitir (un factor limitativo en el caso de una medición espacial por ejemplo).

Por último, la selección de las diferencias de trayectoria puede permitir librarse de las señales parásitas que estuvieran mezcladas con la señal buscada en el espectro (por ejemplo unos componentes espectrales de baja frecuencia).

Se presenta en la continuación de la descripción un ejemplo del interés de un muestreo libre y óptimo del interferograma con vistas a una inversión interferométrica para la caracterización de acuerdo con la invención de una fuente de radiación y/o de un medio atravesado por la radiación.

En espectroscopia infrarroja, se observan a menudo unos peines de rayas de absorción o de emisión características de ciertas moléculas. Ahora bien, las posiciones de estas rayas están dictadas por las reglas de transiciones energéticas en la molécula que hacen intervenir unos números cuánticos. Estas rayas presentan por lo tanto a menudo un motivo periódico muy marcado.

5

Esto se ilustra, por ejemplo, en la figura 2, que representa una simulación de la observación del espectro de la luminancia atmosférica en lo alto de la atmósfera en la que se observa una parte del peine de rayas del monóxido de carbono (CO).

10

Como se ilustra en la figura 3 que representa la transformada de Fourier del espectro de la figura 2, esta periodicidad se traduce asimismo en el campo del interferograma (transformada de Fourier del espectro) por una señal que presenta unos componentes periódicos.

15

Se observan así en la figura 3 unas oscilaciones marcadas alrededor de la línea de base (denominadas "ráfagas" a continuación) regularmente espaciadas. Estas ráfagas son causadas por la presencia de rayas de CO, como lo acredita el cálculo de las Jacobianas (derivadas parciales del interferograma con respecto a la cantidad de CO) ilustrado en la figura 4.

20

Si se busca invertir un perfil vertical de la concentración de monóxido de carbono (gas contaminante) en la atmósfera, se desea maximizar la cantidad de informaciones independientes según la vertical que se puede alcanzar. Se puede observar en la figura 5 que la contribución de las diferentes muestras del interferograma (las "diferencias de trayectoria" DDM) a la inversión del perfil de CO (variable característica del medio atravesado) es muy variable.

25

Por lo tanto, se puede prever adquirir únicamente las diferencias de trayectoria en el interferograma que contienen la información útil.

30

Se apreciará que este proceso no es aplicable en el espectro. En efecto, aunque ciertas muestras del espectro contienen ciertamente poca información útil (por ejemplo, entre dos rayas del peine de CO), la espectroscopia por transformada de Fourier no permite, sin embargo, adquirir solamente unas pocas muestras del espectro ya que éste está reconstruido en bloque por transformada de Fourier inversa del interferograma.

35

En el ejemplo considerado en la presente memoria, se comprende por lo tanto que optimizando las posiciones de las DDM del interferograma, se puede obtener un aumento del contenido de información que únicamente se podría haber alcanzado para un muestreo regular mejorando la relación señal-ruido del instrumento (en el ejemplo, un factor ligeramente superior a 2). Por el contrario, si se desea conservar el mismo rendimiento, se ha calculado entonces para este ejemplo que 200 muestras bien colocadas son tan eficaces como casi 1000 muestras colocadas regularmente.

40

Según una variante de realización de la invención, se reconstruye un espectro utilizando un muestreo libre optimizado de acuerdo con lo que se ha presentado anteriormente (y por lo tanto susceptible de comprender grandes "lagunas" de medición) y se procede a la inversión de este espectro. Con este fin, el interferograma adquirido por selección de las diferencias de trayectoria que contienen la información útil se completa utilizando unos valores teóricos (modelizados para ciertos valores *a priori* de las variables, o incluso arbitrarios) con el fin de reducirse a un muestreo suficientemente fino (por ejemplo muestreado regularmente) para permitir la reconstrucción de un espectro por transformada de Fourier del interferograma muestreado así completado.

45

50

En el marco de esta variante de realización, se conserva la ventaja de simplificación instrumental o de mejora de la relación señal-ruido, pero se pierde entonces la ventaja de la reducción del número de datos. Sin embargo, la obtención de un espectro puede ser útil si se dispone de una cadena de tratamiento que toma en la entrada unos espectros y que no se desea modificarla para inyectar unos interferogramas en la misma.

55

La inversión sobre el espectro así obtenido puede depender de los utilizados *a priori* en el cálculo de las diferencias de trayectoria no adquiridas, pero esta dependencia se puede reducir o incluso eliminar, por ejemplo si se asigna un ruido infinito a las diferencias de trayectoria simuladas en el proceso de inversión de las variables características de la fuente y/o del medio que se desea invertir.

60

Volviendo a la descripción general de la invención, la optimización del muestreo del interferograma consiste en seleccionar, sin restricciones de regularidad de muestreo, unas diferencias de trayectoria óptica de las cuales se determina que es influyente la contribución a la inversión de una variable buscada para caracterizar la fuente y/o el medio.

65

Esta selección se puede realizar empíricamente, por ejemplo a partir de la visualización de las posiciones de las ráfagas en un interferograma simulado por ejemplo.

Esta selección se puede realizar asimismo de manera algorítmica según el principio expuesto a continuación:

- 5 - a: se determina una magnitud G que caracteriza la mejora de la inversión. Por mejora de la inversión, se entiende en particular una optimización en la medición de la variable característica de propiedades (cualitativas o cuantitativas) de la fuente y/o del medio atravesado. Inicialmente, no se selecciona ninguna DDM y $G = 0$;
- b: se calcula para cada DDM i el aumento de la magnitud G cuando se añade la DDM i al conjunto de las DDM seleccionadas previamente;
- 10 - c: se añade la DDM i que maximiza la magnitud G al conjunto de las DDM seleccionadas, y se vuelve a la etapa b.

15 El algoritmo se acaba cuando se considera que el compromiso entre el número de DDM seleccionadas y el rendimiento de la inversión alcanzada es óptimo. Se seleccionan así las diferencias de trayectoria que contribuyen principalmente a la optimización de la magnitud G, eliminando las que solo influyen muy poco en la optimización de esta magnitud. Este algoritmo permite seleccionar las DDM sensibles a la señal buscada (el CO en el ejemplo presentado anteriormente) pero eliminar asimismo las DDM sensibles a unas señales atmosféricas parásitas (por ejemplo el vapor de agua, o la temperatura de superficie).

20 Se detallan a continuación diferentes modos de realización posibles del procedimiento según el primer aspecto de la invención.

Etapa A: obtención de la distribución del contenido de información en un interferograma

25 El interferograma es un interferograma "casi continuo" muestreado lo más finamente posible con el fin de escanear "todas" las posiciones posibles, o por lo menos todas las posiciones que se prevé adquirir (se pueden ignorar voluntariamente ciertas zonas si se sabe *a priori* que no tienen interés o que son imposibles de adquirir, por ejemplo unas DDM demasiado elevadas para el volumen máximo ocupado por el instrumento). Este interferograma "casi continuo" puede ser teórico (procedente de modelización) o real (si se dispone de otro instrumento que permita adquirir dicho interferograma).

30 ❖ Una vez elegida la aplicación (o las aplicaciones) (por ejemplo, la medición del perfil atmosférico de CO, o de ozono, de temperatura, o el reconocimiento de una molécula o familia de moléculas, etc.), se determina una magnitud apta para caracterizar el rendimiento, o la mejora, de la inversión. A título de ejemplos no limitativos de dicha magnitud, se pueden citar:

35 - el número de elementos independientes según la vertical en el caso de sondeo atmosférico, por ejemplo para la obtención del perfil de concentración de un gas como el CO (dado por el número de DOFS ("degrees of Freedom for Signal", como se describe por ejemplo en la obra Rodgers, C.D., 2000: "Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice", World Scientific). Se buscará entonces maximizar esta magnitud;

40 - la precisión de la variable invertida, por ejemplo, la precisión en porcentaje de la concentración de CO en la capa de aire comprendida entre 0 y 2 km (si se interesa en el CO cerca de la superficie). Se buscará minimizar esta magnitud;

45 - un componente del error en el producto invertido. Se trata por ejemplo de minimizar el error ligado a un parámetro del modelo (por ejemplo, la temperatura del aire) sobre el producto (por ejemplo, la concentración de CO integrada en toda la columna de aire);

50 - la capacidad para discriminar dos moléculas diferentes.

55 ❖ Después, en una segunda etapa, se determina la información que aportaría cada DDM a la optimización de la magnitud "rendimiento de la inversión" determinada en la etapa anterior (maximización o minimización según el caso).

Para ello se va a:

60 - modelizar la influencia de la variable buscada en el interferograma "casi-continuo". En el caso del sondeo atmosférico, esto se realiza mediante un código de transferencia por radiación, que proporciona un espectro infinitamente resuelto y a partir del cual se puede, aplicando una transformada de Fourier, calcular un interferograma.

65 Se puede, según el caso, modelizar:

- el interferograma
- las jacobianas del interferograma (derivadas parciales de la señal del interferograma con respecto a la o a las magnitudes que se deben invertir). Las jacobianas dan la sensibilidad de cada DDM a la magnitud que se debe invertir. Es posible calcular asimismo las jacobianas del interferograma con respecto a unos componentes "parásitos" (por ejemplo, la humedad del aire en el caso del CO; otro ejemplo, un defecto instrumental, como la ganancia).

Etapa B: selección de las DDM

Son posibles varias variantes.

- ✓ Como ya se ha indicado, esta selección se puede realizar de manera empírica.

- En la hipótesis de que se parta del interferograma (figura 3), se seleccionan las DDM que corresponden a las ráfagas, si es seguro que su presencia está causada por la especie diana.
- En la hipótesis de que se parta de las jacobianas (figura 4), que proporcionan directamente la sensibilidad de cada DDM a la especie diana, se seleccionan las DDM en las ráfagas (entonces es seguro que son la firma de la especie buscada y no de otro parámetro).
- En la hipótesis de que se parta de otro indicador de contenido de información más elaborado (figura 5), se seleccionan las DDM allí donde el contenido es el más importante.

Se calcula por ejemplo (por inversión explícita, o según unas técnicas de estimación) la magnitud "rendimiento de la inversión" para el interferograma "casi-continuo" completo y para el interferograma al cual se le ha retirado una DDM.

Mediante la diferencia entre estos dos cálculos, se obtiene una estimación de la aportación de la DDM retirada de la magnitud "rendimiento de la inversión". La figura 5 ilustra dicha estimación realizada calculando los DOFS según las ecuaciones dadas en la obra de Rodgers ya mencionada anteriormente, a partir de las jacobianas en el interferograma para el CO y para unos parámetros variables (humedad, temperatura, etc.)

Este modo de realización tiene la ventaja de que el "contenido de información" así determinado tiene en cuenta no solo la sensibilidad al CO (que está maximizada ya que debe ser lo más grande posible), sino también la sensibilidad a los demás parámetros (humedad, temperatura, etc.) que está minimizada (lo cual equivale a una especie de filtrado de las señales parásitas).

- ✓ Como también se ha indicado anteriormente, la selección de las DDM se puede realizar asimismo de manera algorítmica.

- Se puede utilizar el procedimiento iterativo, del cual se ha proporcionado un ejemplo anteriormente en este documento. En el caso presente, G es el número de DOFS, calculado a partir de las jacobianas en el interferograma del CO y de las demás variables.
- Otra técnica posible consiste en realizar un agrupamiento de las DDM cercanas por "racimos", o bien mediante el estudio de las correlaciones entre DDM, o bien también mediante la búsqueda de similitud entre unas jacobianas verticales (por ejemplo en el caso de la inversión de un perfil). Se puede elegir entonces un único representante de cada racimo, lo cual limita el número de DDM que deben ser adquiridas.

En el caso de una agrupación basada en la correlación, la optimización no se realiza con respecto a la variable que se debe invertir únicamente, sino con respecto al conjunto de los parámetros variables que han permitido obtener la "base" sobre la cual se calcula la correlación.

- Otra técnica también posible consiste en utilizar unos análisis del tipo "ACP" (Análisis de Componente Principal) para identificar el o los componentes que llevan la señal interesante (clase cuya varianza es máxima con respecto a la magnitud que se debe invertir, y mínima con respecto a las demás variables) y seleccionar a continuación las DDM que intervienen principalmente en estos componentes.
- Otra técnica también consiste en proceder a partir de la aplicación del modelo de inversión a varios interferogramas simulados muestreados de manera diferente. Se considera entonces, de entre los muestreos probados, el muestreo que proporciona las inversiones más satisfactorias, utilizando como elemento de comparación la magnitud "rendimiento de la inversión" elegida previamente.

Evidentemente, la invención no está limitada a un procedimiento de caracterización de una fuente y/o de un medio, sino que se extiende asimismo a un interferómetro destinado a ser utilizado en dicho procedimiento, comprendiendo el interferómetro unos medios de recepción de una radiación que ha atravesado un medio desde una fuente de emisión, y estando caracterizado por que comprende unos medios de creación de un número finito de diferencias de trayectoria óptica entre dos rayos que han seguido el mismo camino entre la fuente y dicha entrada conformados para elaborar un interferograma a partir de las diferencias de trayectoria de las cuales se determina que la contribución a la inversión de una variable característica de la fuente y/o del medio es influyente.

La continuación de la descripción se refiere más específicamente a la realización práctica del procedimiento según el primer aspecto de la invención, y se esfuerza en describir diferentes formas de realización posibles de un interferómetro según el segundo aspecto de la invención.

15 Interferómetro dinámico

En el caso de un interferómetro dinámico, un único detector adquiere la información. Las diferentes "diferencias de trayectoria" se producen desplazando uno de los dos brazos del interferómetro. El detector único adquiere entonces en función del tiempo la señal interferométrica.

En la configuración clásica, cuando el motor desplaza el espejo, se pasa continuamente por todas las diferencias de trayectoria. El conjunto de las diferencias de trayectoria es adquirido así continuamente.

Por lo tanto, no se observa ninguna ganancia instrumental en seleccionar algunas más interesantes. En contrapartida, se observa una ganancia en transmitir únicamente los datos necesarios, lo cual permite por ejemplo en el caso de una instrumentación embarcada, reducir el caudal de telemetría.

Una variante instrumental del espectrómetro de TF dinámico consiste en reemplazar el motor continuo por un motor paso a paso. Esto es necesario por ejemplo en el caso de las aplicaciones de poco flujo (con el fin de poder obtener un tiempo de integración de la señal larga), o en el caso de aplicaciones que necesitan la modulación en presencia de mediciones cuyo ruido está dominado por fuentes parásitas. Dicha variante instrumental con motor paso a paso se puede utilizar por lo tanto para adquirir únicamente las DDM útiles. Esto permite entonces aumentar el tiempo de medición, por lo tanto la relación señal/ruido, o disminuir el tiempo de medición para una relación señal/ruido dada.

Según una variante del segundo aspecto de la invención, se prevé así un interferómetro dinámico provisto de un motor paso a paso y de medios de control del motor adaptados para desplazar el espejo a las diferencias de trayectoria seleccionadas por su contribución.

40 Interferómetro estático de rejillas

Se ha demostrado en el documento FR 2 787 186 que el espectrómetro dinámico se puede simplificar reemplazando el dispositivo de desplazamiento del espejo mediante un sistema de rejillas. La diferencia de trayectoria en este caso no se crea desplazando uno de los dos espejos, sino fragmentando uno por lo menos de los espejos en una serie de pequeños espejos (como unas pequeñas trayectorias).

Cada pequeña zona del espejo así fragmentado, es decir cada trayectoria, se posiciona a una cierta diferencia de trayectoria. El conjunto de las diferencias de trayectoria es adquirido entonces simultáneamente por una matriz de detector que forma imágenes con los espejos fragmentados (es decir, las trayectorias). En otras palabras, se realizan N interferómetros de Michelson en paralelo, siendo cada uno "congelado" con una diferencia de trayectoria elegida y formado como imagen simultáneamente en una matriz de detector.

La limitación instrumental de este principio está ligada a la capacidad tecnológica para realizar estos espejos fragmentados. Sin embargo, es posible una resolución espectral elevada si se limita a un espectro estrecho ya que el número de "fragmentación" del espejo es directamente proporcional al número de muestras que se desea en el espectro (es decir la relación entre la anchura espectral y la resolución espectral).

Se comprende por lo tanto que la presente invención saca el máximo provecho de dicho interferómetro estático de rejillas en la medida en que permite, conservando la misma sensibilidad, limitar el número de trayectorias a realizar.

Del mismo modo, se puede conservar un mismo número de trayectorias y, sondear así una banda espectral más grande y, por lo tanto, utilizar más informaciones espectrales.

Por último, se puede aumentar la resolución espectral, siempre con el mismo número de trayectorias, lo cual aumenta también la información espectral.

Según una variante del segundo aspecto de la invención, se prevé así un interferómetro estático de rejillas del cual por lo menos uno de los espejos presenta una pluralidad de superficies reflectantes dispuestas de manera que proporcionen las diferencias de trayectoria seleccionadas para su contribución.

5

A título de ejemplo de realización, se utilizan, para generar por ejemplo 900 DDM diferentes, dos espejos de rejillas que comprenden cada uno 30 trayectorias. Los dos espejos están separados 90° entre sí y forman una "red" de 900 DDM diferentes. Para ello, el primer espejo está constituido por pequeñas trayectorias regulares. El segundo espejo está formado por grandes trayectorias, siendo la altura de la trayectoria mayor la suma de las alturas de las trayectorias pequeñas desde el espejo hasta las "rejillas pequeñas". Se obtiene así una progresión regular del muestreo sin redundancia de información.

10

Las trayectorias pequeñas permiten obtener un enmallado más fino entre dos trayectorias grandes. Por lo tanto, es difícil modificar el paso de la escalera pequeña para adaptarse a cada zona del interferograma. En contrapartida, las trayectorias grandes pueden ser completamente irregulares de manera que definan una zona de interés alrededor de la cual las trayectorias pequeñas harán un enmallado más fino.

15

Cuando el número de trayectorias es suficientemente bajo (típicamente menos de 100), es posible prever no dos escaleras de vidrio a 90° , sino un espejo plano más un espejo de trayectoria (o cualquier otra combinación de las dos soluciones). El muestreo es entonces completamente libre.

20

Interferómetro casi estático

El paso de muestreo de DDM del interferómetro estático de rejillas resulta en la capacidad de dominar el ensamblaje de las escaleras de vidrio (o del ensamblaje de vidrio según su forma). Esta capacidad puede ser del orden de 1 a 2 μm , lo cual plantea una dificultad suplementaria en el campo de las longitudes de onda cortas. En efecto, la posición óptima determinada por los algoritmos anteriores debe ser realizada en una fracción de longitud de onda. En el campo visible cercano infrarrojo, la realización práctica puede resultar entonces difícil de realizar.

25

30

Según aún otra variante de realización, se añade al interferómetro estático de rejillas un modulador adaptado para hacer variar un poco la DDM típicamente del orden de una fracción de longitud de onda, incluso de unas pocas longitudes de onda, de manera simultánea para todas las rejillas.

35

Se puede hacer variar por ejemplo la inclinación del compensador de vidrio Michelson, o también montar uno de los espejos de rejillas en un mecanismo piezoeléctrico. El desplazamiento necesario es por ejemplo de un cuarto de longitud de onda (es decir, 2.5 μm para una banda espectral alrededor de 10 μm), que se puede realizar mediante un mecanismo sencillo (de tipo piezoeléctrico), contrariamente a la trayectoria de varios centímetros necesarios en el caso del espectrómetro de TF dinámico. El instrumento así realizado se califica de "interferómetro casi estático".

40

Con un desplazamiento de una fracción de longitud de onda entre dos adquisiciones, cuando el error de realización es tal que se encuentra en un estado de interferencia neutro (por lo tanto sin información), la siguiente adquisición, desplazada en una o unas pocas fracciones de longitud de onda, se encuentra en un estado de interferencia diferente y no neutro. Se libera así de la dificultad de realización de las trayectorias y se muestrea de manera más fina alrededor de las zonas de interés determinadas.

45

Interferómetro dinámico de rejillas

Según otra variante de realización posible, se prevé combinar las soluciones expuestas anteriormente, añadiendo unas rejillas a un interferómetro dinámico, lo cual permite en particular aumentar su resolución espectral.

50

Por ejemplo, para un espectrómetro clásico de recorrido de 2 cm, se puede fragmentar el espejo en 4 trayectorias, según una progresión de las alturas de trayectorias de 2 cm. Se pueden obtener así 4 interferogramas, el primero de 0 a 2 cm, el segundo de 2 a 4 cm, etc. y alcanzar una resolución de 8 cm. Se pueden obtener 4 interferogramas no contiguos, desplazando las trayectorias en un valor superior a la carrera, en el caso de que la información faltante sea de poca importancia.

55

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de medición de una variable característica de una fuente de radiación y/o de un medio atravesado por la radiación entre la fuente y un interferómetro, siendo el interferómetro apto para elaborar un interferograma de la radiación creando un número finito de diferencias de trayectoria óptica entre dos rayos que han seguido el mismo camino entre la fuente y el interferómetro, comprendiendo el procedimiento:

- una inversión interferométrica realizada sobre la base del interferograma, de manera que se obtenga una medición de la variable característica,

estando el procedimiento caracterizado por que comprende las etapas que consisten en:

- estimar la contribución de cada diferencia de trayectoria en la etapa de inversión interferométrica, utilizando una modelización por un código de transferencia por radiación;
- realizar una selección de entre las diferencias de trayectoria, sin restricciones de regularidad de muestreo, en función de los resultados de la etapa de estimación, comprendiendo la realización de la selección la utilización de una magnitud que caracteriza el rendimiento o la mejora de la inversión interferométrica, y la repetición de manera iterativa de las etapas siguientes:

- a: inicialmente, no se selecciona ninguna diferencia de trayectoria;
- b: se calcula para cada diferencia de trayectoria el aumento de la magnitud que caracteriza el rendimiento o la mejora de la inversión interferométrica, cuando se añade dicha diferencia de trayectoria al conjunto de las diferencias de trayectoria seleccionadas previamente, haciendo este cálculo que intervengan las jacobianas del interferograma, es decir las derivadas parciales de la señal del interferograma con respecto a la o las magnitudes que se deben invertir;
- c: se añade la diferencia de trayectoria, que optimiza dicha magnitud, al conjunto de las diferencias de trayectoria seleccionadas, y se vuelve a la etapa b, hasta alcanzar un número máximo de diferencias de trayectoria seleccionadas o hasta que dicha magnitud sobrepase un umbral predeterminado;

- elaborar el interferograma utilizando únicamente las diferencias de trayectoria seleccionadas, y
- medir la variable característica de la fuente de radiación y/o del medio atravesado en función de las informaciones contenidas en el interferograma elaborado utilizando únicamente las diferencias de trayectoria seleccionadas, sin reconstrucción de un espectro de la radiación muestreada a partir del interferograma.

2. Procedimiento de medición de una variable característica de una fuente de radiación y/o de un medio atravesado por la radiación entre la fuente y un interferómetro, siendo el interferómetro apto para elaborar un interferograma de la radiación creando un número finito de diferencias de trayectoria óptica entre dos rayos que han seguido el mismo camino entre la fuente y el interferómetro, comprendiendo el procedimiento:

- una inversión interferométrica realizada sobre la base del interferograma, de manera que se obtenga una medición de la variable característica,

estando el procedimiento caracterizado por que comprende las etapas que consisten en:

- estimar la contribución de cada diferencia de trayectoria en la etapa de inversión interferométrica, utilizando una modelización por un código de transferencia por radiación;
- realizar una selección de entre las diferencias de trayectoria, sin restricciones de regularidad de muestreo, en función de los resultados de la etapa de estimación, comprendiendo la realización de la selección la utilización de una magnitud que caracteriza el rendimiento o la mejora de la inversión interferométrica, y la repetición de manera iterativa de las etapas siguientes:

- a: inicialmente, no se selecciona ninguna diferencia de trayectoria;
- b: se calcula para cada diferencia de trayectoria el aumento de la magnitud que caracteriza el rendimiento o la mejora de la inversión interferométrica, cuando se añade dicha diferencia de trayectoria al conjunto de las diferencias de trayectoria seleccionadas previamente, haciendo este cálculo que intervengan las jacobianas del interferograma, es decir las derivadas parciales de la señal del interferograma con respecto a la o las magnitudes que se deben invertir;
- c: se añade la diferencia de trayectoria, que optimiza dicha magnitud, al conjunto de las diferencias de

trayectoria seleccionadas, y se vuelve a la etapa b, hasta alcanzar un número máximo de diferencias de trayectoria seleccionadas o hasta que dicha magnitud sobrepase un umbral predeterminado;

- 5
- elaborar un interferograma utilizando únicamente las diferencias de trayectoria seleccionadas,
 - completar con unos valores teóricos el interferograma elaborado utilizando únicamente las diferencias de trayectoria seleccionadas, siendo dichos valores teóricos unos valores obtenidos a partir de una modelización,
- 10
- reconstruir un espectro de la radiación a partir del interferograma elaborado y completado, y
 - medir la variable característica de la fuente de radiación y/o del medio atravesado utilizando el espectro de la radiación reconstruido a partir del interferograma.
- 15
3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 o 2, en el que el interferograma se elabora por medio de un interferómetro que comprende por lo menos un espejo que presenta una pluralidad de superficies reflectantes dispuestas de manera que creen las diferencias de trayectoria seleccionadas.
- 20
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 o 2, en el que el interferograma se elabora por medio de un interferómetro que comprende por lo menos un espejo y un motor paso a paso adaptado para desplazar el espejo, y en el que la etapa de elaboración del interferograma se realiza controlando el motor para desplazar el espejo a las diferencias de trayectoria seleccionadas.

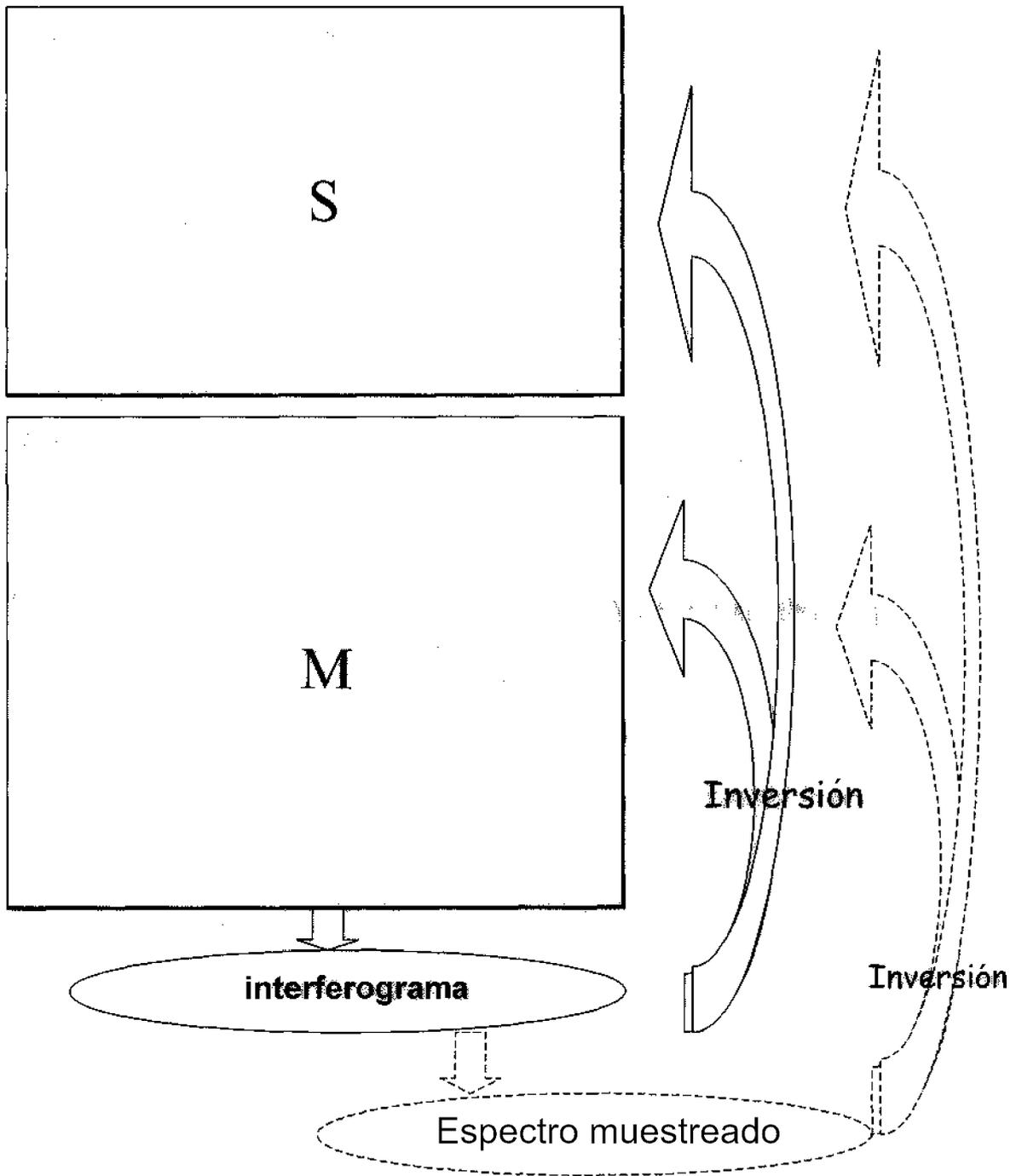


FIG.1

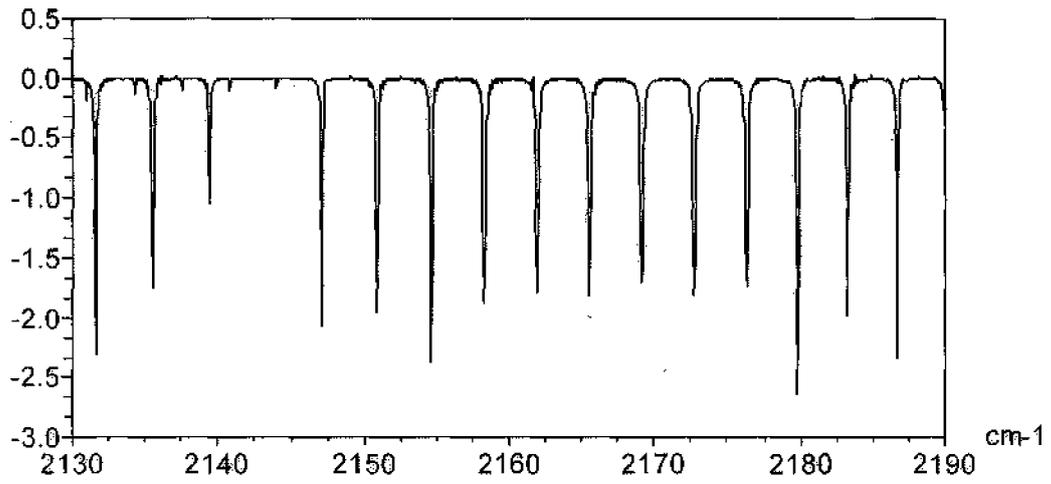


FIG. 2

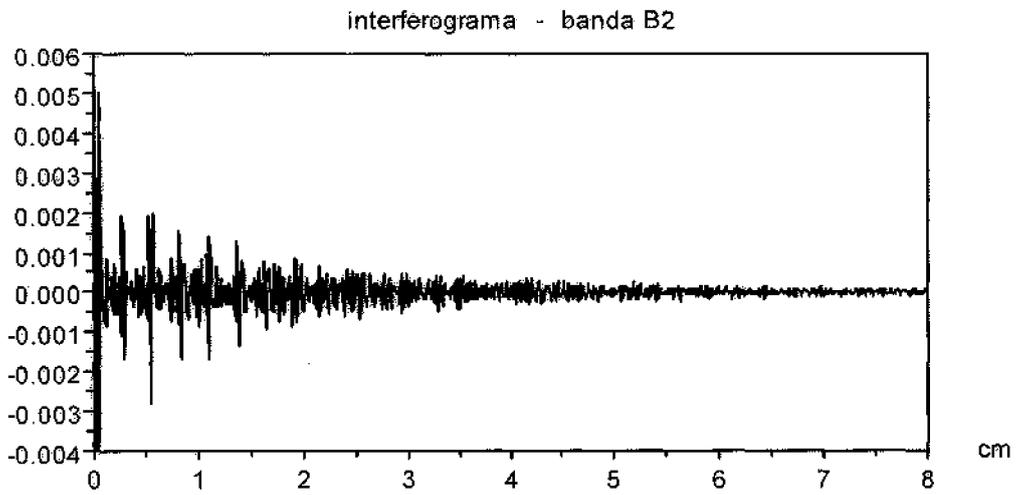
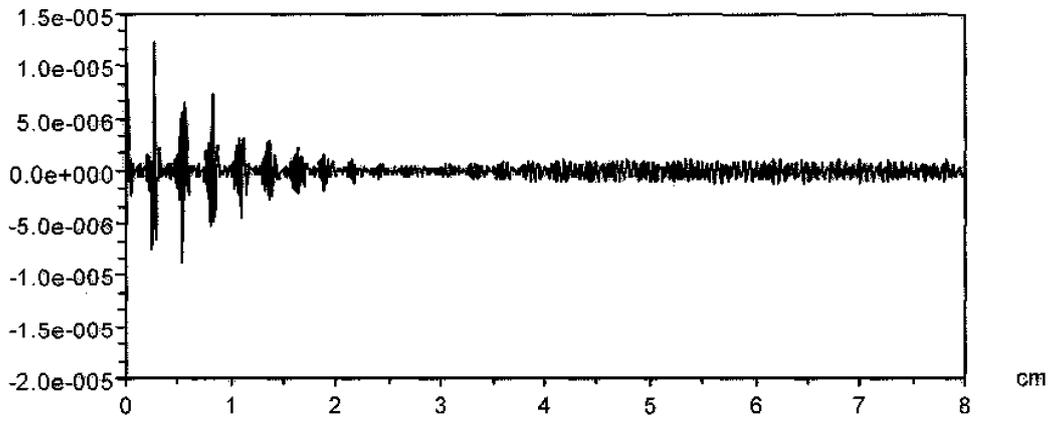
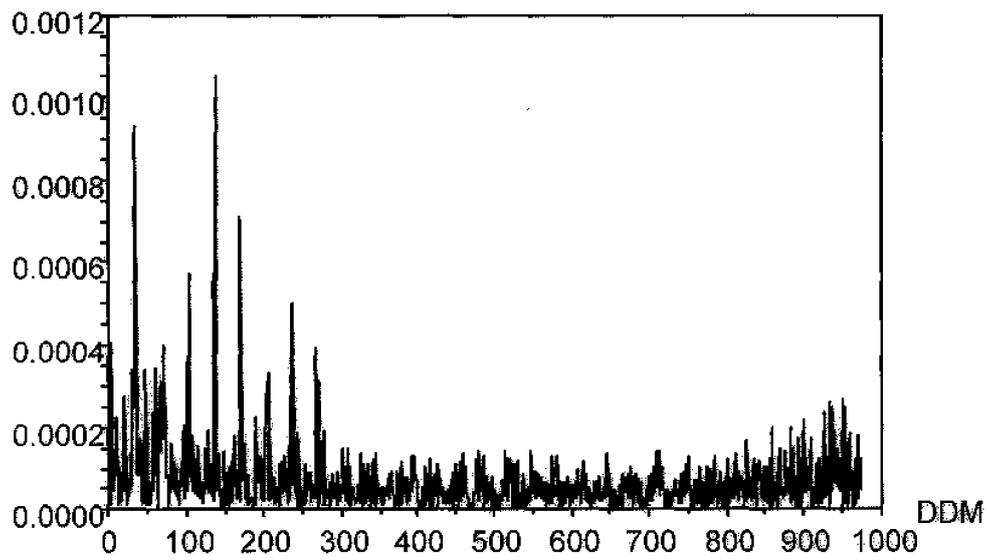


FIG. 3



FIG_4



FIG_5