

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 994 305**

51 Int. Cl.:

G01S 7/48 (2006.01)

G01P 5/00 (2006.01)

G01P 5/26 (2006.01)

G01S 17/58 (2006.01)

G01S 17/95 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.06.2021** **PCT/EP2021/065839**

87 Fecha y número de publicación internacional: **06.01.2022** **WO22002563**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.06.2021** **E 21731189 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.08.2024** **EP 4172648**

54 Título: **Procedimiento para determinar componentes de la velocidad del viento mediante un sensor de teledetección por láser y mediante coherencia temporal**

30 Prioridad:

29.06.2020 FR 2006816

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
21.01.2025

73 Titular/es:

IFP ENERGIES NOUVELLES (100.00%)
1 & 4 avenue de Bois-Préau
92500 Rueil-Malmaison, FR

72 Inventor/es:

GUILLEMIN, FABRICE;
SABIRON, GUILLAUME y
GOUSSAULT, ROMAIN

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 994 305 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para determinar componentes de la velocidad del viento mediante un sensor de teledetección por láser y mediante coherencia temporal

Campo técnico

La presente invención se refiere al campo de la determinación de los componentes de la velocidad del viento, en particular con el objetivo de evaluar la conveniencia de instalar un aerogenerador en un sitio (una ubicación).

Antes de instalar un aerogenerador, o un parque de aerogeneradores, es necesario evaluar el potencial del viento en este sitio. En efecto, el tamaño del aerogenerador, su clase y su estructura dependen de las características del viento, tales como la velocidad promedio del viento, la velocidad máxima del viento, la intensidad de la turbulencia del viento (que corresponde a la relación entre la desviación estándar de la velocidad del viento y la velocidad promedio del viento), etc. Por ejemplo, el tamaño del aerogenerador se puede elegir en función de la distribución del valor promedio del viento, y la clase de aerogenerador se puede elegir en función de la intensidad de la turbulencia. Dado que cambiar de una clase de aerogenerador a otra tiene un costo significativo, es importante conocer bien las características del viento antes de instalar un aerogenerador.

Además, esta determinación de los componentes de la velocidad del viento es especialmente crítica ya que también permite conocer el recurso productor de energía. Esto es importante para los proyectos eólicos, ya que también condiciona la fiabilidad financiera del proyecto de instalación del aerogenerador.

Técnica anterior

Para realizar estas medidas, la técnica clásica es la instalación de un mástil de medida en el lugar de medida (que es un lugar considerado para la implantación de un aerogenerador). Tal mástil de medida está equipado con un número importante de sensores, y requiere una instalación específica que implica un coste importante, y no es fácil de trasladar de un sitio a otro debido a estas dimensiones.

Según una segunda técnica, se puede utilizar un sensor LiDAR (acrónimo de la expresión en inglés "light detection and ranging" que puede traducirse como teledetección por láser, del inglés "light amplification by stimulated emission of radiation"). El LiDAR es una tecnología de teledetección o de medida óptica basada en el análisis de las propiedades de un haz devuelto a su transmisor. Este método se utiliza especialmente para determinar la distancia a un objeto mediante un impulso láser. A diferencia del radar que se basa en un principio similar, el sensor LiDAR utiliza luz visible o infrarroja en lugar de ondas de radio.

En el ámbito de los aerogeneradores, el sensor LiDAR se anuncia como siendo un sensor indispensable para el correcto funcionamiento de los grandes aerogeneradores, muy particularmente a medida que aumentan su tamaño y su potencia (hoy en día, 5 MW, pronto 12 MW en offshore). Este sensor permite que el viento se mueva, permitiendo en primer lugar calibrar los aerogeneradores para que puedan proporcionar la máxima potencia (optimización de la curva de potencia). Para esta etapa de calibración, el sensor LiDAR puede posicionarse en el suelo y orientarse verticalmente (perfilador), lo que le permite medir la velocidad del viento y su dirección, así como la pendiente del viento dependiendo de las altitudes. Se puede denominar a esta técnica LiDAR colocado.

Esta técnica se describe en particular en las solicitudes de patente EP3287810 y US2019293836.

El principio de medida de los sensores LiDAR se basa en una hipótesis de homogeneidad del viento en cada altitud. En efecto, los sensores LiDAR están compuestos por varios haces láser con diferentes orientaciones que miden sucesivamente la proyección del viento sobre los haces a varias altitudes.

Estas medidas radiales se combinan entonces a fin de reconstruir una medida promedio del viento en cada altitud, bajo la hipótesis de que el viento instantáneo es idéntico en cada punto medido por el sensor LiDAR.

Esta hipótesis es tanto más sólida en presencia de un sitio complejo en el que las variaciones locales de la velocidad del viento tienen un impacto significativo en la precisión de la medida Lidar así obtenida.

La figura 1 representa, de manera esquemática y no limitativa, un sensor LiDAR 1 colocado y orientado verticalmente para determinar los componentes de la velocidad del viento. El sensor LiDAR 1 se usa para obtener al menos una señal de medida en al menos un plano de medida PM (sólo se muestran dos planos de medida). En esta figura también están representados los ejes x, y, z. El punto de referencia para esta marca es el centro del sensor LiDAR. La dirección x es una dirección horizontal. La dirección y, perpendicular a la dirección x, es la dirección lateral ubicada en un plano horizontal (las direcciones x, y, forman un plano horizontal). La dirección z es la dirección vertical (que corresponde a la dirección de medida del sensor LiDAR 1) dirigida hacia arriba, el eje z es perpendicular a los ejes x e y. Los planos de medida PM son planos formados por las direcciones x, y, a una distancia del sensor LiDAR 1 (para un valor de z no nulo). Los planos de medida PM son paralelos entre sí.

Como se puede ver en la figura 1, que es un ejemplo de realización de un sensor LiDAR pulsado, el sensor LiDAR 1 utilizado comprende cuatro haces o ejes de medida 2. Los haces de medida 2 están inclinados con respecto al eje vertical z. El sensor LiDAR realiza una medida puntual en cada punto de medida (b1, b2, b3, b4), que son puntos de intersección de un plano de medida PM y de un haz 2. Estos puntos de medida (b1, b2, b3, b4) están representados por círculos negros en la figura 1.

En esta figura, el vector de velocidad del viento W también está representado únicamente en el punto b1, y estos tres componentes Wx, Wy, Wz respectivamente en los ejes x, y y z.

La figura 2 muestra esquemáticamente, en vista por arriba, los puntos de medida (b1, b2, b3, b4) en el plano de medida PM, situado a una altitud de un sensor LiDAR de 4 haces. La hipótesis que se plantea entonces en el método de medida clásico consiste en suponer que en un momento dado los tres componentes del viento en los puntos de medida b1 a b4 son iguales, es decir, que el viento es homogéneo en el cuadrado gris cuyos vértices corresponden a los puntos de medida (b1, b2, b3, b4).

Esta hipótesis de homogeneidad en el plano de medida no es realista, especialmente debido a que el plano de medida está lejos del sensor LiDAR colocado. Por ejemplo, para un sensor LiDAR con cuatro haces como se ilustra en las figuras 1 y 2, para un plano de medida situado a 150 m del sensor LiDAR, y para una apertura de los haces de medida de 28°, la superficie del cuadrado limitado por los puntos de medida tienen el valor de 12700 m². Parece evidente que la velocidad del viento no es homogénea en tal superficie. Así, este método de la técnica anterior no permite determinar con precisión los componentes de la velocidad del viento.

Sumario de la invención

La presente invención tiene como objetivo determinar los componentes de la velocidad del viento, de una manera precisa, robusta, fiable y poco costosa. Para ello, la invención se refiere a un procedimiento para determinar los componentes de la velocidad del viento mediante un sensor LiDAR colocado. Para este procedimiento, se determina la dirección del viento y la velocidad promedio del viento en un plano de medida, después se construye una recta de proyección perpendicular a la dirección del viento en el plano de medida, después se determina un desfase temporal entre los puntos de medida y la recta de proyección, de manera a determinar señales de medida corregidas. Estas señales de medida corregidas permiten determinar los componentes de la velocidad del viento en el plano de medida.

La invención se refiere a un procedimiento para determinar los componentes de la velocidad del viento mediante un sensor LiDAR, estando dicho sensor LiDAR orientado sustancialmente vertical para realizar medidas en al menos un plano de medida sustancialmente horizontal, comprendiendo cada plano de medida al menos dos puntos de medida. Para este procedimiento, se llevan a cabo las siguientes etapas:

- a) adquirir señales de medida de dicho sensor LiDAR para cada punto de medida de dicho al menos un plano de medida;
- b) determinar la dirección promedio del viento y la velocidad promedio del viento en dicho al menos un plano de medida mediante una reconstrucción del viento a partir de dichas señales de medida;
- c) construir en dicho al menos un plano de medida una recta de proyección perpendicular a dicha dirección del viento determinada;
- d) determinar un desfase temporal entre cada punto de medida de dicho al menos un plano de medida y dicha recta de proyección construida, mediante dicha velocidad promedio del viento determinada;
- e) para cada punto de medida de dicho al menos un plano de medida, determinar una señal de medida corregida, correspondiendo dicha señal de medida corregida a la señal de medida en un instante anterior al instante considerado reducida en una duración correspondiente a dicho desfase temporal; y
- f) determinar dichos componentes de la velocidad del viento en dicho al menos un plano de medida mediante dichas señales de medida corregidas.

Según una realización, dicha recta de proyección está construida por una recta perpendicular a dicha dirección del viento que pasa por el baricentro de dichos puntos de medida de dicho al menos un plano de medida, o que pasa por un punto de medida de dicho al menos un plano de medida.

Ventajosamente, dicha recta de proyección está construida por una recta perpendicular a dicha dirección del viento que pasa por el punto de medida de dicho al menos un plano de medida que tiene la medida más reciente.

Según una implementación, dicha reconstrucción del viento tiene en cuenta una hipótesis de uniformidad del viento en dicho al menos un plan de medida.

Según un aspecto, dicho desfase temporal δt del punto de medida i se determina mediante la fórmula:

$$\delta t_i = \frac{x_i \cos \Psi - y_i \sin \Psi}{\bar{v}}$$

con x_i y y_i las coordenadas de dicho punto de medida i en la referencia asociada con dicho al menos un plano de medida $\bar{v}$ dicha velocidad promedio del viento determinada, y Ψ el ángulo formado entre el eje y dicho al menos un plano de medida y dicha recta de proyección.

Según una característica, dicha señal de medida corregida se determina por interpolación de dichas señales de medida anteriores y posteriores a dicho punto de medida considerado.

De manera ventajosa, dichos componentes de la velocidad del viento se determinan mediante la ecuación:

$$\begin{pmatrix} w_x(t) \\ w_y(t) \\ w_z(t) \end{pmatrix} = L_1^{N+} \begin{pmatrix} m_1(t - \delta t_1) \\ m_2(t - \delta t_2) \\ \vdots \\ m_N(t - \delta t_N) \end{pmatrix}$$

siendo w_x , w_y , w_z los componentes de la velocidad del viento, m_1 , m_2 , ..., m_N las señales de medida de los puntos de medida 1 a N , δt dicho desfase temporal de los puntos de medida 1 a N , y

$$L_1^{N+}$$

una matriz de reconstrucción geométrica de los componentes de la velocidad del viento.

Según una realización, dicha dirección promedio del viento y dicha velocidad promedio del viento se determinan para una duración fija o para una ventana de tiempo deslizante, preferiblemente dicha duración fija o dicha ventana de tiempo deslizante está comprendida entre 1 min y 1 h, y preferiblemente entre 5 min y 30 min.

Según una implementación, dicha velocidad promedio del viento se determina en dicho al menos un plano de medida mediante una hipótesis de turbulencia fija y considerando nulo el componente vertical de la velocidad del viento.

Otras características y ventajas del método de acuerdo con la invención se pondrán de manifiesto con la lectura de la siguiente descripción de ejemplos no restrictivos de formas de realización, con referencia a las figuras adjuntas y descritas a continuación.

Lista de las figuras

La figura 1, ya descrita, ilustra un sensor LiDAR colocado para un procedimiento de determinación de los componentes de la velocidad del viento.

La figura 2, ya descrita, ilustra un plan de medida de un sensor LiDAR colocado.

La figura 3 ilustra las etapas del procedimiento según una realización de la invención.

La figura 4 ilustra el desplazamiento de los puntos de medida de un plano de medida en la recta de proyección según una primera realización de la invención.

La figura 5 ilustra el desplazamiento de los puntos de medida de un plano de medida en la recta de proyección según una segunda realización de la invención.

La figura 6 ilustra una configuración geométrica de los haces de un sensor LiDAR para un plano de medida.

La figura 7 muestra un plan de medida de un sensor LiDAR con nueve haces a modo de ejemplo.

La figura 8 ilustra medidas radiales de velocidad de los haces 5 y 7 del ejemplo de la figura 7 utilizadas para un procedimiento según la técnica anterior y para el procedimiento según una realización de la invención.

Descripción de las realizaciones

La presente invención se refiere a un procedimiento para determinar los componentes de la velocidad del viento utilizando un sensor LiDAR. Se denominan componentes de la velocidad del viento las proyecciones de la velocidad del viento en una referencia fija, en particular en una referencia ortonormal.

Para la invención, el sensor LiDAR está dirigido sustancialmente vertical, es decir, la medida se dirige a lo largo de un eje sustancialmente vertical. Por ejemplo, el sensor LiDAR puede colocarse en el suelo y orientarse verticalmente. Según la invención, el sensor LiDAR permite medir la velocidad del viento en al menos un plano de medida. Desde el punto de vista de la orientación del sensor LiDAR, cada plano de medida es sustancialmente horizontal. Existen varios tipos de sensores LiDAR, por ejemplo los sensores LiDAR escaneados, LiDAR continuos o LiDAR pulsados. En el ámbito de la invención, se utiliza preferentemente un LiDAR pulsado. Sin embargo, se pueden utilizar otras tecnologías LiDAR quedándose al mismo tiempo dentro del ámbito de la invención.

El sensor LiDAR permite una medida en continuo. En consecuencia, el uso de tal sensor permite la determinación en continuo de señales de medida. Además, el sensor LiDAR se puede trasladar fácilmente de un sitio a otro. Por ejemplo, el porcentaje de muestreo del sensor LiDAR puede estar comprendido entre 0,1 y 5 Hz (o incluso más en el futuro), y puede tener el valor de 1 Hz. Además, el sensor LiDAR permite obtener informaciones relativas en varios planos de medida a varias alturas. Por lo tanto, el sensor LiDAR también se puede utilizar para determinar componentes de la velocidad del viento a varias alturas, lo que puede servir en particular para determinar la variación de la velocidad del viento en función de la altura.

El sensor LiDAR implementado mediante el procedimiento según la invención puede, por ejemplo, ser conforme al sensor LiDAR mostrado en la figura 1, siendo el objetivo del procedimiento según la invención determinar los componentes W_x , W_y y W_z de la velocidad del viento respectivamente en los ejes x , y , y z .

De manera no limitativa, el procedimiento según la invención funciona con un sensor LiDAR que comprende un número cualquiera de haces.

El procedimiento según la invención comprende las siguientes etapas:

- 1- adquirir señales de medida
- 2- determinar la dirección promedio y la velocidad promedio del viento
- 3- construir una recta de proyección
- 4- determinar el desfase temporal
- 5- determinar la señal de medida corregida
- 6- determinar los componentes de la velocidad del viento.

Estas etapas se detallarán a continuación en la descripción. Las etapas 2 a 6 se pueden implementar mediante medios informáticos, en particular un ordenador. Las etapas 2 a 6 se pueden implementar sin conexión después de la etapa 1.

La Figura 3 ilustra, esquemáticamente y de manera no limitativa, las etapas del procedimiento según una realización de la invención. En primer lugar, se adquiere ACQ las señales de medida M_{acq} del sensor LiDAR en al menos un plano de medida. Después, se utilizan las señales de medida M_{acq} para determinar CAR dos características del viento para el plano de medida: la dirección promedio del viento Dir y la velocidad promedio del viento $\vec{v}$. La dirección promedio del viento Dir se utiliza entonces para construir la recta de proyección DPR que puede definirse por su ángulo ψ . Este ángulo ψ , así como la velocidad promedio del viento $\vec{v}$ permiten determinar DTE el desfase temporal δt entre los puntos de medida y la recta de proyección. Con el desfase temporal δt se determina COR la señal de medida corregida M_{cor} , que se implementa en una reconstrucción de la velocidad del viento REC de manera a determinar los componentes de la velocidad del viento W_{est} en el plano de medida.

1- Adquisición de señales de medida

Durante esta etapa, se adquieren las señales de medida del sensor LiDAR para al menos un plano de medida. En otras palabras, para cada punto de medida de al menos un plano de medida se adquiere la señal de medida proveniente del sensor LiDAR. Ventajosamente, estas señales de medida se pueden registrar, en particular en una memoria informática, para poder procesarlas por medios informáticos en las siguientes etapas.

Con el fin de determinar los componentes de la velocidad del viento en varios planos de medida, esta etapa se puede realizar para varios planos de medida. En este caso, se pueden implementar las siguientes etapas para cada plan de medida.

Ventajosamente, la adquisición de las señales de medida se puede realizar durante un largo tiempo, por ejemplo durante un periodo que puede variar desde varios días hasta un año, o incluso más.

5 **2- Determinación de la dirección promedio y velocidad promedio del viento**

Durante esta etapa, se determina, para cada plano de medida considerado, la dirección promedio y la velocidad promedio del viento, a partir de las señales de medida adquiridas en la etapa 1. Para esta etapa, se puede implementar una reconstrucción del viento que permite una aproximación de la dirección promedio y la velocidad promedio del viento.

Según una realización de la invención, el viento se puede reconstruir mediante una reconstrucción geométrica.

Según un aspecto de la invención, para esta reconstrucción del viento, se puede partir de una hipótesis de uniformidad del viento en el plano de medida considerado, de manera a simplificar esta etapa.

Ventajosamente, es posible determinar la dirección promedio del viento y la velocidad promedio del viento durante una duración fijada o para una ventana de tiempo deslizante, preferiblemente la duración fijada o la ventana de tiempo deslizante está comprendida entre 1 min y 1 h, y preferiblemente entre 5 min y 30 min, y puede tener el valor por ejemplo de 10 min. En efecto, estos intervalos de tiempo permiten disponer de características representativas del viento para la realización de las siguientes etapas.

Ventajosamente, la velocidad promedio del viento puede determinarse en el plano de medida considerado mediante una hipótesis de turbulencia fija y considerando nula el componente vertical de la velocidad del viento.

Según una realización de la invención, la reconstrucción geométrica de los componentes de la velocidad del viento puede implementar una operación pseudoinversa "Moore-Penrose" aplicada a las señales de medida. Esta reconstrucción geométrica en esta fase permite una aproximación de los componentes de la velocidad del viento, que difiere de la determinación de los componentes de la velocidad del viento de la etapa 6.

La figura 6 ilustra, esquemáticamente y de manera no limitativa, una configuración geométrica de las señales de medida de un sensor LiDAR (no mostrado). En esta figura se muestran cuatro haces 2 de un sensor LiDAR. En esta figura también se muestra la referencia x, y, z de centro O, relacionado al sensor LiDAR. El centro O corresponde al sensor LiDAR, el eje z la dirección vertical y los ejes x e y forman un plano horizontal (definido de la misma manera que para la figura 1). Cada haz 2 está orientado según un eje de medida representado por un vector Ob_i , variando i de 1 a 4 para representar los 4 haces, y representando bi los puntos de medida del plano de medida considerado. Cada vector Ob_i está orientado con respecto a la referencia x, y, z mediante los ángulos θ_i y ϕ_i . El ángulo θ_i está definido en el plano (x, y) con respecto al eje x. El ángulo ϕ_i se define con respecto al eje z.

Usando proyecciones geométricas, se puede escribir la siguiente ecuación:

$$m_i(t) = (\sin(\phi_i)\cos(\theta_i) \quad \sin(\phi_i)\sin(\theta_i) \quad \cos(\phi_i)) \begin{pmatrix} w_x(t) \\ w_y(t) \\ w_z(t) \end{pmatrix} = L_i w(t)$$

Con 1, ..., i, ..., n los puntos de medidas de un plano de medida, $m_1, \dots, m_i, \dots, m_n$ las señales de medida del plano de medida, w_x, w_y, w_z los componentes de la velocidad del viento, L_i una matriz de reconstrucción geométrica dependiente en los ángulos θ_i y ϕ_i .

Mediante la operación pseudoinversa "Moore-Penrose", se pueden obtener por lo tanto los componentes de la velocidad del viento estimados en el plano de medida a partir de las señales de medida:

$$w(t) = \begin{pmatrix} w_x(t) \\ w_y(t) \\ w_z(t) \end{pmatrix} = L_1^+ \begin{pmatrix} m_1(t) \\ m_2(t) \\ \vdots \\ m_N(t) \end{pmatrix}$$

con

$$L_1^+ = \begin{pmatrix} \sin(\phi_1)\cos(\theta_1) & \sin(\phi_1)\sin(\theta_1) & \cos(\phi_1) \\ \sin(\phi_2)\cos(\theta_2) & \sin(\phi_2)\sin(\theta_2) & \cos(\phi_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin(\phi_N)\cos(\theta_N) & \sin(\phi_N)\sin(\theta_N) & \cos(\phi_N) \end{pmatrix}$$

y, para una matriz L , el exponente “+” significa:

$$L^+ = L^T(LL^T)^{-1}$$

- 5 Según una implementación de la invención, esta etapa puede comprender una etapa de filtrado de la velocidad estimada, en particular para limitar los valores atípicos con el objetivo de hacer que el procedimiento sea más fiable y robusto.

10 Según una realización, este filtrado se puede implementar mediante un filtro de paso bajo de orden uno de manera a restablecer una representación continua y realista del estado del viento medido. Puede tratarse de un filtro de constante de tiempo variable. Cuanto más antiguo sea el último valor válido pasado en el filtro de orden uno, más disminuirá la constante de tiempo del filtro (en otras palabras, el peso del estado almacenado en el filtro es cada vez más débil con respecto al peso del siguiente valor válido). Mediante esta realización, se deriva un valor instantáneo, de baja frecuencia, sin ruido y realista a partir del estado del viento contenido en las medidas radiales.

15 Una vez aproximados los componentes de la velocidad del viento mediante este método, se determina la dirección promedio del viento en el plano de medida considerado, y la velocidad promedio del viento en el plano de medida considerado.

20 **3- construcción de una recta de proyección**

Durante esta etapa se construye en cada plano de medida considerado una recta de proyección perpendicular a la dirección promedio del viento determinada en la etapa anterior. Así, se construye una recta de proyección que es ortogonal a la dirección promedio del viento. La recta de proyección está en el plano de medida horizontal.

25 Según una realización de la invención, se puede construir una recta de proyección que pasa por el baricentro de los puntos de medida. Esta realización permite tener una recta de proyección con un punto fijo en el tiempo (es decir invariante en el tiempo).

30 La figura 4 ilustra, esquemáticamente y de manera no limitativa, la construcción de esta recta de proyección según una primera realización. La figura 4 es una vista de un plano de medida horizontal, definido por los ejes x e y . En este plano de medida están representados cuatro puntos de medida (b_1 , b_2 , b_3 , b_4). El baricentro de estos puntos de medida es el punto O , que corresponde para este ejemplo al centro de la referencia x , y , en el que se encuentra el sensor LiDAR (no mostrado). En esta figura, también se ilustra el vector de velocidad del viento WS así como la dirección de eje x' . Por lo tanto, se construye la recta de proyección y' , que pasa por el punto O y que es perpendicular al eje x' . Los demás elementos de la figura 4 se detallan en el resto de la descripción.

En una variante, se puede construir una recta de proyección que pasa por un punto de medida. Preferiblemente, se puede construir una recta de proyección que pasa por el punto de medida cuya medida es la más reciente. En efecto, al realizarse la medida de un sensor LiDAR, haz a haz, con un porcentaje de muestreo, las medidas no se realizan al mismo tiempo para todos los puntos de medida. Por lo tanto, existe un punto para el cual la medida es más reciente que los demás puntos. Esta variante permite obtener una medida sin desfase, es decir sin desfase temporal (véase las etapas siguientes). La consideración de la medida más reciente permite aumentar la precisión del procedimiento según la invención.

45 La figura 5 ilustra, esquemáticamente y de manera no limitativa, la construcción de esta recta de proyección según una segunda realización. La figura 5 es una vista de un plano de medida horizontal, definido por los ejes x e y . En este plano de medida están representados cuatro puntos de medida (b_1 , b_2 , b_3 , b_4). El baricentro de estos puntos de medida es el punto O , que corresponde para este ejemplo al centro de la referencia x , y , en el que se encuentra el sensor LiDAR (no mostrado). En esta figura, también se ilustra el vector de velocidad del viento WS . Para esta figura, se considera que el punto de medida b_1 es el punto para el cual la medida es la más reciente. Se construye en primer lugar un eje x' paralelo a la velocidad del viento WS y que pasa por el punto de medida b_1 , y en segundo lugar, se construye la recta de proyección y' , que pasa por el punto de medida b_1 , y que es perpendicular al eje x' . Los demás elementos de la figura 5 se detallan en el resto de la descripción.

55 **4- determinar el desfase temporal**

60 Durante esta etapa, se determina, dentro de cada plano de medida considerado, un desfase temporal entre cada punto de medida y la recta de proyección construida en la etapa anterior, y mediante dicha velocidad promedio del viento determinada en la etapa 2. El desfase temporal es una duración que corresponde al tiempo que tarda una masa de aire en recorrer la distancia entre el punto de medida y la recta de proyección, debido al viento. Gráficamente, esta etapa consiste en proyectar cada punto de medida sobre la recta de proyección y determinar el desfase temporal entre cada punto de medida y su proyección sobre la recta de proyección. Se trata de una proyección ortogonal en el plano de medida, y por lo tanto la proyección se obtiene por la intersección de la recta de proyección con una recta paralela a la dirección del viento que pasa por el punto de medida. Esta etapa equivale a expresar la posición de los puntos de medida en la recta de proyección.

Para la primera realización de la figura 4, en un primer tiempo, se proyectan los puntos de medida (b1, b2, b3, b4) sobre la recta de proyección y'. Se obtienen así los puntos proyectados (b1', b2', b3', b4'). Después, se determina el tiempo recorrido por el viento para cada distancia: la distancia entre los puntos b1 y b1', la distancia entre los puntos b2 y b2', la distancia entre los puntos b3 y b3', y la distancia entre los puntos b4 y b4'. Estos tiempos recorridos corresponden al desfase temporal.

Para la segunda realización de la figura 5, en un primer tiempo, se proyectan los puntos de medida (b1, b2, b3, b4) sobre la recta de proyección y'. Se obtienen así los puntos proyectados (b1', b2', b3', b4'). Después, se determina el tiempo recorrido por el viento para cada distancia: la distancia entre los puntos b2 y b2', la distancia entre los puntos b3 y b3', y la distancia entre los puntos b4 y b4'. Estos tiempos recorridos corresponden al desfase temporal. Dado que el punto de medida b1 pertenece a la recta de proyección, el punto b1 es su propia proyección y, por lo tanto, el desfase temporal para este punto es nulo.

Según una realización de la invención, el desfase temporal δt_i del punto de medida i se puede determinar mediante la fórmula:

$$\delta t_i = \frac{x_i \cos \Psi - y_i \sin \Psi}{\bar{v}}$$

siendo x_i y y_i las coordenadas del punto de medida i en la referencia asociado con el plano de medida considerado, $\bar{v}$ la velocidad promedio del viento determinada en la etapa 2, y Ψ el ángulo formado entre el eje y del plano de medida y la recta de proyección (que también corresponde al ángulo formado entre la dirección del vector de velocidad del viento WS con respecto al eje). Este ángulo Ψ se ilustra en las figuras 4 y 5.

Preferiblemente, el desfase temporal es positivo para los puntos de medida situados aguas arriba de la recta de proyección, y el desfase temporal es negativo para los puntos de medida situados aguas abajo de la recta de proyección. Definiéndose aguas arriba y aguas abajo según la dirección promedio del viento.

5- determinar la señal de medida corregida

Durante esta etapa, en cada plano de medida considerado, para cada punto de medida, se determina una señal de medida corregida, correspondiendo la señal de medida corregida a la señal de medida en un momento considerado reducida en una duración que corresponde a dicho desfase temporal determinado en la etapa anterior (se recuerda que el desfase temporal puede ser negativo o positivo). En otras palabras, se determinan las medidas que se realizarían sobre los puntos de medida proyectados sobre la recta de proyección. Para ello, se tienen en cuenta las medidas reales en los puntos de medida, y los desfases temporales determinados en la etapa anterior.

La medida corregida se puede entonces escribir:

$$m'_i(t) = m_i(t - \delta t_i)$$

Con i los puntos de medida, m_i las medidas adquiridas en el punto de medida i, m'_i la medida corregida en el punto de medida i, y δt_i el desfase temporal del punto de medida i. Dado que el desfase temporal puede ser negativo o positivo, el instante $t - \delta t_i$ puede ser menor que el instante t (es decir, anterior al instante t) o mayor que el instante t (es decir, posterior al instante t). En efecto, esta fórmula está permitida en particular por la hipótesis de turbulencia fija de Taylor, que indica que la advección proporcionada por las propias circulaciones turbulentas es débil y que, en consecuencia, la advección de un campo de turbulencia más allá de un punto fijo puede considerarse enteramente debido al caudal promedio. En otras palabras, la totalidad de la masa de aire, incluidas las turbulencias, se mueve a la velocidad promedio del campo de viento.

Según una realización de la invención, cuando, en el instante $t - \delta t_i$, no se dispone de ninguna medida real adquirida, entonces se puede implementar una interpolación de las medidas anteriores y posteriores del punto de medida considerado para estimar la medida corregida. Se puede implementar cualquier método de interpolación, por ejemplo mediante un promedio, un promedio ponderado, etc.

6- determinar los componentes de la velocidad del viento.

Durante esta etapa, en cada plano de medida considerado, se determinan los componentes de la velocidad del viento, utilizando las señales de medida corregidas determinadas en la etapa anterior. La determinación de los componentes de la velocidad del viento a partir de las medidas corregidas permite reducir la dimensión de la hipótesis de homogeneidad del campo de viento de dos dimensiones a una única dimensión (la de la recta de proyección) mediante la consideración de la coherencia temporal de las medidas del sensor LiDAR.

En efecto, por ejemplo, para un sensor LiDAR con cuatro haces como se ilustra en las figuras 1 y 2, para un plano de medida situado a 150 m del sensor LiDAR, y para una apertura de los haces de medida de 28°, la superficie del cuadrado limitado por los puntos de medida vale 12700 m², mientras que la dimensión del segmento de la recta de proyección obtenida mediante el procedimiento según la invención (el segmento de recta que conecta todas las proyecciones de los puntos de medida) cuando la dirección del viento forma un ángulo de 45° con respecto al eje x, es de 160 m.

Según una realización, se puede implementar un método de reconstrucción del viento.

Ventajosamente, los componentes de la velocidad del viento se pueden determinar mediante la ecuación:

$$\begin{pmatrix} w_x(t) \\ w_y(t) \\ w_z(t) \end{pmatrix} = L_1^{N+} \begin{pmatrix} m_1(t - \delta t_1) \\ m_2(t - \delta t_2) \\ \vdots \\ m_N(t - \delta t_N) \end{pmatrix}$$

siendo w_x , w_y , w_z los componentes de la velocidad del viento, m_1 , m_2 , ..., m_N las señales de medida de los puntos de medida 1 a N, δt el desfase temporal de los puntos de medida 1 a N, y

$$L_1^{N+}$$

una matriz de reconstrucción geométrica de los componentes de la velocidad del viento.

Según una realización preferida, la matriz de reconstrucción geométrica de los componentes de la velocidad del viento puede ser idéntica a la utilizada en la realización de la etapa 2. Así, se puede escribir:

$$L_1^N = \begin{pmatrix} \sin(\varphi_1)\cos(\theta_1) & \sin(\varphi_1)\sin(\theta_1) & \cos(\varphi_1) \\ \sin(\varphi_2)\cos(\theta_2) & \sin(\varphi_2)\sin(\theta_2) & \cos(\varphi_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin(\varphi_N)\cos(\theta_N) & \sin(\varphi_N)\sin(\theta_N) & \cos(\varphi_N) \end{pmatrix}$$

y para una matriz L, el exponente "+" significa:

$$L^+ = L^T(LL^T)^{-1}$$

Además, la presente invención se refiere a un procedimiento para instalar un aerogenerador, en el que se implementan las siguientes etapas:

- determinar los componentes de la velocidad del viento mediante el procedimiento según una cualquiera de las variantes o combinaciones de variantes anteriormente descritas, en al menos un sitio (una ubicación),
- instalar un aerogenerador en el sitio en función de los componentes de la velocidad del viento.

Durante la etapa de instalación, se puede determinar el aerogenerador instalado en términos de dimensiones, clase, estructura, también se puede determinar su orientación y su control en función de los componentes de la velocidad del viento.

Según una implementación de la invención, se puede repetir la primera etapa en varios sitios. Después, se determina el sitio más adecuado para instalar un aerogenerador en función de los componentes de la velocidad del viento. Puede tratarse, en particular, del sitio en el que la velocidad del viento se encuentra dentro de un intervalo de funcionamiento adaptado a la recuperación de energía mediante un aerogenerador.

Ejemplo comparativo

Las características y ventajas del procedimiento según la invención aparecerán más claramente con la lectura del ejemplo de aplicación siguiente.

El ejemplo se refiere a la simulación CFD (del inglés "Computational Fluid Dynamics" que puede traducirse como dinámica de fluidos por resolución digital) de señales de medida de un sensor LiDAR colocado y orientado verticalmente con nueve haces. Para esta simulación, se generan 600 señales de medida del viento. Una vez generadas las señales de medida del viento, se modela el sensor LiDAR con proyección sobre haces para obtener las

medidas radiales. A fin de observar la puesta en fase de las señales temporales, se neutralizan los componentes laterales y verticales de la velocidad del viento.

La figura 7 ilustra, de forma esquemática y de manera no limitativa, un plano de medida de un sensor LIDAR que dispone de nueve haces, estando situado el plano de medida a 130 m del suelo. En esta figura, se indica la posición de los puntos de medida numerados de 1 a 9, y la orientación del viento W determinada aquí en 600s (para este ejemplo, la dirección del viento W es paralela al eje x), la recta de proyección y' sobre la que se proyectan las medidas (para este ejemplo, la recta de proyección y' es paralela al eje y). Para cada punto de medida, se indican dos valores: la distancia con respecto a la recta de proyección en m, y el desfase temporal en s.

La figura 8 representa curvas de la velocidad radial del viento RWS en m/s en función del tiempo T en s, para los puntos de medida 5 y 7, que son los puntos de medida más alejados de la recta de proyección. La figura superior representa la velocidad radial del viento teniendo en cuenta la señal de medida adquirida directamente, según un procedimiento según la técnica anterior AA para los puntos de medida 5 y 7. Dado que estos puntos están separados por 230 m, las medidas para estos dos puntos no son idénticas, y ciertas variaciones del punto 7 resultan de un desfase temporal de las variaciones de las medidas del punto 5, pero todas las variaciones observadas en el punto de medida 7 no pueden deducirse directamente de las variaciones observadas en el punto de medida 5. En consecuencia, si se aplica directamente el método según la técnica anterior, se presenta una incoherencia temporal, lo que implica una imprecisión en la determinación de los componentes de la velocidad del viento. La figura inferior representa la velocidad radial del viento teniendo en cuenta la señal de medida corregida, según el procedimiento según la invención, para los puntos de medida 5 y 7. Se observa que el procedimiento según la invención permite una buena sincronización temporal de las señales de medida: las curvas están casi superpuestas. Así, gracias a esta sincronización, la determinación de los componentes de la velocidad del viento puede ser más precisa y fiable.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para determinar los componentes de la velocidad del viento mediante un sensor LiDAR (1), estando orientado dicho sensor LiDAR (1) sustancialmente vertical para realizar las medidas en al menos un plano de medida (PM) sustancialmente horizontal, comprendiendo cada plano de medida (PM) al menos dos puntos de medida (b1, b2, b3, b4), caracterizado por que se implementan las siguientes etapas:

a) adquirir (ACQ) señales de medida de dicho sensor LiDAR (1) para cada punto de medida (b1, b2, b3, b4) de dicho al menos un plano de medida (PM);

b) determinar la dirección promedio del viento (Dir) y la velocidad promedio del viento ($\vec{v}$) en dicho al menos un plano de medida (PM) mediante una reconstrucción del viento a partir de dichas señales de medida;

c) construir en dicho al menos un plano de medida una recta de proyección perpendicular a dicha dirección del viento determinada (Dir);

d) determinar un desfase temporal (δt) entre cada punto de medida (b1, b2, b3, b4) de dicho al menos un plano de medida (PM) y dicha recta de proyección construida, mediante dicha velocidad promedio del viento ($\vec{v}$) determinada;

e) para cada punto de medida (b1, b2, b3, b4) de dicho al menos un plano de medida (PM), determinar una señal de medida corregida, correspondiendo dicha señal de medida corregida a la señal de medida en un instante anterior al instante considerado reducida en una duración correspondiente a dicho desfase temporal (δt); y

f) determinar dichos componentes de la velocidad del viento en dicho al menos un plano de medida (PM) mediante dichas señales de medida corregidas.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha recta de proyección se construye mediante una recta perpendicular a dicha dirección del viento (Dir) que pasa por el baricentro de dichos puntos de medida (b1, b2, b3, b4) de dicho al menos un plano de medida (PM), o que pasa por un punto de medida (b1, b2, b3, b4) de dicho al menos un plano de medida (PM).

3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que dicha recta de proyección se construye mediante una recta perpendicular a dicha dirección del viento (Dir) que pasa por el punto de medida (b1, b2, b3, b4) de dicho al menos plano de medida que tiene la medida más reciente.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha reconstrucción del viento toma en cuenta una hipótesis de uniformidad del viento en dicho al menos un plan de medida.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho desfase temporal δt del punto de medida i se determina mediante la fórmula:

$$\delta t_i = \frac{x_i \cos \Psi - y_i \sin \Psi}{\vec{v}}$$

con x_i y y_i las coordenadas de dicho punto de medida i en la referencia asociada con dicho al menos un plano de medida, v dicha velocidad promedio del viento determinada, y Ψ el ángulo formado entre el eje y dicho al menos un plano de medida y dicha recta de proyección.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se determina dicha señal de medida corregida mediante interpolación de dichas señales de medida anteriores y posteriores de dicho punto de medida considerado.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dichos componentes de la velocidad del viento se determinan mediante la ecuación:

$$\begin{pmatrix} w_x(t) \\ w_y(t) \\ w_z(t) \end{pmatrix} = L_1^{N+} \begin{pmatrix} m_1(t - \delta t_1) \\ m_2(t - \delta t_2) \\ \vdots \\ m_N(t - \delta t_N) \end{pmatrix}$$

siendo w_x , w_y , w_z los componentes de la velocidad del viento, m_1 , m_2 , ..., m_N las señales de medida de los puntos de medida 1 a N, δt dicho desfase temporal de los puntos de medida 1 a N, y

L_1^{N+}

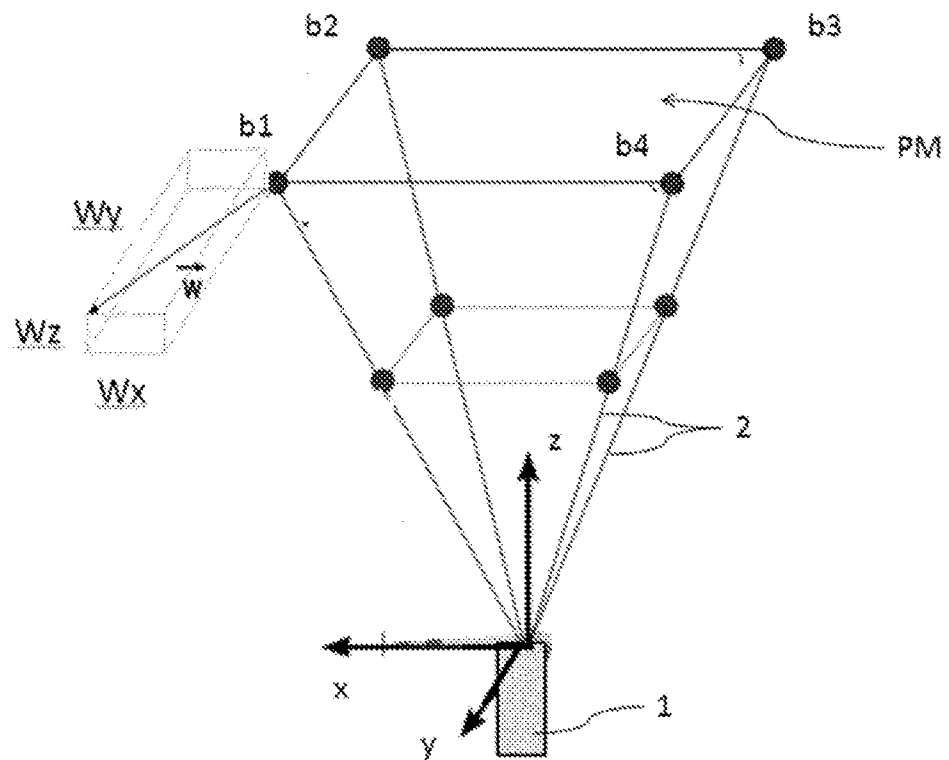
una matriz de reconstrucción geométrica de los componentes de la velocidad del viento.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha dirección promedio del viento (Dir) y dicha velocidad promedio del viento ($\vec{v}$) se determinan para una duración fijada o durante una ventana de tiempo

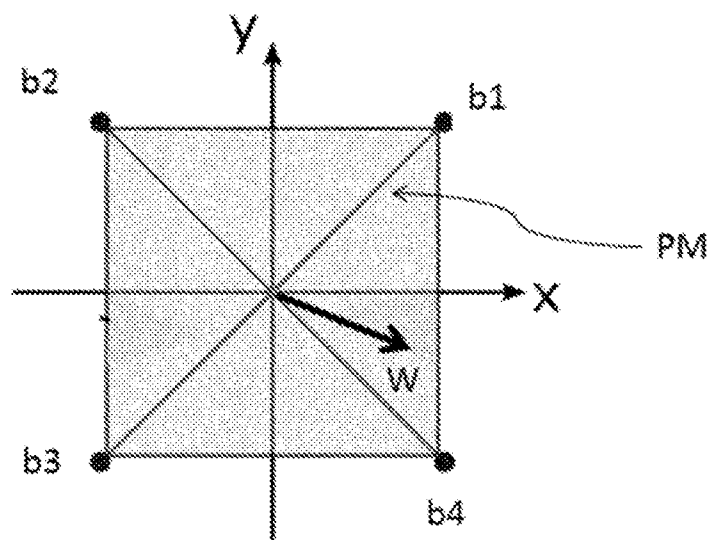
deslizante, preferiblemente dicha duración fijada o dicha ventana de tiempo deslizante está comprendida entre 1 min y 1 h, y preferentemente entre 5 min y 30 min.

- 5 9. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha velocidad promedio del viento ($\bar{v}$) se determina en dicho al menos un plano de medida mediante una hipótesis de turbulencia fija y considerando nula el componente vertical de la velocidad del viento.

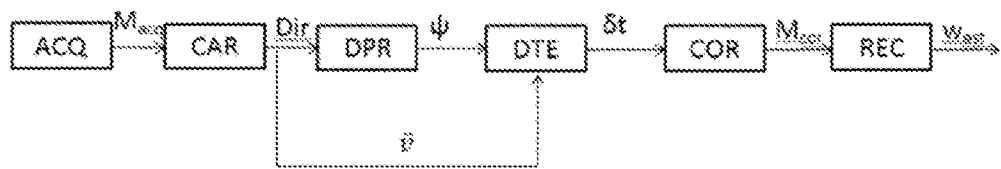
[Fig 1]



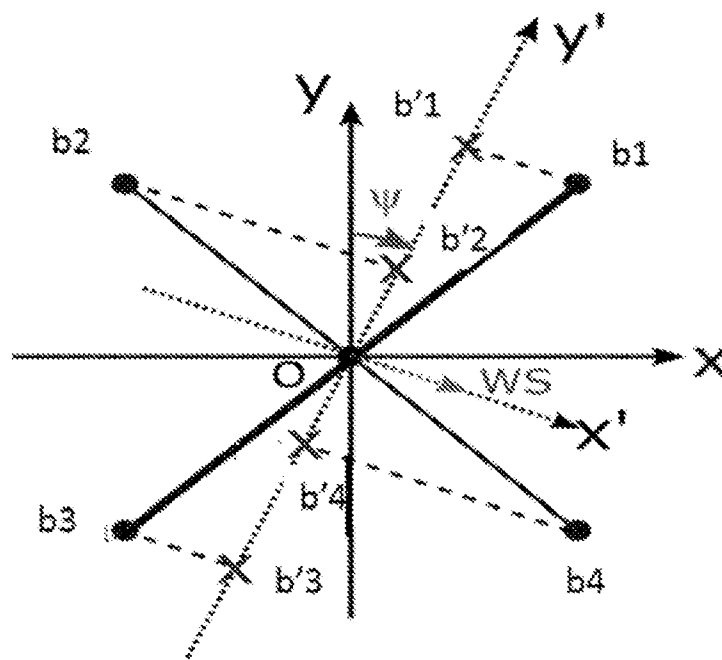
[Fig 2]



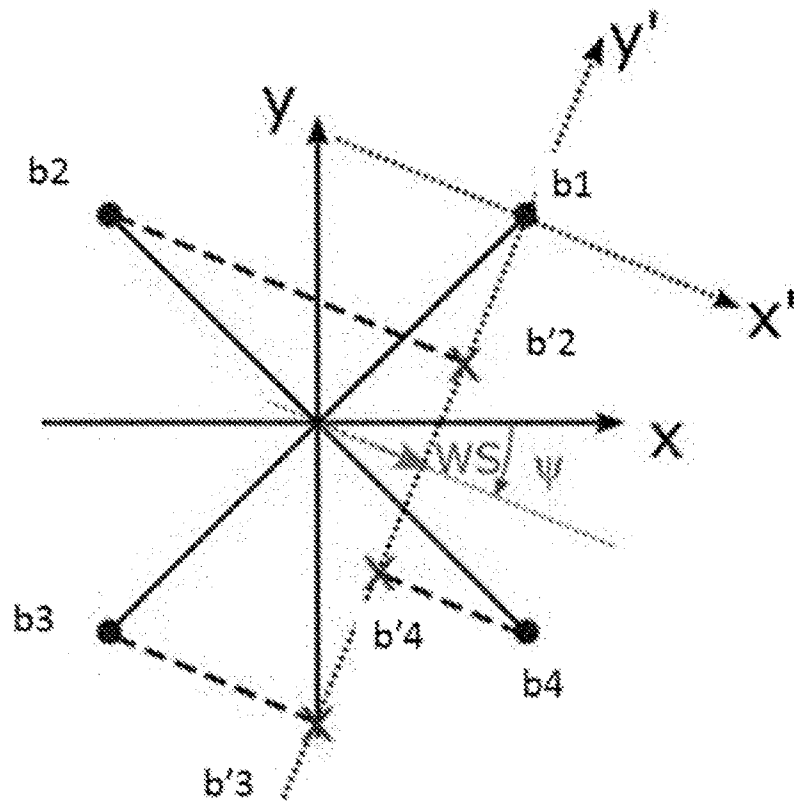
[Fig 3]



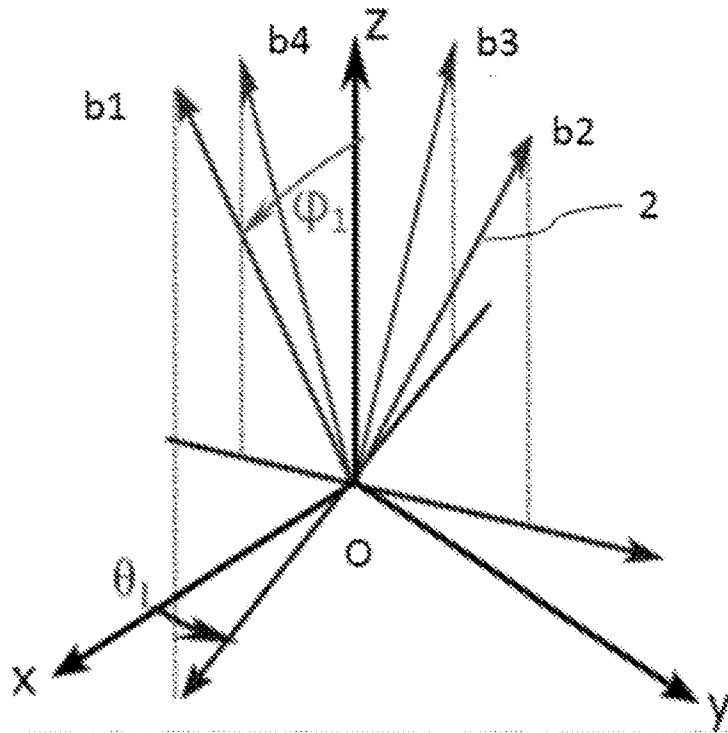
[Fig 4]



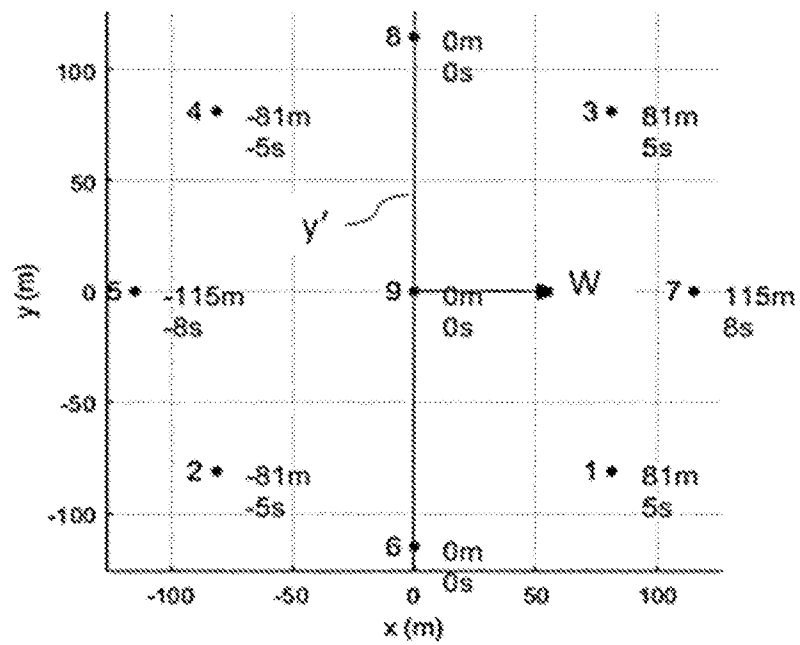
[Fig 5]



[Fig 6]



[Fig 7]



[Fig 8]

