

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 755 789**

51 Int. Cl.:

G01C 17/34 (2006.01)

G01C 1/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.12.2013 PCT/IT2013/000365**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.07.2014 WO14102841**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.12.2013 E 13844545 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.08.2019 EP 2938963**

54 Título: **Brújula solar electrónica de alta precisión**

30 Prioridad:

27.12.2012 IT RM20120664

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

23.04.2020

73 Titular/es:

**ENEA - AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE
TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO
ECONOMICO SOSTENIBILE (100.0%)
Lungotevere G.A. Thaon di Revel 76
00196 Roma (RM), IT**

72 Inventor/es:

**FLORA, FRANCESCO;
BOLLANTI, SARAH;
DE MEIS, DOMENICO;
DI LAZZARO, PAOLO;
FASTELLI, ANTONIO;
GALLERANO, GIAN PIERO;
MEZI, LUCA;
MURRA, DANIELE;
TORRE, AMALIA y
VICCA, DAVIDE**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 755 789 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

Brújula solar electrónica de alta precisión

5 La presente invención se refiere a una brújula solar electrónica de alta precisión.

Más específicamente, la invención se refiere a una brújula solar de alta precisión, estudiada y realizada específicamente para evitar los inconvenientes del efecto crepuscular y/o de las aberraciones producidas por la óptica refractiva.

10 Como se conoce bien, en muchas aplicaciones es necesario conocer con gran precisión, la orientación de la dirección de observación de una localización geográfica o de un plano de referencia específico de un objeto con respecto al norte. Entre estas aplicaciones, además de las típicas de los tacómetros/teodolitos como las prospecciones cartográficas, pueden mencionarse medidas para la monitorización geológica, ambiental, de ingeniería civil, prospecciones de sitios urbanos o industriales, instalación de plantas de concentración solar (tanto térmica como fotovoltaica), la instalación de equipos de radar, la conducción de robots para prospecciones en áreas contaminadas o para misiones extraterrestres, etc.

15 Para estos fines, se han usado, en general, las brújulas magnéticas, que sin embargo tienen una precisión baja. De hecho, el norte magnético no coincide con el norte geográfico y la diferencia entre los mismos varía con el tiempo (incluso a diario). Además, la presencia de materiales ferromagnéticos cerca de la brújula puede afectar significativamente a su funcionamiento. Por lo tanto, la precisión que puede obtenerse con una brújula magnética es en general del orden de 1°.

20 Un dispositivo que aumenta en gran medida la precisión de la medición del norte geográfico está representado por la brújula solar, es decir, unos dispositivos basados en el uso de la posición del sol con respecto al observador. La mayoría de las brújulas solares modernas son electrónicas y están equipadas con un GPS (sistema de colocación global), capaz de proporcionar las coordenadas del lugar y la hora con alta precisión, así como un sistema para detectar la posición del sol. Esta posición puede calcularse mediante ecuaciones conocidas, a partir de las cuales y a través de un procesamiento adecuado, puede obtenerse la dirección del norte verdadero con una precisión de unas pocas décimas de grado.

25 El uso de brújulas solares es muy antiguo, pero la necesidad de la detección de la hora exacta, las coordenadas exactas del lugar y especialmente la posición exacta del sol, ha implicado que solo desde algunas décadas se haya producido un desarrollo de prototipos con una precisión comparable a la de las brújulas magnéticas o superior.

30 Ejemplos de patentes pertenecientes al estado de la técnica en las brújulas solares son las patentes US2155402, US2102587, GB525 927, US4899451, US5425178, US5459931, US4028813, US2010/0177601, FR2761770, ES2179721 y CN201297931U, todas las cuales, sin embargo, tienen en general la desventaja de tener que configurarse manualmente, actuando sobre goniómetros adecuados, las coordenadas del lugar de observación y de la hora solar local verdadera (es decir, la correcta sobre la base de la longitud del lugar y de la ecuación del tiempo), que puede obtenerse para cualquier fecha a partir del libro de las efemérides del año en curso.

35 Otras soluciones de brújulas solares más avanzadas proporcionan un sensor de imagen y un segundo elemento (óptico o mecánico) que, combinado con el sensor, permite la localización de la posición del sol. El sensor es en general una matriz CCD o una matriz de fotodiodos, mientras que el segundo elemento puede ser una lente (patentes US2007/117078, US2009/0044418, también publicadas como la patentes US2010/7698825, US2012/0173143, CN101344391, US2012/0116711), o una máscara de agujeros (véase Carl Christian Liebe de Caltech "Compact Optoelectronic Compass", Laboratorio de propulsión a chorro de la NASA, NPO-30872, NASA Tech Briefs, enero de 2004) o incluso un lápiz óptico simple que tiene la función del gnomon de un reloj de sol (como en la patente US2012/0227273).

40 La mayoría de las brújulas electrónicas avanzadas se conectan, en general, a un ordenador y a un receptor GPS. Algunos de los mismos requieren, como se ha mencionado, una consulta directa de la tabla de efemérides (o similar) para calcular la hora solar real, mientras que otros tienen una tabla de valores embebida o un software de cálculo astronómico de la posición del sol.

45 Todos los sistemas mencionados de acuerdo con la técnica anterior reivindican una precisión, en general, mejor de las brújulas magnéticas, de aproximadamente 1/10 de grado (es decir, 6').

50 Por lo tanto, a la luz de lo anterior, es un objeto de la presente invención proponer una brújula electrónica solar menos compleja, pero más precisa que las fabricadas de acuerdo con las tecnologías ya conocidas.

55 Por lo tanto, un objeto específico de la presente invención es una brújula solar electrónica de acuerdo con la reivindicación 1. Otras realizaciones ventajosas del dispositivo se describen en las reivindicaciones dependientes 2-11.

Es un objeto adicional de la presente invención un método para determinar la dirección de apuntado de un objeto con respecto al norte geográfico usando una brújula solar electrónica de acuerdo con la reivindicación 12. Las realizaciones adicionales ventajosas del método se describen en las reivindicaciones dependientes 13-15.

A continuación, se describirá la presente invención, con fines ilustrativos pero no limitativos, de acuerdo con sus realizaciones preferidas, haciendo referencia específica a las figuras de los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 muestra una vista en perspectiva de una brújula solar electrónica de alta precisión de acuerdo con la presente invención;

la figura 1' muestra una vista en perspectiva de una sección de una unidad de detección de la brújula solar electrónica de acuerdo con la figura 1;

la figura 2 muestra una gráfica que ilustra el factor de aumento de error de la brújula como resultado de un error en la detección del ángulo del sol en relación con el plano de la ranura o del eje vertical de la brújula, en el caso de que se elija una inclinación del plano en el que la ranura es igual a 45° con respecto a la horizontal; y

la figura 3 muestra la aplicación de la brújula de acuerdo con un ejemplo que no forma parte de la invención en instrumentos tales como teodolitos, tacómetros o estaciones totales.

En las diferentes figuras, las partes similares se indican con los mismos números de referencia.

Haciendo referencia a las figuras 1 y 1', pueden verse una brújula electrónica solar de alta precisión 1 de acuerdo con la presente invención.

La brújula solar electrónica 1 comprende un soporte 2, una unidad de detección 3 del sol, unos medios para apuntar 4, un nivel biaxial 5 y una unidad lógica de control (no mostrado en la figura).

En particular, dicha unidad de detección 3 es capaz de rotar alrededor de un eje vertical indicado con la letra A, de acuerdo con el ángulo indicado con φ , con respecto a dicho soporte 2, e incluye un goniómetro 34 capaz de medir dicho φ ángulo. Dicho soporte 2 comprende un cuerpo de contención 21, que descansa sobre una base plana 22, con al menos un lado recto 22', para permitir la alineación o la colocación, por ejemplo, a una pared, y un trípode 23. Dicho cuerpo de contención 21 está fijo a dicha base plana 22, mientras que dicha base plana 22 está acoplada de manera rotatoria con dicho trípode 23, con el fin de rotar con respecto al eje vertical A.

La unidad de detección 3 comprende un recipiente 31, en el que se coloca un fotosensor de matriz F o un sensor óptico, que puede ser normalmente un CCD (dispositivo de carga acoplada) o un sensor de imagen CMOS (semiconductor de óxido de metal complementario). El sensor óptico F puede estar constituido por una matriz bidimensional de píxeles, o por una "matriz" (matriz unidimensional) de píxeles (preferiblemente rectangular). Esta configuración reduce el coste y es equivalente a una integración de la imagen en la dirección de la línea de luz.

Dicho recipiente 31 está cerrado por una tapa 32, adecuadamente separada del fotosensor F y preferentemente paralela al mismo, en el que se obtiene una ranura 33 de tamaño apropiado. En particular, la elección de la ranura 33, que produce la imagen del sol en el fotosensor F, con el fin de detectar su posición angular, elimina los problemas relacionados con las aberraciones producidas por la óptica refractiva y aquellas debidas al efecto crepuscular en los dispositivos que usan un gnomon.

La dimensión de la ranura 33 debería ser lo suficientemente grande como para evitar los problemas de difracción, pero lo suficientemente pequeña como para minimizar la anchura de la línea de luz en el sensor. El mejor compromiso es elegir una anchura que proporcione una difracción igual al tamaño de la propia ranura, es decir:

$$\Delta f = \sqrt{\lambda \cdot d}, \quad [1]$$

donde λ es la longitud de onda promedio de la luz solar ($\sim 0,5 \mu\text{m}$) y d es la distancia que separa la ranura del sensor. Por ejemplo, para una distancia del sensor de 1 cm, la ranura debería tener una anchura de aproximadamente $70 \mu\text{m}$ ($\pm 50 \%$).

En particular, en una realización de la brújula 1 de acuerdo con la invención, la distancia d entre el fotosensor F y la ranura 33 está preferentemente entre 0,5 y 5 cm y la anchura de la ranura 33 está preferentemente entre 50 y 160 μm .

La ranura 33 y el fotosensor F son preferentemente paralelos e integrales entre sí y están inclinados un ángulo β de preferencia igual a 45° con respecto al plano horizontal.

La longitud de la ranura 33 es preferentemente igual a $d/(\sin(\beta) \cdot \cos(\beta))$, que es un valor tal como para permitir que la luz del sol alcance el fotosensor F para cualquier valor de elevación del sol con respecto al horizonte.

Unos medios para apuntar 4 comprenden un puntero óptico 41, por ejemplo, un telescopio con un punto de mira, que puede inclinarse con respecto al plano de la base plana 22, de acuerdo con un ángulo de elevación indicado con γ , posiblemente combinado con un puntero láser 42, capaz de emitir un rayo láser apuntador 42'.

Dichos medios para apuntar 4 están instalados en dicho cuerpo de contención 21, con el fin de poder rotar alrededor de dicho eje vertical A. Los medios de ajuste comprenden un nivel biaxial 5 o un inclinómetro digital de alta precisión, para garantizar la verticalidad del eje de rotación A del puntero 41, integral con el soporte 2, y el recipiente 31, y un detector GPS (no mostrado en la figura), para adquirir las coordenadas locales y la hora de Greenwich.

La unidad de control lógica (no mostrada) comprende también un microprocesador programable, conectado al fotosensor F, al GPS y al goniómetro 34, con el fin de procesar los datos recibidos con un software adecuado, que proporciona en una pantalla 6 la dirección de apuntado del telescopio, tanto numéricamente como posiblemente con una flecha que indica la dirección del norte geográfico.

La brújula 1 también puede estar equipada con unos medios de interfaz 7, tales como un teclado, provisto de un botón de inicio y, posiblemente, una serie de botones adecuados para permitir la introducción de los datos de entrada necesarios para ejecutar la medición, y una batería y/o un dispositivo de suministro de energía de panel fotovoltaico.

La brújula 1, objeto de la presente invención es esencialmente un tipo de "detección" y se usa para determinar el ángulo con respecto a la dirección del sur (o posiblemente del norte) llamado Azimut_r, con el que se observa un objeto mediante un puntero óptico 41 o láser 42 montado en el trípode 23.

La operación de la brújula solar 1 descrita anteriormente es de la siguiente manera.

Para el uso de la brújula solar electrónica 1, es necesario dirigir el recipiente 31 de tal manera que la ranura 33 se dirija aproximadamente hacia el sol, de tal manera que la luz que pasa a través de la misma diseña una línea brillante muy limpia en el fotosensor F preferentemente alineado en paralelo al plano de la ranura 33.

El fotosensor F recibe la línea de luz L ligeramente más ancha que la ranura 33, debido al tamaño aparente del sol y la difracción de la luz. La posición central de dicha línea de luz, que se indicará también con x_l , permite calcular el ángulo θ_s entre un plano vertical VP y un plano que pasa a través del sol SP, conteniendo ambos el eje mayor de la propia ranura:

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{x_l}{d}\right), \quad [2]$$

donde x_l es, como se ha mencionado, la distancia del centro de la línea de luz L desde el centro de la proyección geométrica de la ranura 33 en el fotosensor F, que puede caer, preferentemente, pero no necesariamente, en el centro F del propio fotosensor, mientras que d, como se ha mencionado, es la distancia entre la ranura 33 y el sensor F.

La imagen que se forma en el fotosensor F se adquiere por el microprocesador, que recibe como entrada otros tres datos: las coordenadas del punto de detección, la hora de Greenwich y el ángulo de rotación relativa φ entre la unidad de detección 3 y el puntero óptico 41 o, más precisamente, el ángulo obtenido por el puntero óptico 41 y el plano vertical que contiene el eje mayor de la ranura 33, medido en el sentido de las agujas del reloj, es decir, de este a oeste. Este ángulo φ se detecta por el goniómetro electrónico 34. Al procesar las coordenadas del lugar de detección y la hora de Greenwich proporcionada por el GPS, el microprocesador es capaz de obtener, mediante un algoritmo matemático apropiado adecuado para realizar cálculos basados en ecuaciones conocidas, los valores de azimut θ_1 y la elevación δ_1' del sol, o, respectivamente, la orientación del sol con respecto a la dirección sur (positiva si es hacia el oeste) y su altura con respecto al plano del horizonte (incluyendo el efecto del índice de refracción del aire), con una precisión de 1 arcminutos de grado.

Un algoritmo adecuado basado en las leyes de Kepler puede ser muy compacto y por lo tanto puede implementarse en microprocesadores no necesariamente rápidos o caros, conseguir estas coordenadas angulares del sol, no solo con respecto a un lugar en la Tierra, sino incluso en cualquier otro planeta, del cual se conocen los parámetros astronómicos (órbita de excentricidad, duración del día, inclinación del eje, etc.).

Sobre la base de las coordenadas solares anteriores, junto con los datos obtenidos a partir de la imagen, el microprocesador de dicha unidad lógica de control puede calcular la orientación Azimut_r de la ranura 33 con dos métodos alternativos: un método de aproximaciones sucesivas o un método de cálculo directo. En el primer caso, el microprocesador usa el método de transformación de coordenadas polares desde unas coordenadas locales (θ_1, δ_1'), hasta las relacionadas con la ranura (θ_s, δ_s') como una función del Azimut_r y corrige el valor de este último, mediante sucesivas aproximaciones, hasta que el valor angular de θ_s coincida con el valor experimental proporcionado por el

fotosensor F de acuerdo con la ecuación mencionada anteriormente. En el segundo caso, con el fin de reducir significativamente el tiempo de cálculo, el microprocesador puede usar directamente la siguiente fórmula de inversión:

$$Azimut_f = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) + 180^\circ \cdot (X < 0) \cdot \frac{Y}{|Y|} \quad [3]$$

donde la función de verdad ($X < 0$) es 1 o 0 si se verifica o no, respectivamente, mientras que X e Y están dados por:

$$\begin{cases} X = \frac{\pm \sqrt{A^2 \cdot (A^2 + B^2 - C^2)} - C \cdot B}{A^2 + B^2} \\ Y = -\frac{B \cdot X + C}{A} \end{cases} \quad [4]$$

con

$$\begin{cases} A = y_s \cdot \tan(\theta_s) \cdot \text{sen}(\beta) - x_s \\ B = -x_s \cdot \tan(\theta_s) \cdot \text{sen}(\beta) - y_s \\ C = -z_s \cdot \tan(\theta_s) \cdot \cos(\beta) \end{cases} \quad [5]$$

donde θ_s es el valor de dirección de los rayos del sol con respecto a la ranura 33 dado por la ecuación [2], β es la inclinación del plano de la ranura 33, mientras que x_s , y_s , z_s son los componentes cartesianos del vector de unidad solar en el mismo sistema de referencia cartesiano usado para (θ_1, δ_1') , es decir, con los ejes x, y y z coincidentes, respectivamente, con la dirección sur, este y la vertical del lugar donde se localiza la brújula 1 (obtenible de este modo por las coordenadas θ_1, δ_1' por medio de una transformación común de coordenadas polares a coordenadas cartesianas).

La primera de las ecuaciones del sistema de ecuaciones [4] muestra la existencia de dos soluciones para el valor de Azimut_f, que se corresponden físicamente con el caso, en el que la ranura se enfrenta a aproximadamente hacia el sol o desde el lado opuesto. La solución correcta que usar es siempre la que tiene el signo "+", con la excepción de los casos en los que, al usar ese signo, se obtendría $X \cdot A > 0$.

Por último, mediante solo la adición al ángulo Azimut_f del ángulo de rotación φ del goniómetro 34 de la brújula 1, es decir, el ángulo entre la dirección del puntero 41 y la del plano vertical que contiene el eje principal de la ranura 33, el microprocesador proporciona el azimut del objeto observado:

$$Azimut_b = Azimut_f + \varphi, \quad [6]$$

mostrándolo en la pantalla 6 de la brújula 1, tanto numérica como gráficamente.

Las fases de operación de la brújula 1 son las siguientes:

(a) el operador coloca el trípode 23 de la brújula 1, de tal manera que el nivel biaxial 5 indica la horizontalidad de la base plana 22 (es decir, la verticalidad de su eje de rotación con respecto al trípode 23);

(b) usar el puntero óptico 41 o de láser 42, la base plana 22 rota hacia arriba para alinearla con el objeto cuya orientación se desea, para conocer la orientación y se bloquea en la posición con los medios de bloqueo adecuados;

(c) iniciar el procedimiento de medición, el microprocesador, por medio de un motor, hace rotar la unidad de detección 3, hasta que el fotosensor F recibe una línea de luz del sol (y a continuación hasta que la ranura 33 se localiza aproximadamente opuesta al sol). En general, el campo visual del fotosensor F puede ser lo suficientemente amplio, es decir, unos pocos grados, tales como para permitir la misma tolerancia al movimiento motorizado. De hecho, se requiere una alta precisión solo en la lectura final del valor angular φ del goniómetro 34 y la posición x_i de la línea de luz, y no en el control de la posición en la que el motor se detiene después de que el microprocesador haya detectado la existencia de una línea de luz en el fotosensor F. En esta fase, con el fin de aumentar la velocidad de transferencia de datos, el microprocesador puede limitar la detección de la imagen del fotosensor F a unas pocas filas. Además, el goniómetro 34 también puede ser de lectura manual. En este caso, el microprocesador puede emitir una señal de sonido cuando recibe una señal considerada aceptable del fotosensor F, es decir, cuando detecta la presencia de una línea de luz, bastante distinta en el campo visual;

(d) el microprocesador adquiere a partir del goniómetro 34 (o del operador, en el caso de un goniómetro de lectura manual) el valor del ángulo φ entre el plano vertical que contiene el eje principal de la ranura 33 y el puntero 41;

5 (e) el microprocesador adquiere la imagen a partir del fotosensor F y calcula la posición del sol θ_s con respecto a la ranura 33 de acuerdo con la ecuación [2];

10 (f) el microprocesador adquiere la localización geográfica a partir del GPS y la hora de Greenwich, con el fin de calcular las coordenadas locales δ_1' y θ_1 del sol y, a continuación, mediante la ecuación [3] descrita anteriormente, la orientación Azimut_r del plano vertical que contiene el eje principal de la ranura 33. Finalmente, mediante la ecuación [6], el microprocesador calcula la orientación Azimut_b del puntero 41, y a continuación el objeto de interés.

Además, después de la adquisición de la imagen desde la unidad de detección 3, es necesario obtener el valor que corresponde al centro de la línea de luz x_1 . Con el fin de reducir el ruido electrónico del fotosensor F y las señales espurias, en primer lugar, como ya se dijo, el microprocesador integra la imagen en la dirección de la línea de luz, es decir, suma las contribuciones de todas las filas con el fin de no tener ya una matriz de valores sino un vector, $Im(x)$. A continuación, ejecuta un "suavizado" de $Im(x)$, promediando los valores con los de los vecinos más cercanos de acuerdo con la ecuación:

$$Im'(x) = \frac{Im(x-1) + 2 \cdot Im(x) + Im(x+1)}{4}, \quad [7]$$

20 este proceso se repite algunas decenas de veces para obtener una curva más regular, donde la posición del máximo puede identificarse fácilmente.

Como alternativa, x_1 puede obtenerse como la posición del mejor ajuste en el vértice de parábola $Im(x)$ en una zona adecuada del máximo de $Im(x)$.

25 Por último, puede elegirse para calcular x_1 como el "centro de gravedad" de la figura del perfil en un intervalo apropiado (por ejemplo, en el intervalo en el que el perfil supera el 50 % del valor de su máximo). En este caso, x_1 se obtiene a continuación mediante la siguiente relación:

$$x_1 = \frac{\int_{x_1}^{x_2} Im(x) \cdot x dx}{\int_{x_1}^{x_2} Im(x) dx} \quad [8]$$

30 donde x_1 y x_2 son los puntos finales del intervalo donde $Im(x)$ supera el 50 % de su máximo.

35 A partir de las ecuaciones mencionadas anteriormente, que describen la dependencia de θ_s del azimut del plano vertical que contiene el eje principal de la ranura 33 de la brújula 1, es posible obtener la sensibilidad del azimut con respecto a un error en θ_s , $K_i = \Delta Azimut_b / \Delta \theta_s$, como una función de elevación δ_1' del sol:

$$K_i = -\frac{\partial Azimut_b}{\partial \theta_s} = \text{sen } \beta + \cos \beta \tan \delta_1'. \quad [9]$$

40 Del mismo modo, puede obtenerse la sensibilidad del azimut con respecto a un posible error de verticalidad α de un eje A de la brújula (o de la horizontalidad indicada por el nivel de la misma) en la dirección ortogonal a la que se localiza el sol:

$$K_v = -\frac{\partial Azimut_b}{\partial \alpha} = \cos \beta + \text{sen } \beta \tan \delta_1'. \quad [10]$$

45 Es posible señalar que para $\beta = 45^\circ$ los dos factores de error de crecimiento son iguales, como se muestra en la figura 2, y su suma es un mínimo.

50 Independientemente de la buena calidad de la construcción de la brújula 1, hay un factor de crecimiento de imprecisión que depende de la elevación, que tiene el sol en el horizonte en el momento de la medición. Cuanto más se acerque el sol al cenit (es decir, la vertical del lugar de la observación), más se limita la precisión de los instrumentos. Esto es cierto para cualquier brújula solar.

Además, como se muestra en la gráfica de dicha figura 2, en las latitudes altas, es decir, para las latitudes mayores de 60°, donde las brújulas magnéticas son específicamente inexactas, las brújulas solares alcanzan el mejor rendimiento, logrando una precisión de unos pocos arcominutos de grado, para las brújulas de acuerdo con el estado de la técnica, y 1' para la brújula descrita en el presente documento, en cualquier estación y en cualquier momento del día. En cambio, es conveniente, para las latitudes más bajas en la estación de verano (e incluso en otras estaciones, en el caso de lugares entre los trópicos), elegir usar la brújula en las horas en que la elevación del sol sigue siendo baja ($\delta_1' < 60^\circ$).

La elección de la distancia d entre el fotosensor F y la ranura 33 está vinculada al modelo detector de imagen que desea usarse.

Por ejemplo, al usar un detector CMOS, que normalmente puede tener un tamaño de píxel $\Delta_{\text{pixel}} \sim 3 \text{ m}$ y una anchura del campo visual $V \sim 3 \text{ mm}$ (para un total de aproximadamente 1000×1000 píxeles), y que desea estar en un estado donde el error Δ_{pixel}/d en la estimación de la posición angular del sol θ_s es $\leq 1'$, mientras que el intervalo de tolerancia V/d al rotar la ranura hacia el sol es $\geq 5^\circ$, d debería mantenerse en el intervalo de 10 mm - 35 mm.

La brújula 1 de acuerdo con la invención ha sido objeto de pruebas experimentales por un prototipo probado en el Centro de ENEA de Frascati (Roma), en el que:

- la caja que contiene el fotosensor F se ha fabricado con placas de aluminio de 3 y 5 mm de espesor;
- la ranura 33 se ha obtenido colocando dos cuchillas de bisturí una al lado de la otra y pegándolas en una placa metálica perforada con el resultado de tener una abertura Δf de 30 μm (menor que la óptima);
- como detector se ha usado un sensor de cámara web de 352 x 288 píxeles, colocado aproximadamente a unos 20 mm de la ranura. El tamaño de píxel es de aproximadamente 8 μm ;
- el puntero óptico 41 es parte de un sistema de puntero telescópico;
- para medir el ángulo de rotación entre la brújula y el telescopio se ha usado un goniómetro manual de 8 cm de diámetro con un nonius sexagesimal;
- para garantizar la verticalidad del eje de rotación de la brújula 1, se ha usado un nivel biaxial de burbuja de aire;
- para detectar las coordenadas de la localización y la hora de Greenwich, se ha usado un módulo GPS;
- el software para el cálculo de azimut se ha instalado en un ordenador personal portátil, que se ha conectado al sensor óptico y al módulo GPS.

El uso de una cámara web de baja resolución y los dispositivos no electrónicos, con vistas a la lectura, introduce una incertidumbre en la medida que se cuantifica como:

- sensor óptico = 1.4';
- goniómetro = 2';
- nivel = 2'.

Con el fin de tener un punto de referencia cero de la escala del goniómetro, se realiza una calibración absoluta de la brújula usando como dirección norte-sur definida que conecta una línea de plomada con la posición de su sombra en una pared en el tiempo de tránsito del sol a la hora local real. Al optimizar la técnica y comprobar el tiempo de tránsito del sol a partir de las tablas de efemérides del año (sitio web: <http://www.nrel.gov/midc/solpos/spa.html>) en esta configuración, se logra una precisión de 1'.

La prueba experimental de la brújula 1 se ha realizado desde el tejado de un edificio de ENEA Centro de investigación en Frascati, avistando hasta cinco objetivos que están, con respecto al centro ENEA, a diferentes distancias y en diferentes direcciones: (1) un pináculo de antena de una torre de telecomunicaciones en Roma, cerca del cruce Laurentina - Grande Raccordo Anulare, (2) la parte superior de la cúpula de la iglesia de san Pedro y san Pablo en Roma EUR, (3) el centro de la cara sur del castillo de Orsini en S. Angelo Romano, (4) la parte superior de unos grandes silos en el campo de Roma, no lejos de dicho castillo de Orsini, (5) la cruz del campanario de la ciudad de Montecompatri.

Las distancias de los cinco objetivos desde el punto de detección son iguales, respectivamente, a 15,1 km, 17,4 km, 23,7 km, 20,8 km y 5,7 km. Debería observarse que, a estas distancias, un error angular de 1' corresponde a un desplazamiento transversal lineal, respectivamente, de 4,4 m, 5,1 m, 6,9 m, 6,1 m y 1,7 m.

Las mediciones se han realizado en cinco objetivos alrededor de las 16:00, el 19 de octubre de 2012, con una elevación del sol de aproximadamente 24°. Esta elevación es óptima, ya que no implica un deterioro de la precisión debido a que, en estas condiciones, el factor K_i es igual a $\sim 1,0$ (véase la figura 2).

Teniendo en cuenta todas las contribuciones, entonces, el error de medición máximo, estimado para el prototipo anterior en el caso de estas pruebas es igual a: $\Delta_{\text{Azimut}_b} = [1,4' (\text{CCD}) + 2' (\text{Livella})] * 1,0 + 2' (\text{goniómetro}) \sim 5'$.

Con el fin de verificar la exactitud de los datos obtenidos a partir de la brújula 1, es necesario conocer el verdadero valor del "Azimut-T" del azimut (valor teórico del Azimut_t) de los objetivos visto desde el lugar donde está la brújula 1. Por esta razón, se ha usado el método de mapas satelitales y el procesamiento de coordenadas geográficas de diversos objetivos, usando el modelo elipsoidal de la tierra. Los resultados se muestran en la siguiente tabla, donde los valores experimentales "Azimut_b" de los objetivos alcanzados con la brújula 1 se comparan con los valores teóricos del "Azimut-T" obtenidos a partir de los mapas satelitales de dos sitios web diferentes: el sitio web de Google Earth (GE) y el de Faureragani (FA.) disponible en las direcciones web <http://www.google.it/earth/index.html> y <http://www.faureragani.it/mygps/getlatlonita.html>. Las dos últimas columnas de la tabla proporcionan las diferencias "Δ" en arcminutos, del valor experimental "Azimut_b" con respecto a los dos valores teóricos anteriores.

Objetivo	Distancia desde la brújula	Azimut _b	Azimut-T de acuerdo con G.E.	Azimut-T de acuerdo con FA.	Δ -G.E. (arcminuto)	Δ -FA. (arcminuto)
1- Antena de telecomunicaciones	15,1 km	+80,691°	+ 80,658°	+80,662°	+2,0'	+ 1,7'
2- Iglesia de S. Pedro y S. Pablo	17,4 km	+93,978°	+93,945°	+93,932°	+2,0'	+2,8'
3- Castillo de Orsini	23,7 km	-171,482°	-171,489°	-171,464°	+0,4'	-1,1'
4- Silos en el campo	20,8 km	-169,555°	-169,573°	-169,567°	+1,1'	+0,7'
5- Campanario de Montecompatri	5,7 km	-75,021°	-75,057°	-75,018°	+2,2'	-0,2'

Como puede observarse, a pesar del uso de componentes no optimizados, no solamente los errores están dentro de la precisión esperada, sino que son menores que 3' (igual a 1/20 de grado) o solo tres veces mayores que la mejor precisión alcanzada, de acuerdo con las estimaciones de los inventores, a partir de este modelo de brújula solar y ya mucho más pequeña que las reclamadas por cualquier sistema de detección basado en la observación del sol actualmente en el mercado. Además, como es evidente en la tabla, los errores del nivel de 1' - 2' también pueden estar presentes en los valores teóricos del azimut, dependiendo de la fuente usada para la determinación de las coordenadas geográficas de los objetivos identificados.

La figura 3 muestra un uso adicional de la brújula solar electrónica 1 de acuerdo con un ejemplo que no forma parte de la invención, que proporciona un método alternativo para la determinación del azimut de una dirección con respecto al norte geográfico. En este caso, el soporte 2 con la unidad de detección 3, provisto del fotosensor F y la ranura 33, se instala directamente en las herramientas usadas normalmente en sitios geodésicos y de construcción, tales como teodolitos, tacómetros o estaciones totales modernas, es decir, en un dispositivo de medición, equipado con un puntero óptico 43, un goniómetro 35 y una sección móvil R, capaz de rotar alrededor de un eje vertical A, que se indicará genéricamente a continuación con T. En este caso, los medios para apuntar 4, el goniómetro 34, el nivel biaxial 5, el trípode 23 y posiblemente también el GPS ya forman parte del dispositivo T.

En este uso, el método de operación de dicha brújula solar electrónica consiste en colocar el soporte 2 en la parte superior del instrumento de medida T (indicando con T un teodolito digital o una estación total o una herramienta provista de un puntero óptico 43 y un goniómetro azimutal 35), en lugar del mango del mismo. En este punto, se hace rotar la unidad de detección 2 de dicha brújula, con respecto a la herramienta T, de tal manera que la dirección apuntada por el puntero óptico 43 se encuentra en el plano vertical VP que contiene el eje mayor de la ranura 33 y la rotación de dicha unidad de detección 2 se bloquea en esta posición, haciéndola integral con la sección móvil R de dicha herramienta T.

Con el fin de realizar la medición de azimut, la herramienta T se coloca en el punto de observación y se ajusta de tal manera que el eje A es vertical. A continuación, se hace rotar la sección móvil R, de tal manera que la ranura 33 se orienta aproximadamente hacia el sol y, por lo tanto, en el fotosensor F aparece una línea de luz. En esta posición, el goniómetro 35 de la herramienta T se reinicia y se adquiere la posición angular del sol, obteniendo de este modo el valor de Azimut_r, o el azimut del plano vertical VP que contiene el eje mayor de la ranura 33 de acuerdo con las etapas ya descritas en el método anterior. A continuación, se hace rotar la sección móvil R con el fin de apuntar al objetivo del que se desea saber la dirección del Azimut_t de observación, con respecto al norte verdadero, mediante el puntero 43. El ángulo azimutal η que se hace rotar la sección móvil R, sumado al valor Azimut_r, proporciona el valor Azimut_t deseado.

Las ventajas del procedimiento que se acaba de describir son básicamente dos. Por un lado, se mejora un instrumento clásico como un teodolito/tacómetro, que en general permite mediciones absolutas solo para el valor del ángulo cenital (es decir, para la altura angular del objeto de interés con respecto al plano horizontal) pero no para el

ángulo azimutal (es decir, solo permite medir las diferencias de orientación entre los objetos de interés con respecto a la posición donde se localiza el dispositivo T), convirtiéndolo en una herramienta que puede proporcionar valores de azimut absolutos para cada objeto (es decir, refiriéndose a la dirección del sur o norte del lugar donde se localiza el instrumento).

5 Por otro lado, la detección de la dirección del sol se realiza solo una vez (inmediatamente después de colocar el dispositivo T) y no hay necesidad de repetirla hasta que no se mueva el trípode 23 de dispositivo de T. Esto permite no solo ahorrar tiempo al usar la brújula 1, sino incluso usar el dispositivo T, tanto en días con cielos despejados como en los días en que el cielo está parcialmente nublado y entonces el sol aparece solo durante unos momentos.
10 A estas ventajas, por supuesto, se suma la ventaja económica, debido al uso de una herramienta (T) ya realizada e industrializada.

15 Por lo tanto, una ventaja de la brújula es que puede instalarse directamente en herramientas usadas en sitios geodésicos y en construcción tales como teodolitos y taquímetros (o los modernos "estaciones totales").

Una ventaja adicional de la brújula de acuerdo con la presente invención es la de ser capaz de operar también en otros planetas o satélites del sistema solar.

20 La presente invención se ha descrito con fines ilustrativos pero no limitativos, de acuerdo con sus realizaciones preferidas, pero ha de entenderse que pueden introducirse modificaciones y/o cambios por los expertos en la materia sin alejarse del alcance relevante como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Brújula solar electrónica (1) que comprende
 un soporte (2), capaz de rotar alrededor de un eje vertical (A),
 5 una unidad de detección (3) de la posición del sol, dispuesta sobre dicho soporte (2), siendo dicha unidad de detección (3) capaz de rotar alrededor de dicho eje vertical (A) un ángulo de rotación (φ) con respecto a dicho soporte (2), comprendiendo dicha unidad de detección (3) un goniómetro electrónico (34), adaptado para medir dicho ángulo de rotación (φ),
 unos medios para apuntar (4), integrales con dicho soporte (2), y
 10 una pantalla de visualización (6),
 estando dicha brújula solar electrónica (1) caracterizada
 por que dicha unidad de detección (3) comprende un fotosensor de matriz (F), una unidad de control lógica, conectada operativamente con dicho fotosensor (F), con dicho goniómetro electrónico (34) y dicha pantalla (6), y un recipiente (31), en el que se coloca dicho fotosensor (F), teniendo dicho recipiente (31) una ranura rectilínea (33)
 15 para el paso de la luz solar hacia dicho fotosensor (F), teniendo dicha ranura (33) una anchura y una longitud de ranura y siendo integral con dicho fotosensor (F),
 por que dicha ranura (33) y dicho fotosensor (F) están inclinados un ángulo (β) con respecto al plano horizontal, preferentemente igual a 45° , y están separados una distancia (d), y
 por que dicha anchura de dicha ranura (33) es aproximadamente igual a $\sqrt{\lambda \cdot d}$, donde λ es la longitud de onda
 20 promedio de la luz solar, equivalente a aproximadamente $0,5 \mu\text{m}$, y d es dicha distancia de dicha ranura (33) desde dicho fotosensor (F),
 estando dicha unidad de control lógica programada para calcular las efemérides del sol sobre la base del tiempo y las coordenadas geográficas de la localización de la brújula (1) y para procesar los datos recibidos por dicho fotosensor (F) y de dicho goniómetro electrónico (34), con el fin de medir la dirección de apuntado de dichos medios para apuntar (4) con respecto al norte geográfico y/o con respecto al sur geográfico, mostrando el resultado en dicha
 25 pantalla de visualización (6).
2. Brújula solar electrónica (1) de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizada por que dicha longitud de dicha ranura (33) es igual a $d/[\text{sen}(\beta) \cos(\beta)]$.
- 30 3. Brújula solar electrónica (1) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada por que dicho recipiente (31) comprende una tapa (32) y por que dicha ranura (33) se obtiene en dicha tapa (32).
4. Brújula solar electrónica (1) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada por
 35 que la distancia d de dicha ranura (33) desde dicho fotosensor (F) está entre 0,5 cm y 5 cm, y por que la anchura de la ranura (33) está entre $50 \mu\text{m}$ y $160 \mu\text{m}$.
5. Brújula solar electrónica (1) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada por que la distancia d entre el plano en el que está dicha ranura (33) y el plano de dicho fotosensor (F) es constante y la
 40 proyección geométrica de dicha ranura (33) en dicho fotosensor (F) es preferentemente paralela a uno de los lados del fotosensor (F).
6. Brújula solar electrónica (1) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada por que dicho fotosensor (F) está constituido por un CCD (dispositivo de carga acoplada) y/o un sensor de imagen
 45 CMOS (semiconductor de óxido de metal complementario), y/o una matriz lineal de píxeles, preferentemente rectangular.
7. Brújula solar electrónica (1) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada
 50 por que dicho soporte (2) comprende un cuerpo de contención (21), una base plana (22), sobre la que se fija dicho cuerpo de contención (21), y un trípode (23), y
 por que dichos medios para apuntar (4) incluyen un puntero óptico (41), tal como un telescopio provisto de un punto de mira que puede inclinarse con respecto al plano de la base plana (22), de acuerdo con un ángulo de elevación (γ), y/o un puntero láser (42), adaptado para emitir un rayo láser de apuntado (42'), que también puede inclinarse con respecto al plano de la base plana (22), de acuerdo con dicho ángulo de elevación (γ).
- 55 8. Brújula solar electrónica (1) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada por que comprende unos medios de ajuste que incluyen un nivel biaxial (5) y/o un inclinómetro electrónico, adaptado para detectar la verticalidad de dicho eje de rotación vertical (A) de dicho soporte (2) y de dicho recipiente (31), y/o unos medios para adquirir coordenadas locales y la hora de Greenwich, como, por ejemplo, un detector GPS.
- 60 9. Brújula solar electrónica (1) de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizada por que dicha unidad lógica de control está conectada con dicho GPS y/o dicho inclinómetro digital, estando dicha unidad lógica de control programada para procesar los datos recibidos desde dicho GPS y/o dicho inclinómetro digital.
- 65 10. Brújula solar electrónica (1) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada por

que dicho soporte (2) comprende un dispositivo motorizado para la rotación de dicha unidad de detección (3) alrededor de dicho eje de rotación vertical (A), y por que dicha unidad lógica de control controla el movimiento de dicha unidad de detección (3) hasta que la colocación de la ranura (33) está aproximadamente delante del sol.

5 11. Brújula solar electrónica (1) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada por que comprende unos filtros de densidad óptica fija o variable, tales como unos filtros basados en la rotación de polarizadores y/o unos filtros fotocromicos, y/o un sistema de exposición automática de dicho fotosensor (F), adecuado para reducir la radiación solar que pasa a través de dicha ranura (33), con el fin de optimizar la relación señal/ruido de la luz solar que incide sobre dicho fotosensor (F).

10 12. Método para determinar la dirección de apuntado de un objeto con respecto al norte geográfico usando una brújula solar electrónica (1) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende las siguientes etapas:

15 (a) colocar dicha brújula solar electrónica (1), de tal manera que el soporte (2) y dicho eje de rotación vertical (A) de dicha unidad de detección (3) sea vertical;

(b) dirigir dichos medios para apuntar (4) hacia arriba para alinearlos con un objeto del que se desea saber la orientación;

20 (c) hacer rotar dicha unidad de detección (3), hasta que dicho fotosensor (F) reciba una línea de luz (L) del sol, orientando dicha ranura (33) aproximadamente en frente del sol;

(d) medir dicho ángulo de rotación (φ) de dicha unidad de detección (3), con respecto a dichos medios para apuntar (4), por medio de dicho goniómetro electrónico (34);

(e) adquirir a partir de dicho goniómetro electrónico (34) el valor de dicho ángulo de rotación (φ);

25 (f) adquirir una imagen de la línea de luz (L) proyectada desde dicha ranura (33) y detectada por dicho fotosensor (F), y calcular, por medio de dicha unidad de control lógica, una posición angular (θ_s) del sol, con respecto al

plano vertical que contiene el eje mayor de dicha ranura (33) de acuerdo con la ecuación $\theta_s = \arctan\left(\frac{x_l}{d}\right)$, donde

30 x_l es la distancia del centro de la línea de luz (L) que llega al fotosensor (F) desde el centro de la proyección geométrica de la ranura (33) en dicho fotosensor (F), y donde la posición angular del sol θ_s es el ángulo entre el plano vertical (VP) que contiene el eje mayor de dicha ranura (33) y el plano (SP), que pasa a través del sol y contiene el eje mayor de dicha ranura (33);

(g) adquirir la localización geográfica de dicha brújula solar electrónica (1) y la hora de Greenwich; y

(h) calcular la dirección de apuntado de dicho objeto del que se desea saber la orientación con respecto a la dirección del norte, mediante las siguientes subetapas:

35 - calcular, sobre la base de los datos obtenidos en las etapas anteriores (d)-(g), las coordenadas polares locales (θ_1, δ_1') del sol, donde θ_1 es el azimut del sol con respecto a la dirección local del sur, definido positivo/negativo si la posición del sol está respectivamente en oeste/este, mientras que δ_1' es la elevación aparente del sol en el horizonte, que incluye el efecto de refracción del aire, usando un algoritmo para determinar las coordenadas solares;

40 - calcular el ángulo de orientación Azimut_f del plano vertical (VP) que contiene el eje mayor de dicha ranura (33), a través del sistema de ecuaciones:

$$Azimut_f = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) + 180^\circ \cdot (X < 0) \cdot \frac{Y}{|Y|}$$

$$\begin{cases} X = \frac{\pm \sqrt{A^2 \cdot (A^2 + B^2 - C^2)} - C \cdot B}{A^2 + B^2} \\ Y = -\frac{B \cdot X + C}{A} \end{cases}$$

$$\begin{cases} A = y_s \cdot \tan(\theta_s) \cdot \sin(\beta) - x_s \\ B = -x_s \cdot \tan(\theta_s) \cdot \sin(\beta) - y_s \\ C = -z_s \cdot \tan(\theta_s) \cdot \cos(\beta) \end{cases}$$

45 en el que la función de verdad ($X < 0$) es 1 o 0 respectivamente si se verifica o no, β es la inclinación del plano de la ranura (33), mientras que x_s, y_s, z_s son las componentes cartesianas del vector unitario del sol en el

mismo sistema de referencia cartesiano usado para las coordenadas polares locales (θ_1, δ_1'), respectivamente coincidentes con las direcciones sur, este y vertical del lugar donde está dicha brújula solar electrónica (1), que puede obtenerse a partir de las coordenadas polares locales (θ_1, δ_1') por medio de la transformación común de las coordenadas polares a coordenadas cartesianas; y
 5 - calcular, mediante la ecuación:

$$Azimut_b = Azimut_f + \varphi,$$

estando el ángulo $Azimut_b$, con respecto a la dirección norte, en el hemisferio norte/sur, en el que dichos medios para apuntar (4) están alineados con dicho objeto del que se desea saber la orientación o dirección de visión, siendo dicha dirección de visión la dirección de la línea recta que une el centro de dicha brújula solar electrónica (1) al propio objeto.

13. Método de acuerdo con la reivindicación 12, que usa una brújula electrónica de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado por que dicha etapa (a) se realiza por medio de dicho nivel biaxial (5), de tal manera que el nivel biaxial indica que dicha base plana (22) está en una posición horizontal, de tal manera que el soporte (2) y dicho eje de rotación (A) de la unidad de detección (3) es vertical.

14. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 12 o 13, caracterizado por que dicha etapa de adquisición (f) para determinar el valor x_i comprende las siguientes subetapas:

- digitalizar dicha imagen detectada por dicho fotosensor (F), obteniendo una matriz bidimensional de valores numéricos proporcionales a la intensidad de la luz;
- integrar los valores de dicha matriz en la dirección de la línea de luz (L), o sumar las contribuciones de todas las filas con el fin de tener un vector unidimensional de valores $Im(x)$, donde el origen $x=0$ de la variable x coincide con el centro geométrico de la proyección de la ranura (33) de dicho fotosensor (F), permitiendo dicha integración una reducción de la imagen a un perfil unidimensional, y a continuación, a una fuerte reducción del ruido estadístico, que es un punto crítico, para lograr una alta precisión de la brújula solar electrónica (1);
- calcular un nuevo vector de valores promediando los valores de un vector de valores $Im(x)$ obtenido con los de los vecinos más cercanos de acuerdo con la ecuación parabólica de "suavizado":

$$Im'(x) = \frac{Im(x-1) + 2 \cdot Im(x) + Im(x+1)}{4},$$

y repetir esta etapa una pluralidad de veces, para obtener una curva más regular en la que x_i identifica fácilmente la posición del máximo de $Im'(x)$ y/o;

- calcular la distancia x_i del centro de la línea de luz (L) desde la proyección geométrica del centro de la ranura (33) de dicho fotosensor (F), como la posición del vértice de una parábola, que interpola los valores de dicho vector $Im(x)$ en la proximidad del máximo de dicho vector de valores $Im(x)$ y/o;
- calcular la distancia x_i del centro de la línea de luz (L) desde el centro de la proyección geométrica de la ranura (33) en dicho fotosensor (F) como el baricentro de la figura de dicho vector de valores $Im(x)$ en un intervalo específico, mediante la siguiente ecuación:

$$x_l = \frac{\int_{x_1}^{x_2} Im(x) \cdot x dx}{\int_{x_1}^{x_2} Im(x) dx}$$

donde x_1 y x_2 son los extremos de un intervalo en el que el vector de valores $Im(x)$ supera un porcentaje, preferentemente el 50 %, de su máximo.

15. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 12-15, que usa una brújula electrónica de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado por que dicha etapa de adquisición (g) se realiza mediante dicho GPS y/o mediante mapas y la hora de Greenwich geográfica mediante dicho GPS y/o mediante un reloj de precisión.

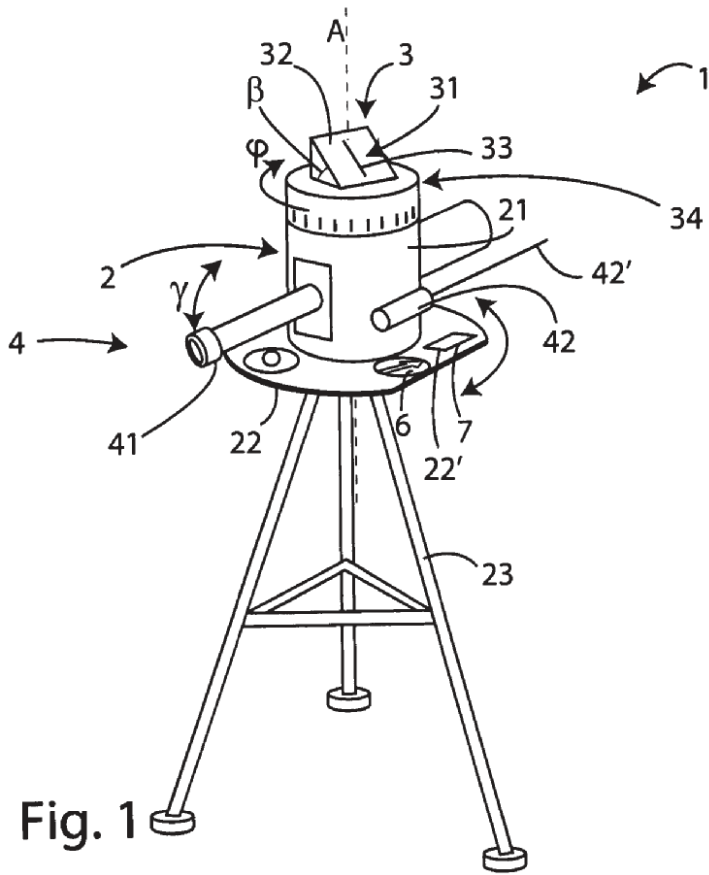


Fig. 1

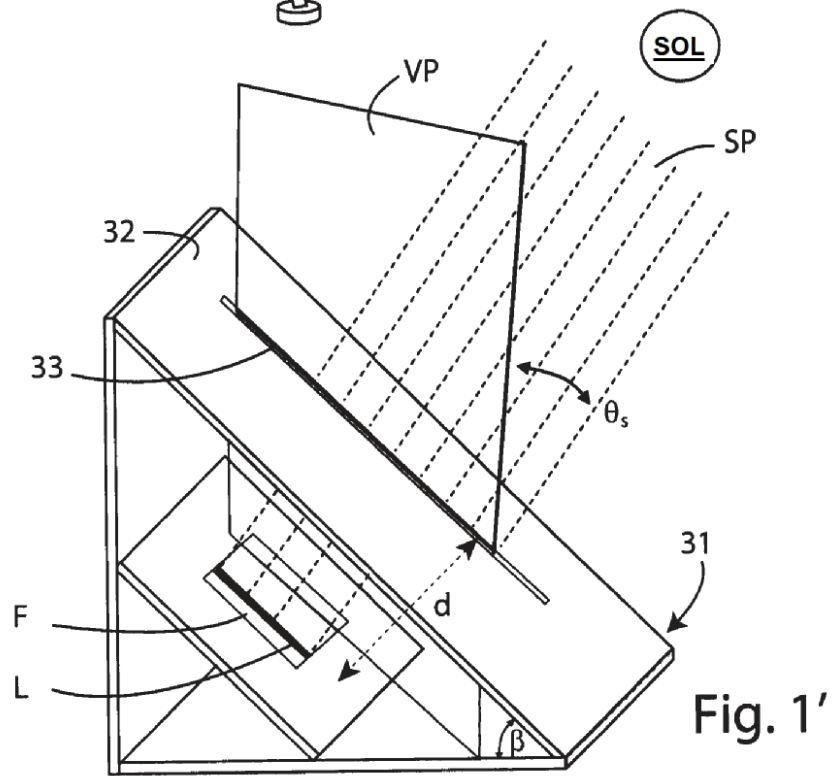


Fig. 1'

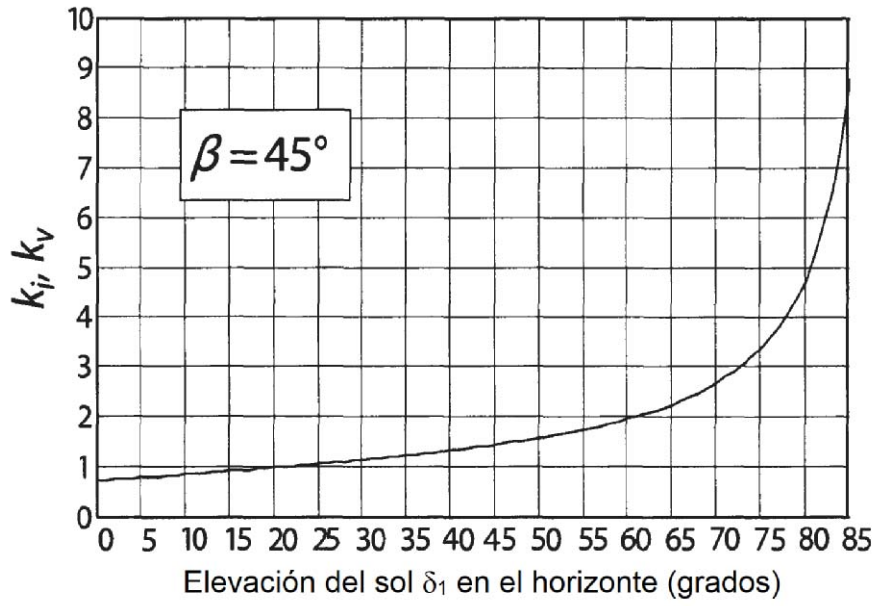


Fig. 2

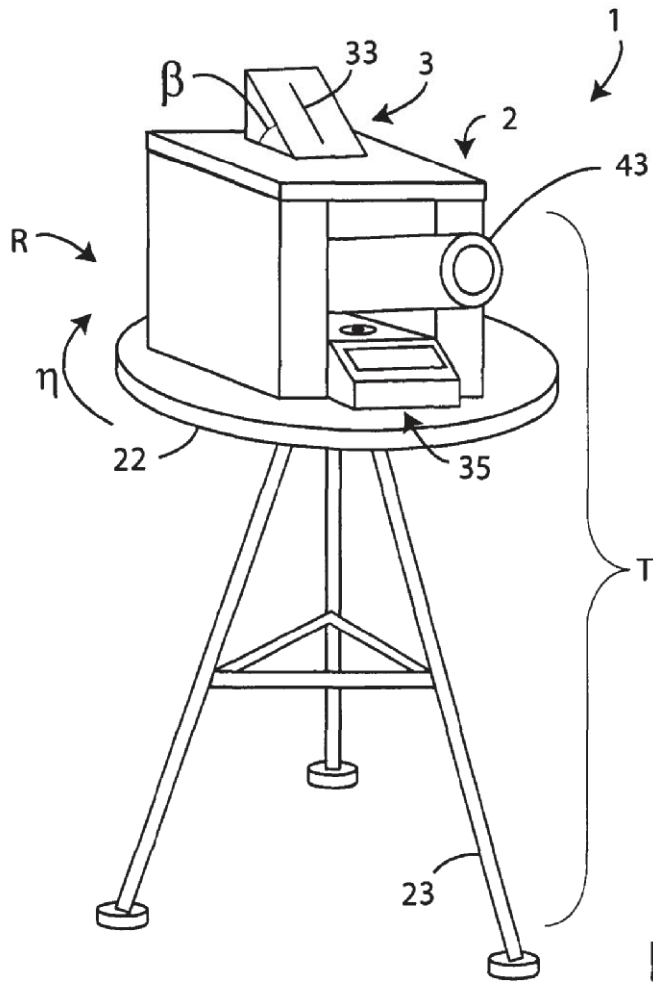


Fig. 3