



(12) FASCICULE DE BREVET

(11) N° de publication :
MA 33844 B1

(51) Cl. internationale :
F24J 2/10

(43) Date de publication :
03.12.2012

(21) N° Dépôt :
34999

(22) Date de Dépôt :
25.06.2012

(30) Données de Priorité :
01.12.2009 ES P200902268

(86) Données relatives à l'entrée en phase nationale selon le PCT :
PCT/ES2010/000485 30.11.2010

(71) Demandeur(s) :
**ABENGOA SOLAR NEW TECHNOLOGIES, S.A., AVENIDA. DE LA BUHAIRA 2. 410108
- SEVILLA (ES)**

(72) Inventeur(s) :
**QUERO GARCIA, Manuel ; GERTIG, Christian ; OSUNA GONZALES-AGUILAR,
Rafael ; PFÄNDER, Markus**

(74) Mandataire :
CABINET PATENTMARK

(54) Titre : **PROCÉDÉ DE REPARTITION DES D'HELIOSTATS DANS UNE CENTRALE A
TOUR**

(57) Abrégé : L'INVENTION CONCERNE UN PROCÉDÉ DE DISTRIBUTION D'HÉLIOSTATS DANS UNE INSTALLATION SOLAIRE DE TYPE TOUR ENTOURÉE D'UN CHAMP D'HÉLIOSTATS, LESQUELS RÉFLÉCHISSENT LE RAYONNEMENT SOLAIRE SUR LADITE TOUR. LE PROCÉDÉ DE DISTRIBUTION DESDITS HÉLIOSTATS CONSISTE À IMITER LES SYSTÈMES QUI SE TROUVENT DANS LA NATURE POUR MAXIMISER LA CAPTURE DE LUMIÈRE (GRAINES DE PLANTES, FEUILLES OU PÉTALES) ET QUI EST DÉCRIT MATHÉMATIQUEMENT PAR DES SPIRALES DE FERMAT SELON UN NOMBRE APPARTENANT À LA SÉRIE DE FIBONACCI, PAR LE PLACEMENT, EN COORDONNÉES POLAIRES, DE CHAQUE HÉLIOSTAT SELON UN RAYON ET UN ANGLE DÉFINI PAR LA FORMULE (1) DANS LAQUELLE RN REPRÉSENTE LA DISTANCE DE LA TOUR (2) À LA POSITION DE L'HÉLIOSTAT (3), ?N REPRÉSENTE L'ANGLE QUE FORMENT LE RAYON RN AVEC LE RAYON RN-1, N REPRÉSENTE LE NUMÉRO DE L'HÉLIOSTAT (3) QUE L'ON SOUHAITE PLACER, CN REPRÉSENTE

UNE CONSTANTE QUI DÉPEND DE CHAQUE EMPLACEMENT ET CORRESPOND À L'INDICE DE COMPACTITÉ DES HÉLIOSTATS (3) DANS L'INSTALLATION, I-REPRÉSENTE LA LIMITE IRRATIONNELLE DE LA SECTION DORÉE, À SAVOIR (FORMULE II).

"B"

11

PROCÉDÉ DE RÉPARTITION DES HÉLIOSTATS DANS UNE CENTRALE À TOUR ABRÉGÉ

Procédé de répartition des héliostats dans une centrale solaire à tour entourée d'un champ d'héliostats lesquels réfléchissent le rayonnement solaire sur ladite tour. Le
 5 procédé de répartition desdits héliostats consiste à imiter les systèmes qu'on trouve dans la nature pour maximiser le captage de lumière (graines de plantes, feuilles ou pétales) et qui est décrit mathématiquement par des spirales de Fermat en un nombre appartenant à la série de Fibonacci, via l'emplacement, sur des coordonnées polaires, de chaque héliostat selon un rayon et un angle défini par

$$10 \quad r_n = c_n \cdot \sqrt{n}; \quad \theta_n = n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\tau^2}; \text{ soit :}$$

- r_n distance depuis la tour (2) jusqu'à la position de l'héliostat (3),
- θ_n l'angle d'emplacement de l'héliostat sur des coordonnées polaires
- n numéro de l'héliostat (3) que nous souhaitons placer,
- c_n une constante qui dépend de chaque emplacement et correspond à
 15 l'indice de compacité des héliostats (3) dans la centrale,
- τ la limite irrationnelle de la section dorée, c'est-à-dire,

$$\tau = \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \dots}}}}}$$

(Figure 2)

03 DEC 2012

"B"

2

PROCÉDÉ DE RÉPARTITION DES HÉLIOSTATS DANS UNE CENTRALE À TOUR**Secteur technique de l'invention**

La présente invention relève du secteur de la génération d'énergie électrique à partir du rayonnement solaire au moyen d'une centrale du type de celles possédant un récepteur central à tour.

L'objet de l'invention consiste à obtenir un rendement optimal de la centrale thermoélectrique par la répartition sélective des héliostats par rapport à la tour réceptrice.

Antécédents de l'invention

Une centrale solaire thermoélectrique est une installation industrielle dans laquelle, à partir du chauffage d'un fluide par rayonnement solaire et de son utilisation dans un cycle thermodynamique conventionnel, on produit la puissance nécessaire pour actionner un alternateur pour génération d'énergie électrique comme dans une centrale thermique classique.

Du point de vue de la construction, il est nécessaire de concentrer le rayonnement solaire afin de pouvoir atteindre des températures élevées, de plus de 300 °C, et d'obtenir ainsi un rendement acceptable dans le cycle thermodynamique, qui ne pourrait pas être obtenu avec des températures plus basses. Le captage et la concentration des rayons solaires sont réalisés au moyen de miroirs à orientation automatique qui visent une tour centrale où le fluide est chauffé. L'ensemble de la surface réfléchissante et de son dispositif d'orientation est appelé héliostat.

Une centrale à tour — également connue sous le nom de système à récepteur central — se compose d'un système concentrateur ou champ d'héliostats, qui capte et concentre la composante directe du rayonnement solaire sur un récepteur — où se produit la conversion de l'énergie rayonnante en énergie thermique — qui est généralement installé dans la partie supérieure d'une tour. Le fluide de travail peut être, entre autres, de l'air, de la vapeur d'eau, du sodium fondu ou des sels fondus, selon la technologie choisie. Dans celles à vapeur d'eau, cette dernière actionne directement une turbine. Dans les autres, le fluide transporte la chaleur vers un générateur de vapeur d'eau, avec lequel on fait fonctionner une turbine qui actionne le générateur électrique.

Tous ces types de centrales disposent d'une configuration dans laquelle les héliostats sont répartis en fonction de la taille et de la distance jusqu'à la tour, en suivant

"B"

3

certaines dispositions habituellement radiales depuis la tour et connues sous les appellations "corn field" ("champ de maïs") et "radial staggered" ("en quinconce"). Lesdites configurations ont l'inconvénient d'engendrer des zones d'ombre et des blocages entre les héliostats voisins et par conséquent il est nécessaire d'éliminer
5 certains d'entre eux afin de minimiser cet effet. De plus, ce type de configurations présente des lignes de transition ou zones sans héliostats responsables d'une moindre exploitation du terrain.

Description de l'invention

L'objet de l'invention est l'application de la disposition que présentent les
10 feuilles, tiges et graines des plantes à la répartition spécifique des héliostats dans le parc solaire. Cette disposition est appelée phyllotaxie et elle est caractéristique de chaque espèce de plante. Sa fonction est de faire en sorte que lesdites feuilles, tiges et graines soient exposées au soleil avec le minimum d'interférences possible de la part de leurs voisines, ce qui maximise le captage de lumière.

15 Cette répartition spécifique permet que les héliostats puissent être placés de façon à minimiser les pertes optiques dues aux ombres et blocages entre héliostats voisins, l'atténuation atmosphérique et l'augmentation de l'interception provoquée par les grandes distances entre les héliostats et la tour, en optimisant ainsi l'exploitation du rayonnement solaire puisqu'il est possible de maximiser la densité d'héliostats dans le
20 parc solaire.

La section dorée ou "divine proportion" (employée dans le classicisme grec) résulte de la division d'une quantité linéaire (grandeur de distance, durée, etc., pouvant être abstraites par la longueur d'un segment) de sorte que le rapport entre la longueur
25 totale et la partie la plus longue soit identique à celui donné entre la partie la plus longue et la plus courte. Il en résulte l'équation nécessaire ($a/b = b/(a+b)$), la valeur de la section longue (sur un segment de longueur 1) est de 0.618 approximativement (en réalité c'est un nombre irrationnel), et celle de la plus courte sur 0.382.

Cette valeur coïncide avec la limite à laquelle tend le rapport entre deux termes consécutifs de la série de Fibonacci.

30 La disposition des différents éléments ou héliostats d'une centrale est décrite par une régularité dans la divergence de l'angle formé par les éléments successifs disposés. Cet angle divise un cercle complet en une fraction qui coïncide avec les nombres de la série de Fibonacci ($1/2, 1/3, 2/5, 3/8, 5/13 \dots$) qui convergent à la limite irrationnelle de

"B"

4

la section dorée 0.382 ..., correspondant à l'angle de 137.5 ... degrés.

Pour la détermination dudit angle et le positionnement des héliostats dans la centrale thermoélectrique, le système objet de l'invention se base sur l'emplacement des héliostats en suivant un modèle représentant la disposition des feuilles, tiges et
 5 graines. Ceux-ci sont décrits par les équations suivantes qui définissent des spirales bidimensionnelles de Fermat, appelée aussi spirale parabolique, en un nombre appartenant à la série de Fibonacci.

$$x_n = r_n \cdot \cos \theta_n$$

$$y_n = r_n \cdot \sin \theta_n$$

Où :

$$r_n = c_n \cdot \sqrt{n}$$

$$\theta_n = n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\tau^2}$$

10 Soit :

- $n \in \mathbb{N}$ nombre naturel qui correspond au nombre d'héliostats qu'on souhaite implanter dans une zone déterminée.
- $r_n \in \mathbb{Q}$, $r_n > 0$ nombre rationnel plus grand que zéro et qui correspond au rayon
 15 ou à la distance à laquelle chaque héliostat sera situé dans le parc solaire par rapport au centre de l'axe des coordonnées de la tour.
- $\theta_n \in (0, 2\pi)$ correspondant à l'angle d'emplacement de l'héliostat sur des coordonnées polaires.
- τ est la limite irrationnelle de la section dorée 0.382 ..., correspondant à l'angle
 20 de 137.5 ... degrés. La limite irrationnelle de la section dorée étant :

$$\tau = \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \dots}}}}}$$

- x_n la coordonnée polaire sur l'axe X de l'héliostat n.
 y_n la coordonnée polaire sur l'axe Y de l'héliostat n.
- c_n est un paramètre qui correspond à l'indice de compacité des héliostats dans
 25 le parc solaire. Ce paramètre peut être constant pour tous les héliostats ou bien être différent pour chacun d'eux, et dépend de :

"B"

5

- 5
- $h \in \mathbb{Q}$, $h > 0$ nombre rationnel plus grand que zéro et correspond à la hauteur de la tour.
 - $d \in \mathbb{Q}$, $d > 0$ nombre rationnel plus grand que zéro et correspond à la distance minimale à laquelle les héliostats doivent être placés pour éviter le contact entre eux.
 - $L \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ correspond à la latitude à laquelle le parc solaire sera placé.
 - $\theta_n \in (0, 2\pi)$ correspond à l'angle d'emplacement de l'héliostat sur des coordonnées polaires.

10 La centrale thermoélectrique configurée selon cette disposition des héliostats permet de :

- Obtenir un plus grand rendement du champ d'héliostats en raison de :
 - la minimisation des pertes dues aux ombres et aux blocages, les héliostats se trouvant dans un positionnement optimal.
 - diminution de l'atténuation atmosphérique et augmentation de l'interception car l'implantation des héliostats est plus dense.
 - Parvenir à un moindre coût :
 - Le plus grand rendement dû à la diminution des pertes, accroît la production annuelle et permet d'économiser des héliostats.
 - La moindre surface utilisée en raison de l'implantation plus dense, implique une moindre distance entre héliostats. Par conséquent, il y a une réduction considérable de la distance à câbler et de la nécessité de construire des chemins pour accéder à chacun des héliostats en vue de leur nettoyage et de leur maintenance.
 - Éviter l'utilisation d'un logiciel complexe, y compris le personnel spécialisé. Cela n'est plus nécessaire avec la présente invention, beaucoup plus simple.
 - On évite la réalisation d'une optimisation intense jusqu'à l'obtention d'un positionnement optimal qui implique une économie de temps et de ressources
- Le système objet de l'invention permet également d'éliminer la présence des lignes de transition actuelles et, si on le souhaite, d'éliminer la symétrie, toutes deux étant présentes dans les centrales thermoélectriques qui sont en fonctionnement aujourd'hui.
- 30

"B"

6

Description des dessins

Pour compléter la description en cours et dans le but d'aider à une meilleure compréhension de l'invention, à ladite description est joint un jeu de dessins sur lesquels, à des fins d'illustration et sans caractère limitatif, on a représenté ce qui suit :

Figure 1.- Montre l'état de la technique actuel, répartitions "radial staggered" (en quinconce) et "corn field" (champ de maïs).

Figure 2.- Montre un schéma de la répartition des héliostats résultant du système objet de l'invention.

Figure 3.- Montre un schéma de la répartition des éléments de la centrale objet de l'invention.

Figure 4.- Schéma sur lequel sont définis les paramètres d'implantation des héliostats par rapport à la tour.

RÉALISATION PRÉFÉRÉE DE L'INVENTION

Au vu des figures, on a représenté ci-dessous un mode de réalisation préféré du procédé de répartition des héliostats objet de cette invention.

Sur la figure 1 est montrée la répartition des héliostats selon les configurations utilisées jusqu'à maintenant : "radial staggered" et "corn field".

Sur la figure 2 on observe ce que serait le champ d'héliostats si la répartition se faisait selon le procédé de l'invention.

La figure 3 montre une centrale thermoélectrique (1) implantée en un lieu déterminé de latitude "L", dans laquelle est érigée une tour réceptrice (2) d'une hauteur déterminée "h" à laquelle arriveront les rayons solaires (4) une fois réfléchis par des héliostats (3) qui sont installés autour de ladite tour réceptrice (2). La génération d'énergie électrique est donnée par l'incidence des rayons solaires (4) réfléchis sur ladite tour réceptrice (2) où ils sont concentrés, chauffant ainsi un fluide caloporteur qui sera utilisé pour actionner une turbine et générer de l'énergie électrique.

Pour que la concentration des rayons solaires (4) réfléchis par les héliostats (3) soit optimale, lesdits héliostats (3) sont situés à une distance minimale déterminée "d" entre eux pour éviter le contact entre ces derniers. La centrale thermoélectrique (1) dispose d'un nombre " n_N " d'héliostats déterminé par la capacité ou les besoins de la centrale. Par ailleurs, comme cela est montré sur la figure 4, l'implantation de chacun des "n" héliostats (3, 3', 3'') se fait selon un rayon r_n ($r_3, r_{3'}, r_{3''}$), qui correspond à la ligne

/cc/

"B"

7

qui relie l'héliostat (3, 3', 3'') à la tour (2) et selon un angle θ_n ($\theta_3, \theta_{3'}, \theta_{3''}$) correspondant à l'angle d'emplacement de l'héliostat sur des coordonnées polaires. Pour réaliser la répartition optimale des héliostats (3) dans la centrale thermoélectrique (1), nous déterminons l'emplacement sur des coordonnées polaires de chacun des héliostats (3) autour de la tour (2) en suivant le modèle déterminé par :

$$r_n = c_n \cdot \sqrt{n};$$

$$\theta_n = n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\tau^2},$$

selon les formules précédemment exposées.

10 Comme cela a été dit dans la description de l'invention, c_n peut être une constante pour tous les héliostats ou on peut le faire varier pour chacun d'eux. Pour des valeurs de c_n constantes, nous obtenons une répartition dans le champ des héliostats (3) dont la vue en plan des héliostats (3) de la centrale thermoélectrique (1) est un schéma identique à celui que suit la répartition qu'on trouve, par exemple, 15 dans des fleurs composées et l'ensemble des graines, l'exemple le plus connu étant la répartition des graines dans un tournesol, comme on peut l'apprécier sur la figure 2. Cette disposition est décrite mathématiquement par des spirales paraboliques ou de Fermat en un nombre appartenant à la série de Fibonacci.

Pour des valeurs de c_n variables, adaptées à la latitude terrestre à laquelle la centrale thermosolaire (1) est située et aux autres variables L , d , h et θ_n , on obtient 20 une répartition des héliostats (3) qui augmente le rendement du parc solaire. On peut voir ladite adaptation de c_n sur la Figure 2.

Un exemple de formulation qui pourrait servir à définir c_n pour chaque héliostat serait :

25

$$c_n(d, L, \theta_n) = \frac{k_1 \cdot d}{k_2 \cdot |L| + k_3 \cdot \theta_n}$$

Dans ce cas cela dépendrait des variables suivantes :

- $d \in \mathbb{Q}$, $d > 0$ nombre rationnel plus grand que zéro. Correspond à la distance minimale à laquelle les héliostats doivent être placés pour éviter le contact entre eux.

30

"B"

8

- $L \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$. Correspond à la latitude à laquelle le parc solaire sera placé.
- $\theta_n \in (0, 2\pi)$. Correspond à l'angle d'emplacement de l'héliostat sur des coordonnées polaires.
- $k_1, k_2, k_3 \in \mathbb{Q}$. Constantes rationnelles supérieures à zéro.

5 Dans ce cas, on a laissé de côté la hauteur de la tour mais ce serait un autre paramètre qui pourrait être pris en compte au moment d'obtenir une équation générale pour c_n . Ce procédé de répartition des éléments, dont le développement mathématique était déjà connu en l'état de la technique (bien qu'on y ait ajouté certains paramètres pour l'adapter aux conditions spéciales de chaque

10 emplacement), produit un effet surprenant et inconnu jusqu'à ce jour s'il est appliqué à la répartition des héliostats dans le parc solaire d'une tour réceptrice solaire, puisque les pertes optiques de la centrale sont minimisées, y compris celles provoquées par les ombres et les blocages entre héliostats, ce qui confère une plus grande efficacité au système et, par conséquent, une diminution du coût.

15 Bien que ce procédé soit développé spécialement pour son application dans des centrales d'énergie solaire à récepteur central, son extension à d'autres domaines de l'industrie qui exigeraient des caractéristiques similaires n'est pas à écarter.

20

"B"

9

REVENDICATIONS

1. Procédé de répartition des héliostats dans une centrale solaire à tour (1) pour la
 5 génération d'énergie électrique à partir d'énergie solaire, du type de celles qui
 comprennent une tour réceptrice (2) entourée d'un champ d'héliostats (3)
 lesquels réfléchissent le rayonnement solaire sur ladite tour (2), **caractérisé**
parce que le procédé de répartition desdits héliostats (3) consiste à imiter les
 systèmes qu'on trouve dans la nature pour le captage de lumière (graines de
 plantes, feuilles ou pétales) via l'installation de chaque héliostat selon un rayon
 10 et un angle défini, sur des coordonnées polaires, par :

$$r_n = c_n \cdot \sqrt{n}; \quad \theta_n = n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\tau^2}; \text{ soit :}$$

- n numéro de l'héliostat (3) que nous souhaitons placer,
- r_n distance depuis la tour (2) jusqu'à la position de l'héliostat n (3),
- θ_n l'angle d'emplacement de l'héliostat sur des coordonnées polaires,
- 15 • c_n paramètre qui correspond à l'indice de compacité des héliostats (3)
 dans la centrale,
- τ la limite irrationnelle de la section dorée, c'est-à-dire,

$$\tau = \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \dots}}}}}$$

2. Procédé de répartition des héliostats dans une centrale solaire à tour (1) selon la
 20 revendication 1 **caractérisé parce que** c_n ou l'indice de compacité des
 héliostats (3) dans la centrale est une constante identique pour tous les
 héliostats du champ.

3. Procédé de répartition des héliostats dans une centrale solaire à tour (1) selon la
 25 revendication 1 **caractérisé parce que** c_n ou l'indice de compacité des
 héliostats (3) dans la centrale est différent pour chacun d'eux et dépend de la
 hauteur de la tour, la distance minimale à laquelle les héliostats doivent être
 placés pour éviter le contact entre eux, la latitude à laquelle le parc solaire sera
 placé et l'angle d'emplacement de chaque héliostat sur des coordonnées
 polaires.

30 4. Procédé de répartition des héliostats dans une centrale solaire à tour (1) selon la
 revendication 3 **caractérisé parce que** c_n peut être calculé comme :

"B"

10

$$c_n(d, L, \theta_n) = \frac{k_1 \cdot d}{k_2 \cdot |L| + k_3 \cdot \theta_n}, \text{ soit :}$$

- $d \in \mathbb{Q}$, $d > 0$ nombre rationnel plus grand que zéro. Correspond à la distance minimale à laquelle les héliostats doivent être placés pour éviter le contact entre eux.
- 5 • $L \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$. Correspond à la latitude à laquelle le parc solaire sera placé.
- $\theta_n \in (0, 2\pi)$ Correspond à l'angle d'emplacement de chaque héliostat sur des coordonnées polaires.
- $k_1, k_2, k_3 \in \mathbb{Q}$. Constantes rationnelles plus grandes que zéro.

10

100/

"A"

12

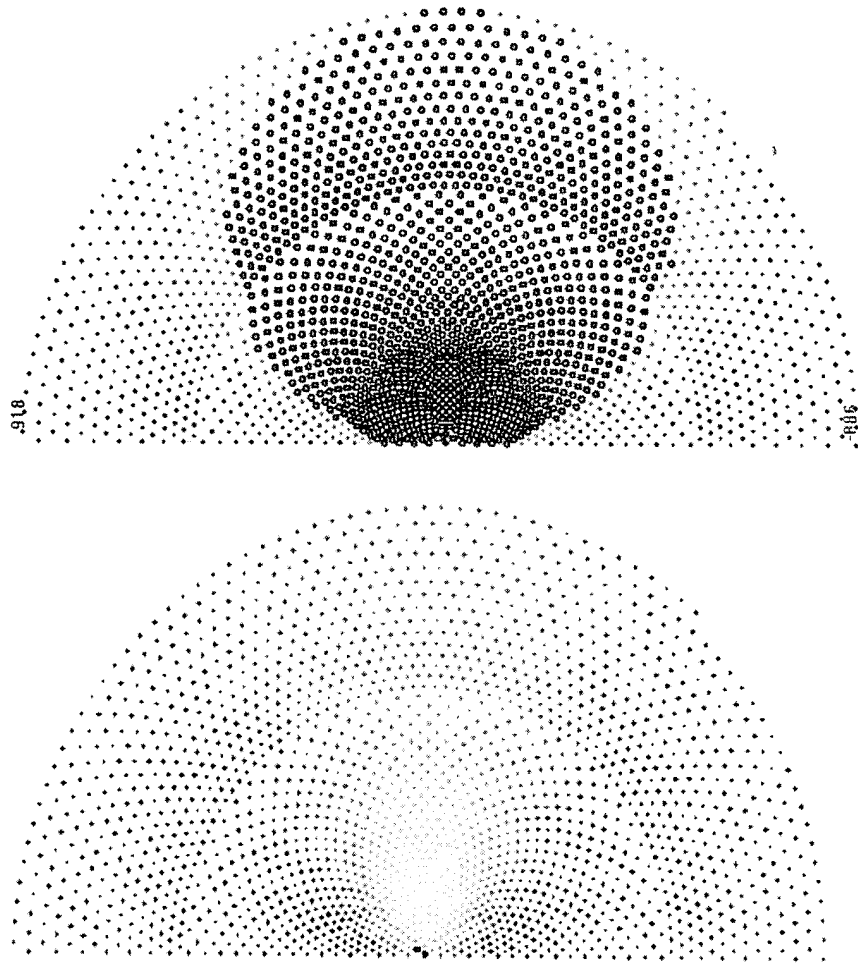


FIGURE 1 (État de la Technique)

[Handwritten signature]

"A"

13

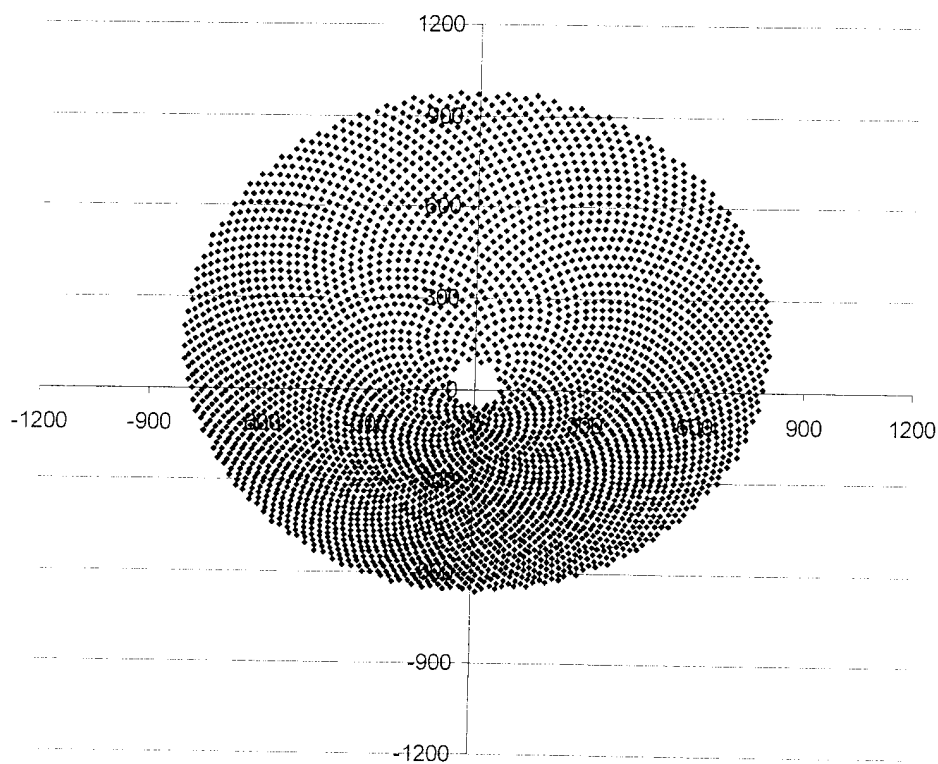
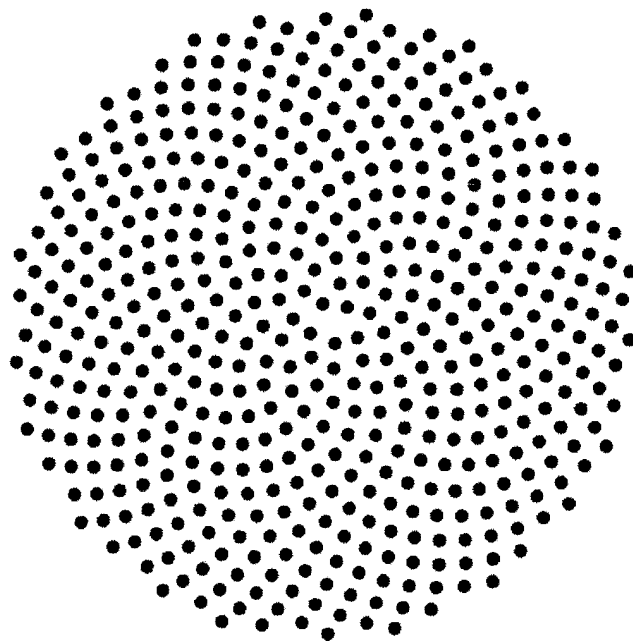


FIGURE 2

Handwritten signature

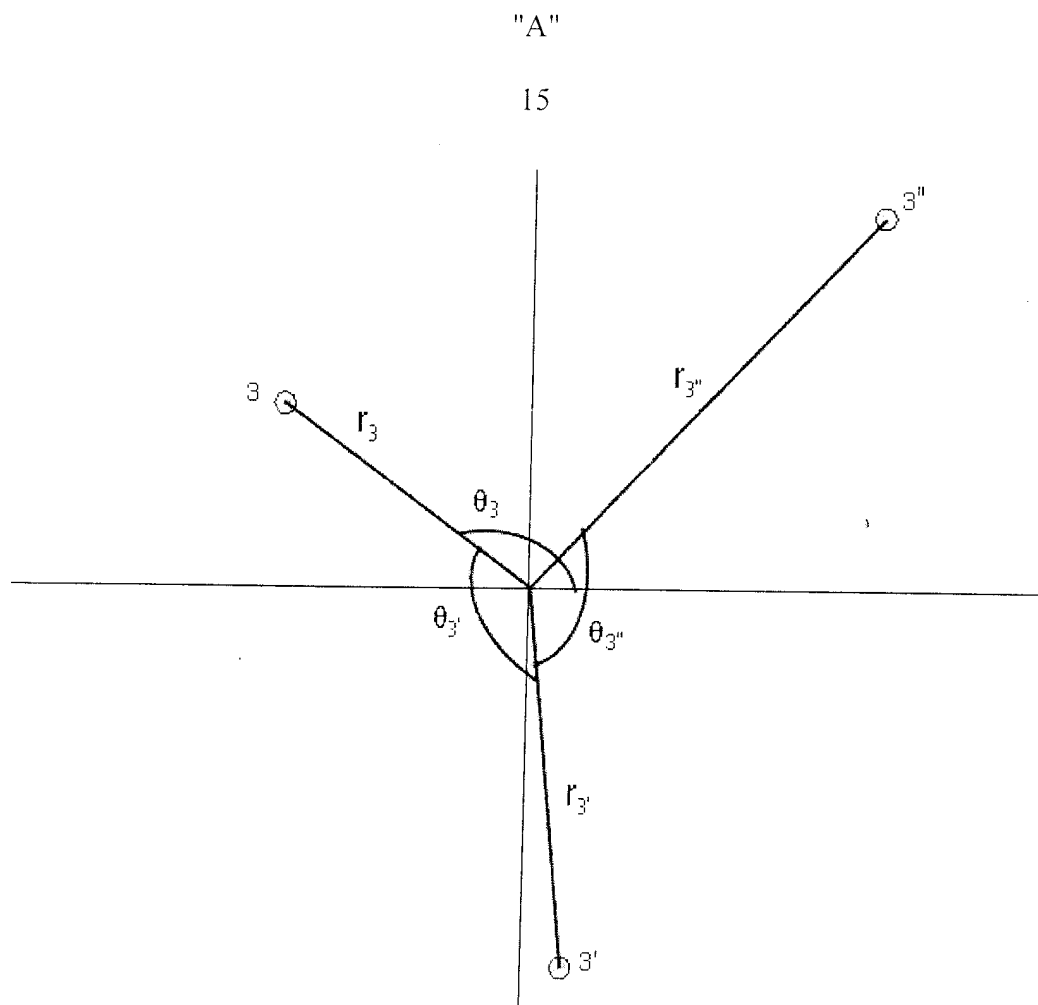


FIGURE 4

Handwritten signature

"A"

14

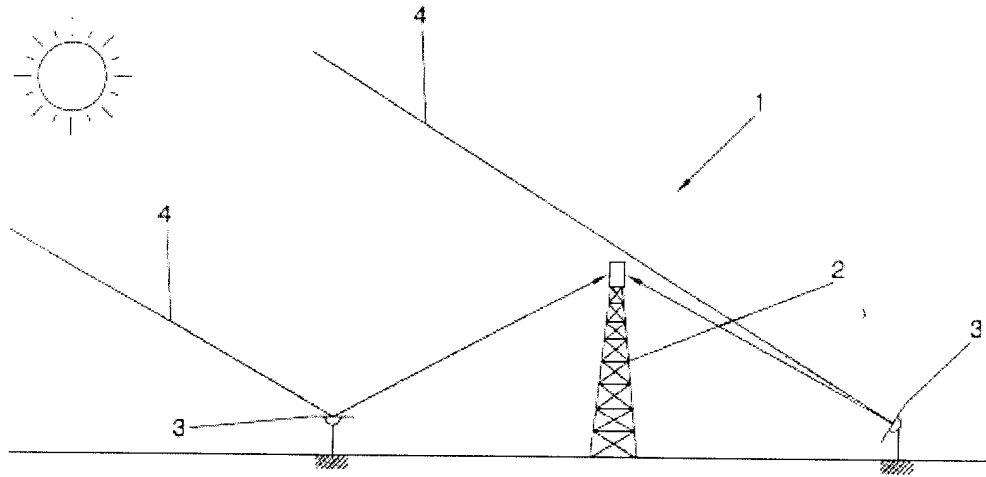


FIGURE 3

fcc'