

A1

**DEMANDE  
DE BREVET D'INVENTION**

⑫

**N° 82 19794**

---

⑮ Appareil de formation d'images dont la résolution est limitée par la diffraction.

⑯ Classification internationale (Int. Cl.<sup>3</sup>). H 04 N 1/02, 3/10 // G 02 B 21/00.

⑰ Date de dépôt..... 25 novembre 1982.

⑱ ⑳ ㉑ Priorité revendiquée : GB, 26 novembre 1981, n° 8135759; et 9 mars 1982, n° 8206923.

㉒ Date de la mise à la disposition du  
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 36 du 9-9-1983.

---

㉓ Déposant : UNITED KINGDOM OF GREAT BRITAIN AND NORTHERN IRELAND, représenté  
par The Secretary of State for Defence. — GB.

㉔ Invention de : Mario Bertero et Edward Roy Pike.

㉕ Titulaire : *Idem* ㉓

㉖ Mandataire : Cabinet Simonnot,  
49, rue de Provence, 75442 Paris Cedex 09.

La présente invention concerne des appareils de formation d'images dont la résolution est limitée par la diffraction.

On utilise des appareils pour la formation d'images d'un objet. Par exemple, des microscopes donnent une image agrandie d'un petit objet placé sur une lame éclairée. Le grandissement de l'image par rapport à l'objet nécessite la focalisation sur de petites parties de l'objet. Le diamètre de la zone d'un objet qui est résolue est finalement limité par la diffraction dans l'appareil de formation d'images utilisé. La limite théorique de résolution due à la diffraction dans un bon microscope optique est égale à  $\lambda/2$ ,  $\lambda$  étant la longueur d'onde du rayonnement, cette condition étant appelée critère de Rayleigh. La même limite apparaît dans le cas des images infrarouges.

Le problème posé par la diffraction existe aussi dans l'observation d'un aéronef au radar, par exemple pour la régulation du trafic aérien. L'aptitude d'un système d'antenne à distinguer des aéronefs très rapprochés est limitée par la diffraction.

De même, lors de la détection acoustique par exemple d'objets qui se trouvent au fond de la mer ou dans un microscope acoustique, la résolution est limitée par la diffraction.

Lorsqu'une image d'un objet est focalisée par un objectif sur un plan image, une partie seulement de l'information du rayonnement passant dans l'objectif est focalisée dans l'image géométrique. Des informations concernant l'objet sont aussi présentes dans le plan image en dehors de l'image géométrique et elles ne sont pas normalement utilisées. Dans le cas d'objets de dimension bien supérieure à la limite de diffraction, ces informations supplémentaires constituent une partie notable des informations totales transmises par l'objectif.

L'invention met en oeuvre ces informations qui n'ont pas été utilisées jusqu'à présent, avec les informations de l'image géométrique, pour l'obtention d'informations

relatives à des objets dont la dimension est voisine de la limite de diffraction.

Un appareil de formation d'images selon l'invention comporte un objectif destiné à focaliser un rayonnement  
5 cohérent ou non sur un plan image, des détecteurs destinés à mesurer l'amplitude du rayonnement dans le plan image et à former une matrice d'informations, un dispositif d'inversion de cette matrice afin qu'il donne une reconstitution d'image et un dispositif d'observation de l'image reconsti-  
10 tuée.

L'appareil de formation d'images peut fonctionner avec le rayonnement électromagnétique, par exemple aux fréquences visibles ou du radar, avec des faisceaux d'électrons ou un rayonnement acoustique, par utilisation d'objectifs  
15 convenables. Cependant, aux fréquences visibles, les détecteurs ne mesurent normalement que l'intensité de l'image et, dans ce cas, un dispositif supplémentaire doit être utilisé afin qu'il déduise les amplitudes et les phases.

Les détecteurs de lumière visible peuvent être  
20 sous forme d'un arrangement de photodétecteurs ou de l'anticathode d'un tube électronique photoconducteur, par exemple utilisé dans une caméra de télévision, à balayage électronique par un faisceau principal de référence donnant l'information nécessaire de phase comme dans l'holographie ou,  
25 dans une variante, par utilisation du procédé de filtrage interférentiel de Walker (demande de brevet britannique n° 81.08244) ou, plus simplement, si l'on peut supposer que l'objet est réel, par utilisation de la relation univoque entre l'image et l'objet même lorsque seule l'intensité  
30 en est connue.

L'image reconstituée peut être observée sur un tube à rayons cathodiques, un film photographique, ou, graphiquement ou numériquement, sur un papier.

L'objectif peut balayer l'objet afin qu'il donne  
35 une image globale d'un objet de grande dimension. Dans ce cas, l'image reconstituée est la somme des régions balayées et reconstituées.

Dans le cas d'un appareil de formation d'images mettant en oeuvre la lumière visible, c'est-à-dire un microscope, l'objet peut être éclairé par un faisceau de rayonnement cohérent d'un laser. Le faisceau peut être focalisé afin qu'il éclaire une région dont le diamètre est d'environ la moitié de la longueur d'onde, ou il peut assurer un éclairage cohérent ou non par un diaphragme sous forme d'un carré ou d'un cercle dont le diamètre ou le côté est de l'ordre de la moitié de la longueur d'onde.

10 Dans le cas des radars, les aéronefs sont éclairés par un rayonnement cohérent. Lorsque des aéronefs sont séparés par une distance supérieure à la limite de diffraction de l'antenne réceptrice, aucune augmentation de la résolution n'est nécessaire et le récepteur fonctionne en mode normal.

15 Cependant, pour des distances inférieures à la limite de diffraction, les échos d'aéronefs très rapprochés sont traités selon l'invention.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront mieux de la description qui va suivre, faite en référence au dessin annexé sur lequel :

20 la figure 1 est une perspective schématique en partie sous forme de diagramme synoptique d'un microscope dans lequel un échantillon est déplacé par pas transversalement à un faisceau laser afin qu'il forme un objet balayé;

25 et

la figure 2 est une mosaïque d'images reconstituées.

Comme l'indique la figure 1, un microscope à résolution accrue comporte un laser 1 ou une autre source de lumière dont le faisceau 2 de sortie est focalisé par un objectif 3 sur un échantillon 4 à mesurer. Le laser 1 peut être du type hélium-néon, fonctionnant à 633 nm ou une raie laser ultraviolette convenable. La lumière 2 est focalisée sur une région 5 inférieure à une longueur d'onde en direction transversale, par exemple de l'ordre de la moitié de la longueur d'onde ; dans une variante, on peut utiliser un diaphragme ayant une ouverture carrée de dimension égale à la moitié de la longueur d'onde.

30

35

L'échantillon 4 est monté de manière qu'il puisse se déplacer en x, y perpendiculairement à la lumière sous la commande de moteurs pas à pas 6, 7 ou sous la commande de mécanismes convenables de balayages en dents de scie ou  
5 sinusoïdaux.

La lumière transmise par l'échantillon est collectée et focalisée par un objectif de microscope 8 sur un arrangement 11 de 10 x 10 détecteurs. Chaque détecteur reçoit ainsi la lumière d'une partie différente de l'échan-  
10 tillon éclairé, c'est-à-dire d'un élément 5 d'échantillon.

Le signal de sortie de chaque détecteur de l'arrangement 11, formant une matrice d'informations, parvient à un ordinateur 12 qui traite cette matrice afin qu'il l'affiche sur un ensemble 13 d'affichage visuel, par exemple  
15 un tube à rayons cathodiques, un film photographique ou une feuille de papier.

Sur la figure 2, les douze carrés 14 de grande dimension représentent chacun un élément éclairé 5 d'échantillon. L'image complète représentée est obtenue pour quatre  
20 positions de l'échantillon 4 dans la direction x et trois positions dans la direction y. Un microscope normal ne permet pas la résolution des détails dans chaque élément échantillon 5, c'est-à-dire pour un carré de dimension  $\lambda/2$ . Ainsi, chaque carré 14 serait affiché sous forme d'un point ayant  
25 l'intensité moyenne d'éclairement. Dans chacun des carrés plus grands 14, la mise en oeuvre du traitement selon l'invention permet la formation par exemple de neuf sous-éléments 15 ayant chacun une intensité uniforme. Une quantité considérablement plus grande de détails est ainsi disponible  
30 pour l'ensemble de l'échantillon qu'avec un microscope classique. L'information provenant de chaque élément échantillon est mémorisée dans l'ordinateur jusqu'à ce que la totalité de l'échantillon ait été traitée. L'échantillon total peut alors être observé.

35 Lors du fonctionnement, une mince tranche 4 de matière à examiner est placée sur une lame de microscope et dans un support d'échantillon. Ce dernier est déplacé

par pas de  $\lambda/2$  dans les directions  $x$  et  $y$ , à volonté.

La lumière 2 du laser est focalisée sur une partie carrée de  $\lambda/2$  de l'échantillon ; l'échantillon éclairé forme un élément échantillon 5.

5 L'élément échantillon 5 forme une image sur la totalité de l'arrangement récepteur 11. Le signal de chaque élément détecteur parvient à l'ordinateur 12 qui calcule une inversion des informations de la matrice et les transmet à l'unité 13 d'affichage visuel. L'échantillon  
10 5 est alors déplacé d'un pas de  $\lambda/2$  et l'opération se répète. Ce procédé à déplacement progressif se répète jusqu'à l'examen de la totalité de l'échantillon 4. Le résultat obtenu est une image de définition poussée de l'échantillon.

15 Le procédé indiqué précédemment s'applique à la microscopie par réflexion de la même manière qu'à la microscopie par transmission comme indiqué précédemment.

L'échantillon peut être déplacé par pas égaux à une fraction de la longueur d'onde et les multiples images formées peuvent être intégrées afin que la définition  
20 de l'image soit améliorée en présence de bruit.

On considère le cas le plus simple uniquement dans lequel l'objet peut être considéré comme réel. Dans ce cas, l'amplitude de l'image est la racine carrée de l'intensité et sa phase est égale soit à 0 soit à  $\pi$ . L'utilisation de la continuité de la dérivée permet la détermination  
25 de la phase par sélection de la phase 0 au centre de l'image et l'utilisation de phases alternées  $\pi$  et 0 ensuite vers l'extérieur, lors du recoupement successif des racines de l'intensité. L'opération peut aussi être réalisée par la  
30 technique mathématique de continuation analytique le cas échéant.

La base théorique des transformations matricielles des amplitudes complexes dérivées est la suivante.

Si l'on appelle  $\underline{x} = \{x_1, x_2\}$  un point de l'objet  
35 et si l'amplitude complexe de l'objet  $f(x)$  est différente de 0 uniquement dans la région éclairée ou délimitée  $D$ , l'image est alors donnée par les relations :

$$(Kf)(\underline{x}) = \iint_D S(\underline{x} - \underline{y}) f(\underline{y}) d\underline{y}$$

avec

$$5 \quad S(\underline{x}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_P e^{i(\underline{x}, \underline{\omega})} d\underline{\omega} \quad \text{pour un \u00e9clair\u00e9ment coh\u00e9rent}$$

et

$$10 \quad S(\underline{x}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \left| \iint_P e^{i(\underline{x}, \underline{\omega})} d\underline{\omega} \right|^2 \quad \text{pour un \u00e9clair\u00e9ment non coh\u00e9rent}$$

P est le domaine limit\u00e9 dans l'espace de Fourier et correspondant aux fr\u00e9quences spatiales transmises par l'objectif.

15 On obtient un ajustement lin\u00e9aire de l'objet \u00e0 l'image par la m\u00e9thode des moindres carr\u00e9s par inversion au calculateur des \u00e9quations normales num\u00e9ris\u00e9es :

$$20 \quad \sum_{n_1 n_2 p_1 p_2} S_{n_1 n_2 m_1 m_2} S_{n_1 n_2 p_1 p_2} f_{p_1 p_2} = \sum_{q_1 q_2} S_{m_1 m_2 q_1 q_2} g_{q_1 q_2}$$

avec

$$S_{abcd} = S(\{a, b\} - \{c, d\})$$

et

$$25 \quad f_{ab} = f(\{a, b\}) \quad g_{ab} = g(\{a, b\})$$

En pratique,  $p_1$  et  $p_2$  portent sur un nombre de points bien plus petit que celui sur lequel portent  $q_1$  et  $q_2$ .

Le vecteur  $\underline{x}$  repr\u00e9sente un point  $\{x_1, x_2\}$  dans le plan objet (\u00e9chantillon 4), le vecteur  $\underline{y}$  repr\u00e9sente un  
30 point  $\{y_1, y_2\}$  dans le plan image (sur le d\u00e9tecteur 11),  
 $\{p_1, p_2\}$  sont les valeurs \u00e9chantillons de  $\{x_1, x_2\}$   
 $\{q_1, q_2\}$  sont les valeurs \u00e9chantillons de  $\{y_1, y_2\}$

Dans le cas d'un \u00e9clair\u00e9ment coh\u00e9rent, on peut  
35 montrer que la fonction  $S(\underline{x})$  est :

$$S(\underline{x}) = \frac{\sin(\Omega x_1)}{\pi x_1} \frac{\sin(\Omega x_2)}{\pi x_2}$$

pour un objet carré, avec une pupille carrée donnée par :

$$= [-\Omega, \Omega] \times [-\Omega, \Omega]$$

5 Dans le cas d'un objet circulaire et d'une pupille circulaire de rayon  $\Omega$  en fréquence, on obtient :

$$s(\tilde{x}) = \frac{\Omega}{2\pi} \frac{J_1(\Omega|\tilde{x}|)}{|\tilde{x}|}$$

10 Dans le cas d'un éclairage non cohérent, les expressions analogues sont, pour l'objet carré :

$$s(\tilde{x}) = \frac{\sin^2(\Omega x_1)}{\pi \Omega x_1^2} \frac{\sin^2(\Omega x_2)}{\pi \Omega x_2^2}$$

15 et pour l'objet circulaire :

$$s(\tilde{x}) = \text{FT} \left\{ \frac{2}{\pi} \left[ \cos^{-1} \left( \frac{|\omega|}{2\Omega} \right) - \left( \frac{|\omega|}{2\Omega} \right) \sqrt{1 - \left( \frac{|\omega|}{2\Omega} \right)^2} \right] E_P \left( \frac{\omega}{2} \right) \right\}$$

20 FT désignant la transformée de Fourier et  $E_P = 1$  sur la pupille et 0 ailleurs.

Un autre algorithme de reconstitution de l'objet à partir des signaux de sortie d'un arrangement de détecteurs qui échantillonne l'image met en oeuvre le système  
25 singulier  $\{u_k, v_k; a_k\}_{k=0}^{\infty}$  de la transformation de l'objet continu  $f$ , sur son support connu, à l'image "vectorielle"  $g_n$  définie par les échantillons de  $(N)$  données complexes sur le jeu fini de détecteurs. La reconstitution est alors exécutée par l'opération :

30

$$f = \sum_{k=0}^K \frac{(g, v_k)}{a_k} u_k, \quad (g, v_k) = \sum_{n=1}^N w_n g_n (v_k)_n$$

dans laquelle  $(g, v_k)$  est le produit scalaire ou la projection des données sur le vecteur singulier  $v_k$ . Ce système  
35 singulier est une fonction de la disposition expérimentale mais peut être calculé par des techniques numériques selon la technique connue dans l'analyse numérique, dans un cas



particulier.  $K$  est une limite supérieure du nombre d'éléments qui peuvent être restitués, déterminée par la vitesse de diminution des valeurs singulières  $\alpha_k$  et le niveau réel de bruit présent. Les paramètres  $w_k$  sont des poids convenables destinés à prendre en considération les défauts possibles d'espacement des détecteurs.

La résolution, dans les systèmes de formation d'images dont la résolution est limitée par la diffraction, est décrite dans l'article OPTICA ACTA 1982 vol. 29, n° 6, 727-746.

REVENDEICATIONS

1. Appareil de formation d'images, caractérisé en ce qu'il comprend un objectif (8) destiné à focaliser un rayonnement cohérent ou non sur un plan image, des détecteurs  
5 (11) destinés à mesurer l'amplitude du rayonnement dans le plan image afin qu'ils forment une matrice d'informations, un dispositif (12) d'inversion de cette matrice afin qu'il assure une reconstitution d'une image, et un dispositif (13) d'observation de l'image reconstituée.
- 10 2. Appareil selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend un dispositif (1) d'éclairement d'un objet, la zone éclairée et focalisée sur le détecteur (11) ayant une dimension inférieure à la longueur d'onde du rayonnement d'éclairement en direction transversale.
- 15 3. Appareil selon la revendication 2, caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif (6, 7) de balayage du rayonnement d'éclairement sur l'objet.
4. Appareil selon la revendication 3, caractérisé en ce que le balayage est assuré par des moteurs (6, 7)  
20 destinés à déplacer l'objet par pas.
5. Appareil selon la revendication 5, caractérisé en ce que le dispositif de balayage comporte des déflecteurs du rayonnement transversalement à l'objet.
6. Appareil selon la revendication 2, caractérisé  
25 en ce qu'il comprend un laser (1) destiné à éclairer l'objet.
7. Appareil selon la revendication 2, caractérisé en ce que l'objectif (8) reçoit le rayonnement transmis par l'objet.
- 30 8. Appareil selon la revendication 2, caractérisé en ce que l'objectif (8) reçoit le rayonnement réfléchi par la surface de l'objet.
9. Appareil selon la revendication 2, caractérisé en ce que les détecteurs (11) sont des détecteurs séparés  
35 formant un arrangement matriciel.
10. Appareil selon la revendication 2, caractérisé en ce que les détecteurs (11) sont formés par une anticathode d'un tube électronique photoconducteur.

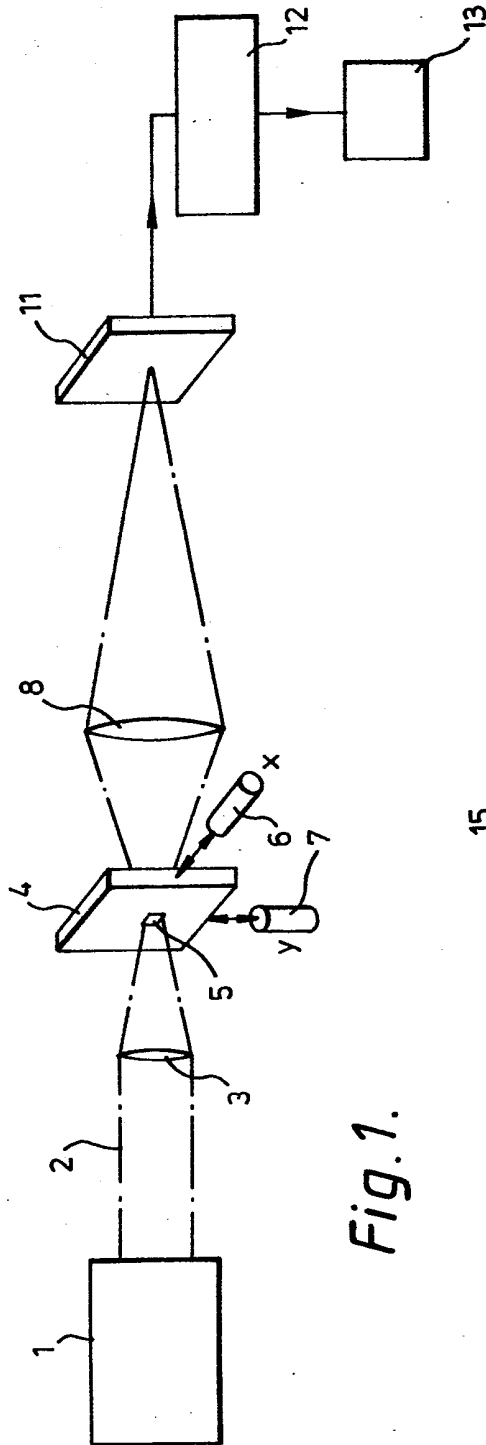


Fig. 1.

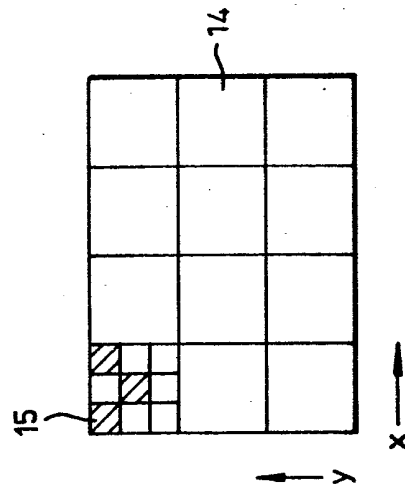


Fig. 2.