

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
—  
**INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**  
—  
COURBEVOIE  
—

①① N° de publication : **3 049 057**  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **16 00449**

⑤① Int Cl<sup>8</sup> : **G 01 C 19/66 (2017.01)**

⑫

## BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ METHODE D'ESTIMATION DES COEFFICIENTS DE DIFFUSION D'UN GYROLASER EN FONCTIONNEMENT ET SYSTEME GYROSCOPIQUE ASSOCIE.

②② Date de dépôt : 18.03.16.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public de la demande : 22.09.17 Bulletin 17/38.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention : 30.03.18 Bulletin 18/13.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *THALES Société anonyme et ASSOCIATION POUR LA RECHERCHE ET LE DEVELOPPEMENT DE METHODES ET PROCESSUS INDUSTRIELS - ARMINES Association loi de 1901 — FR.*

⑦② Inventeur(s) : *HAMZE EL BADOUI NOAD, ROUCHON PIERRE, FEUGNET GILLES, SCHWARTZ SYLVAIN et MARTIN PHILIPPE.*

⑦③ Titulaire(s) : *THALES Société anonyme, ASSOCIATION POUR LA RECHERCHE ET LE DEVELOPPEMENT DE METHODES ET PROCESSUS INDUSTRIELS - ARMINES Association loi de 1901.*

⑦④ Mandataire(s) : *MARKS & CLERK FRANCE Société en nom collectif.*

FR 3 049 057 - B1



## Méthode d'estimation des coefficients de diffusion d'un gyrolaser en fonctionnement et système gyroscopique associé

### DOMAINE DE L'INVENTION

L'invention concerne le domaine des gyrolasers, et plus particulièrement une  
5 méthode d'estimation de certains paramètres du gyrolaser permettant d'améliorer les mesures effectuées avec le gyrolaser.

### ETAT DE LA TECHNIQUE

10

Le gyrolaser est un laser en anneau dans lequel se propagent deux modes  
contrapropagatifs désignés par les lettres CW (pour clockwise en anglais) et  
CCW pour (counterclockwise en anglais). Lorsque ce dispositif est en  
rotation à la vitesse angulaire  $\dot{\theta}$ , les modes contrapropagatifs sont déphasés  
15 d'une quantité  $\varphi$  par effet Sagnac, ce qui entraîne une différence entre leur  
fréquence propres, se traduisant par une différence entre les fréquences  
d'émission du laser.

Pour un gyrolaser idéal, la relation entre la différence de phase  $\varphi$  entre les  
deux modes et la vitesse de rotation  $\dot{\theta}$  est donnée par la formule :

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{4A\omega}{c^2} \dot{\theta} = \kappa \dot{\theta} \quad (1)$$

20

Avec A aire de la cavité du laser et  $\omega$  sa pulsation en rd/s.

$\kappa$  est dénommé gain du gyroscope ou facteur d'échelle.

25 On peut mesurer le déphasage Sagnac  $\varphi$  en recombinaison extra cavité par  
interférométrie les faisceaux issus des modes contrapropagatifs sur un  
détecteur (typiquement une photodiode). Dans l'hypothèse où les intensités  
sont stables le signal de battement reçu par la photodiode est une sinusoïde  
à une fréquence égale à la différence de fréquence entre les modes  
30 contrapropagatifs, la fréquence Sagnac. Le signal de battement fournit donc

une information sur la vitesse de rotation du laser. Cependant, avec une seule photodiode il n'est pas possible de faire la différence entre les deux sens de rotation, c'est pourquoi deux photodiodes sont utilisées. Elles sont placées de telle sorte que leurs signaux soient en quadrature l'un par rapport à l'autre, la phase de la figure d'interférence étant alors légèrement différente pour les deux. Il est alors possible d'obtenir le sens de défilement des franges d'interférence et donc le sens de rotation.

La figure 1 illustre schématiquement un gyrolaser pour lequel on mesure les intensités respectives  $I_1$  et  $I_2$  des deux modes en sortie de cavité et les deux signaux de battement  $y_c$  et  $y_s$  en quadrature :

$$\begin{aligned} y_c &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi + \gamma) \\ y_s &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \sin(\varphi + \gamma) \end{aligned} \quad (2)$$

Avec

$\varphi$  déphasage induit par effet Sagnac,

$\gamma$  déphasage dû à la position de la mesure dans la boucle laser.

Nous dénommerons grandeurs mesurées  $G_m$  les données mesurées :  $I_1, I_2, y_c$  et  $y_s$ .

Typiquement de manière connue à partir des grandeurs mesurées  $G_m$  on remonte à la phase  $\varphi$  par « redressement » puis à la vitesse de rotation.

L'intégration de l'équation (1) donne :

$$\varphi(t) - \varphi(0) = \kappa[\theta(t) - \theta(0)]$$

On pose

la fonction de mesure  $K(I_1, I_2, y_c, y_s, t)$  telle que :

$$K(I_1, I_2, y_c, y_s, t) = \arctan\left(\frac{y_s - I_1 - I_2}{\frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{y_c - I_1 - I_2}}\right) = (\varphi(t) + \gamma)[2\pi] \quad (3)$$

Pour simplifier on pose  $K(I_1, I_2, y_c, y_s, t) = K(t)$ .

Pour un gyroscope tournant à la vitesse de rotation angulaire  $\theta(t)$  entre deux instants  $t_1$  et  $t_2$ , l'estimation de la rotation angulaire totale est donnée par :

$$\Delta\hat{\theta} = \frac{1}{\kappa}[K(t_2) - K(t_1)] = \theta(t_2) - \theta(t_1) \quad (4)$$

On remonte ainsi à la rotation angulaire totale du gyroscope à partir des  
5 grandeurs mesurées  $G_m \{I_1, I_2, \gamma_c, \gamma_s\}$ .

Ce cas correspond au cas d'un gyroscope parfait sans prendre en compte la  
rétrodiffusion des composants de la cavité. Cette mesure est limitée. Il est en  
effet connu que du fait de la rétrodiffusion des composants optiques formant  
10 la cavité, il existe un couplage (faible) entre les deux modes contra-  
propagatifs, qui se traduit par un verrouillage en fréquence du dispositif aux  
faibles fréquences de rotation.

Ce phénomène crée une zone aveugle pour laquelle la détermination de la  
vitesse de rotation à partir de la phase  $\varphi$  est impossible.

15 En tenant compte de la rétrodiffusion, l'équation (1) devient :

$$\dot{\varphi}(t) = \kappa\dot{\theta} + m \sin(\varphi + \xi) \quad (5)$$

Où  $(m, \xi)$  sont respectivement l'amplitude et la phase de la rétrodiffusion.  
Cette équation est appelée équation d'Adler.

20 Une solution permettant de réduire la zone aveugle est de soumettre la  
cavité laser C du gyrolaser à une activation mécanique (« mechanical  
dithering » en anglais) à l'aide d'un dispositif Dith constitué de céramiques  
piézoélectrique activées par un signal électrique, tel qu'illustré figure 2. Le  
dispositif Dith soumet la cavité laser à une oscillation lente de forte  
25 amplitude. Le gyroscope est donc soumis à la rotation que subit tout le  
dispositif ( $\dot{\theta}$ ) auquel se rajoute la rotation due à l'activation mécanique :

$$\dot{\theta}_d = A_d \sin(\omega_d t + \beta_d).$$

Avec  $A_d$  l'amplitude,  $\omega_d$  la pulsation et  $\beta_d$  la phase de l'oscillation imposée .

L'équation d'Adler devient:

30

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}(t) &= \kappa[\dot{\theta} + A_d \sin(\omega_d t + \beta_d)] + m \sin(\varphi + \xi) \\ &= \kappa\dot{\theta} + \Omega_d \sin(\omega_d t + \beta_d) + m \sin(\varphi + \xi) \end{aligned} \quad (6)$$

Où  $\Omega_d = \kappa A_d$  est l'amplitude du déphasage dû à l'activation mécanique.

Grâce à l'activation mécanique on obtient une phase  $\varphi$  qui est quasiment  
tout le temps en dehors de la zone aveugle du gyroscope.

On mesure alors  $\varphi$  à partir des grandeurs mesurées Gm  $\{I_1, I_2, \gamma_c, \gamma_s\}$  (équation (3)) et on remonte à  $\Delta\theta$  en échantillonnant la phase  $\varphi$  tout les  $T_{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_d}$  afin de ne pas mesurer la contribution de l'activation mécanique, en effet :

$$\varphi(T_{\omega_d}) - \varphi(0) = \kappa[\theta(T_{\omega_d}) - \theta(0)] + 0 + m[\sin(\varphi(T_{\omega_d}) + \xi) - \sin(\varphi(0) + \xi)]$$

5 Et donc :

$$\Delta\theta = \frac{1}{\kappa}\Delta\varphi - \frac{m}{\kappa}[\sin(\varphi(T_{\omega_d}) + \xi) - \sin(\varphi(0) + \xi)].$$

Quand  $\kappa\dot{\theta} \gg m$  on a une bonne approximation de l'incrément d'angle:

$$\Delta\theta \approx \frac{1}{\kappa}\Delta\varphi$$

Dans le cas où  $\kappa\dot{\theta} \ll m$  on peut prouver qu'en dessous d'une certaine limite pour  $\kappa\dot{\theta}$  que l'on appelle zone aveugle dynamique on mesure un  $\Delta\varphi = 0$  et ce même si  $\dot{\theta} \neq 0$ . Les termes de rétrodiffusion viennent compenser le déphasage dû à la rotation que subit le gyroscope. Du fait de l'existence de cette zone aveugle dynamique résiduelle, il est intéressant de supprimer l'effet de la rétrodiffusion.

En tenant compte de la dynamique des intensités des deux modes contrapropagatifs (jusqu'à là supposées constantes), le comportement du gyroscope soumis à une activation mécanique est décrit par les équations de Lamb :

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{g_0}{1 + \frac{I_1}{I_s} + \frac{I_2}{I_c}} I_1 - \Gamma I_1 + 2m\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi + \xi) \\ \dot{I}_2 &= \frac{g_0}{1 + \frac{I_1}{I_c} + \frac{I_2}{I_s}} I_2 - \Gamma I_2 + 2m\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi - \xi) \\ \dot{\varphi} &= \Omega_d \sin(\omega_d t + \beta_d) + \kappa\dot{\theta} \\ &\quad - m\sqrt{\frac{I_2}{I_1}} \sin(\varphi + \xi) - m\sqrt{\frac{I_1}{I_2}} \sin(\varphi - \xi) \end{aligned} \quad (7)$$

Avec

$I_1, I_2$  intensité des deux modes contrapropagatifs,

$\varphi$  différence effective de phase entre les deux modes

25  $m$  amplitude et  $\xi$  phase de la rétrodiffusion des miroirs dans la cavité,

$\Omega_d$  amplitude,  $\omega_d$  pulsation et  $\beta_d$  phase de l'activation mécanique,

## 5

$\Gamma$  perte et  $g_0$  gain de la cavité du gyrolaser, avec  $g_0 > \Gamma$

$I_c$  intensité de saturation croisée et  $I_s$  intensité d'autosaturation de la cavité avec  $I_c \gg I_s$

$\dot{\theta}$  vitesse de rotation du gyroscope

- 5 De manière générale les miroirs composant la cavité étant de très bonne qualité, ils possèdent un coefficient de rétrodiffusion faible et on a :  $m \ll g_0 - \Gamma$

Tous ces paramètres sont considérés à variation lente.

- 10 Pour un gyroscope « réel » présentant de la rétrodiffusion sur les miroirs de la cavité, il est donc nécessaire, pour résoudre le système (7), de déterminer les coefficients de rétrodiffusion  $(m, \xi)$ .

Supposons tout d'abord les coefficients  $(m, \xi)$  déterminés (c'est-à-dire connus).

Différentes méthodes de filtrage et de correction peuvent être utilisées pour déterminer la vitesse de rotation  $\kappa$  à partir des équations de Lamb.

Un exemple 300 d'une telle méthode est illustré figure 3.

Optionnellement, on soumet le gyroscope à une activation mécanique.

- 20 Dans une étape 310 on mesure les grandeurs  $G_m = \{I_1, I_2, y_c, y_s\}$ .

Dans une étape 320 on détermine classiquement la phase  $\varphi(t)$  à partir des grandeurs mesurées  $G_m$  (voir formule 3).

On détermine ensuite à l'étape 330 une phase corrigée  $\Psi$  nettoyée des effets de diffusion, en soustrayant la composante de diffusion  $(m, \xi)$

- 25 (supposée connue) :

$$\Psi = \varphi(t) + \int_0^t m \left[ \sqrt{\frac{I_1}{I_2}} \sin(\varphi + \xi) + \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} \sin(\varphi - \xi) \right] d\tau \quad (8)$$

Cette nouvelle grandeur vérifie :

30

$$\frac{d\Psi}{dt} = \kappa [\dot{\theta} + \dot{\theta}_d] \quad (9)$$

Cette équation correspond à celle d'un gyroscope parfait.

Dans une étape 340 on applique alors une méthode classique telle que décrite précédemment pour déterminer la rotation angulaire totale  $\Delta\theta$  du gyroscope.

- 5 Une méthode de précalibration permettant une mesurer une valeur moyenne des coefficients  $(m, \xi)$ , que nous dénommerons  $(m_0, \xi_0)$  en post traitement, par accumulation des données de mesure sur une durée relativement longue, est décrite dans le document « Online effective backscattering estimation for ring laser gyro » de Zhenfang Fan et al, Chinese Optics letters  
10 10(5) : 051404, 2012.

On commence par faire fonctionner le gyroscope pendant plusieurs heures afin de s'assurer de la stabilité des coefficients  $(m_0, \xi_0)$ . On mesure ensuite les intensités des deux modes contrapropagatifs  $(I_1, I_2)$  puis on calcul leur moyenne et leur différence:

$$I_A = \frac{1}{2}(I_1 + I_2)$$

$$i_A = \frac{1}{2}(I_1 - I_2)$$

- 15 Le document précité effectue une étude permettant de donner l'amplitude des oscillation de ces deux grandeurs en fonction de  $\kappa\dot{\theta}$ . Cette dépendance dépend de  $(m, \xi)$ . La méthode proposée dans ce document consiste à mesurer l'amplitude de ces oscillations pour différentes valeurs de  $\kappa\dot{\theta}$  connues, puis d'effectuer un "fit" via un moindre carré de Newton afin de  
20 trouver les coefficients  $(m_0, \xi_0)$ . Cette méthode donne une valeur moyenne des coefficients de diffusion qui ne tient pas compte de dérives de celui-ci au cours du temps.

A partir de cette technique de mesure, plusieurs documents, tel que  
25 Zhenfang Fan, Hui Luo, Guangfeng Lu, and Shaomin Hu, « Dynamic lock-in compensation for mechanically dithered ring laser gyros », proposent de corriger les signaux de battements afin d'en supprimer l'effet de la rétrodiffusion, comme décrit figure 3. On se rapproche ainsi du cas d'un gyroscope parfait et donc d'effectuer une mesure de  $\Delta\theta$  .

- 30 Cependant, comme expliqué plus haut, les mesures de  $\Delta\theta$  dans ce cas sont basées sur des valeurs prédéterminées des coefficients de diffusion qui ne prennent pas en compte les dérives du gyrolaser en fonction du temps.

Un but de la présente invention est de palier aux inconvénients précités en proposant une méthode d'estimation des coefficients de diffusion d'un gyrolaser pendant son fonctionnement, ce qui permet de suivre les dérives éventuelles au cours du temps.

## DESCRIPTION DE L'INVENTION

10 La présente invention a pour objet une méthode itérative de détermination des coefficients de diffusion de la cavité d'un gyrolaser en fonctionnement présentant deux modes contra-propagatifs, comprenant les étapes consistant à :

-déterminer un ensemble de variables dépendant de grandeurs physiques caractéristiques du gyrolaser,

15 les grandeurs physiques caractéristiques comprenant une première et une deuxième intensité lumineuse correspondant respectivement au premier et à au deuxième mode contraprogatif, et une différence de phase entre lesdits modes,

20 lesdites variables étant déterminées de sorte qu'elles soient reliées entre elles par au moins deux relations de dépendance modélisant le comportement du gyrolaser et utilisant une pluralité de coefficients, lesdits coefficients étant fonction de paramètres de la cavité laser comprenant lesdits coefficients de diffusion,

25 une variable de référence par relation de dépendance étant choisie parmi les variables,

-mesurer des valeurs des grandeurs physiques caractéristiques du gyrolaser en fonctionnement,

30 -déterminer des valeurs mesurées des variables, déduites des valeurs mesurées des grandeurs physiques caractéristiques,

-estimer par une méthode itérative des valeurs estimées des coefficients minimisant un écart entre les valeurs mesurées des variables de références, et des valeurs estimées des variables de référence à partir de valeurs des coefficients et des valeurs mesurées des variables autres que celles de  
35 référence,

-déterminer des valeurs estimées des coefficients de diffusion à partir des valeurs estimées des coefficients.

Avantageusement, l'étape de détermination d'un ensemble de variable  
5 comprend la détermination d'une première et une deuxième relation de dépendance entre les variables à partir des équations différentielles de Lamb.

Avantageusement l'étape de détermination d'un ensemble de variables définit les variables suivantes :

$$u = \frac{1}{2}(I_1 + I_2)$$

$$v = \frac{1}{2}(I_1 - I_2)$$

$$\dot{u} = \frac{du}{dt}$$

$$\dot{v} = \frac{dv}{dt}$$

10  $\cos\varphi$

$\sin\varphi$

avec :

$I_1, I_2$  les intensités lumineuses des deux modes contra-propagatifs.

$\cos\varphi$  et  $\sin\varphi$  respectivement cosinus et sinus de la différence de phase  
15 entre les deux modes.

Avantageusement la première relation de dépendance relie entre elles les variables  $u$ ,  $\dot{u}$  et  $\cos\varphi$  dénommées premier ensemble de variables, et la deuxième relation de dépendance relie entre elles les variables  $v$ ,  $\dot{v}$  et  $\sin\varphi$   
20 dénommées deuxième ensemble de variables :

Préférentiellement les première et deuxième relations de dépendance sont telles qu'une variable d'un ensemble est égale à une combinaison linéaire des autres variables du même ensemble.

Préférentiellement on choisit  $\dot{u}$  comme variable de référence pour la première relation de dépendance et  $\dot{v}$  comme variable de référence dans la  
25 deuxième relation de dépendance.

Selon une variante la différence de phase entre les deux modes contra-propagatif est déterminée à partir d'un premier signal de battement et un deuxième signal de battement en quadrature avec le premier signal de  
30 battement.

Préférentiellement le cosinus et le sinus de la différence de phase sont déterminés comme suit :

$$\cos(\varphi) = \frac{y_c - I_1 - I_2}{2\sqrt{I_1 I_2}}$$

$$\sin(\varphi) = \frac{y_s - I_1 - I_2}{2\sqrt{I_1 I_2}}$$

- 5 avec :
- $I_1, I_2$  les intensités lumineuses des deux modes contra-propagatifs.
  - $y_c$  premier signal de battement
  - $y_s$  deuxième signal de battement en quadrature avec  $y_c$
- 10 Selon un mode de réalisation l'étape d'estimation comprend les sous étapes consistant à :
- initialiser les valeurs des coefficients
  - déterminer à partir des relations de dépendance les variables de référence estimées à partir des valeurs des coefficients et des valeurs mesurées des
- 15 variables autres que celles de référence,
- déterminer des écarts entre variables de référence estimées et variables de références mesurées,
  - à partir desdits écarts, estimer selon une méthode itérative des valeurs estimées des coefficients minimisant ledit écart,
- 20 Selon un mode de réalisation la méthode itérative est un moindre carré récursif.
- Avantageusement on reboucle à l'étape de mesure de manière à déterminer des valeurs estimées des coefficients de diffusion du gyrolaser en fonctionnement au fil du temps.
- 25 Avantageusement la méthode selon l'invention comprend en outre une étape de détermination d'une rotation angulaire du gyrolaser à partir des valeurs estimées des coefficients de diffusion.
- Selon un autre objet l'invention concerne également un système
- 30 gyroscopique comprenant :
- un gyrolaser comprenant une cavité présentant deux modes contra-propagatifs,

- 5 -des moyens de mesure configurés pour mesurer des valeurs grandeurs physiques caractéristiques du gyroscope en fonctionnement, comprenant une première et une deuxième intensité lumineuse correspondant respectivement au premier et à au deuxième mode contra-propagatif, et une
- 10 différence de phase ( $\varphi$ ) entre lesdits modes,
- un estimateur configuré pour déterminer des valeurs estimées de coefficients fonction de paramètres de la cavité du gyroscope, l'estimateur étant configuré pour :
- 15 \*déterminer un ensemble de variables dépendant de grandeurs physiques caractéristiques du gyrolaser, lesdites variables étant déterminées de sorte qu'elles soient reliées entre elles par au moins deux relations de dépendance modélisant le comportement du gyrolaser et utilisant une pluralité de coefficients, lesdits coefficients étant fonction de paramètres de la cavité laser comprenant lesdits coefficients de
- 20 diffusion, une variable de référence par relation de dépendance étant choisie parmi les variables,
- \*déterminer des valeurs mesurées des variables, déduites des valeurs mesurées des grandeurs physiques caractéristiques,
- \*estimer par une méthode itérative des valeurs estimées des coefficients minimisant un écart entre les valeurs mesurées des variables de
- 25 références, et des valeurs estimées des variables de référence à partir de valeurs des coefficients et des valeurs mesurées des variables autres que celles de référence,
- un module de calcul configuré pour déterminer des valeurs estimées des
- coefficients de diffusion à partir des valeurs estimées des coefficients.
- Avantageusement le module de calcul est en outre configuré pour déterminer une rotation angulaire du gyrolaser à partir des valeurs estimées des coefficients de diffusion.

30

D'autres caractéristiques, buts et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui va suivre et en regard des dessins annexés donnés à titre d'exemples non limitatifs et sur lesquels :

La figure 1 précitée illustre schématiquement un gyrolaser pour lequel on mesure les intensités respectives  $I_1$  et  $I_2$  des deux modes en sortie de cavité et les deux signaux de battement  $y_c$  et  $y_s$  en quadrature.

La figure 2 déjà citée illustre le principe de l'activation mécanique d'un gyrolaser.

La figure 3 déjà citée schématise une méthode de détermination classique de la rotation angulaire du gyroscope utilisant une valeur moyenne des coefficients de diffusion déterminée par précalibration.

La figure 4 décrit le principe de l'invention.

La figure 5 décrit les étapes de la méthode selon l'invention

La figure 6 décrit un mode de réalisation préféré de la méthode selon l'invention dans lequel dès que l'estimateur a convergé, on reboucle à l'étape de mesure.

La figure 7a décrit une chaîne de mesure avec un gyrolaser selon l'état de technique et la figure 7b illustre la capacité de la méthode selon l'invention à s'insérer dans la chaîne de la figure 7a sans effectuer de modification importante de celle-ci.

La figure 8 illustre un système gyroscopique selon l'invention.

20

## DESCRIPTION DETAILLÉE DE L'INVENTION

La figure 4 décrit de manière fonctionnelle le principe de la méthode selon l'invention. Un gyrolaser G comprend une cavité laser dans laquelle se propage les deux modes contra-propagatif. Les caractéristiques optiques de cette cavité, et plus particulièrement les coefficients de diffusion précités, ont tendance à évoluer lors du fonctionnement du gyrolaser. La valeur de ces coefficients  $(m, \xi)$ , étant nécessaire pour corriger la valeur de la phase mesurée et obtenir une mesure plus juste, il est intéressant de mesurer les valeurs de ces coefficients en temps réel.

On dénomme F une série de paramètres fonction de manière connue des caractéristiques de la cavité laser du gyrolaser G incluant les coefficients de diffusion. On mesure ces grandeurs physiques caractéristiques  $I_1$ ,  $I_2$  et la différence de phase  $\varphi$  du gyrolaser en fonctionnement pendant un laps de temps court (typiquement inférieur à quelques secondes) mais permettant de

35

mesurer également la valeur des dérivées des intensités I1 et I2 par rapport au temps.

La méthode utilise un estimateur E reproduisant le comportement du gyrolaser. On effectue une transformation des grandeurs physiques I1,I2 et  $\varphi$  en un ensemble de variables fonction de ces trois grandeurs. A partir de la mesure de I1,I2 et  $\varphi$ , on en déduit des valeurs des variables, que nous

5 dénommerons variables mesurées. Ces variables mesurées sont en fait directement issues des mesures effectuées sur le gyro via un calcul.

Par ailleurs, les inventeurs ont choisi les variables d'une manière particulière qui sera explicitée plus loin, de manière à ce qu'elles soient reliées entre elles par des relations de dépendance issue de l'adaptation d'un modèle

10 mathématique décrivant le comportement du gyrolaser.

Ces relations de dépendances font intervenir les paramètres F définis ci-dessus, et il est ainsi possible de calculer une valeur estimée d'une variable dite de référence, déterminée à partir des variables mesurées (issues de la mesure des grandeurs physique) des autres variables desquelles elle

15 dépend et de valeur définies des paramètres F.

On peut alors comparer, pour les variables de référence, valeur mesurée et valeur estimée.

20 Une méthode itérative (indice i) utilisant un estimateur E réalise une optimisation sur les paramètres  $F_i$ , et détermine les paramètres estimés  $\hat{F}$  qui minimise l'écart entre valeur mesurée et estimée.

Les paramètres F dépendant des coefficients de diffusion de manière connue, à partir de la valeur estimée des paramètres on remonte aux valeurs des coefficients de diffusion via un calcul simple

25 40.

On voit qu'avec cette méthode, si l'estimateur converge suffisamment rapidement, on peut avoir une estimation temps réel des coefficients de diffusion à partir de mesures classiques effectuées sur le gyrolaser en fonctionnement.

30 La figure 5 décrit les étapes de la méthode 50 itérative de détermination des coefficients de diffusion  $(m, \xi)$  d'un gyrolaser G en fonctionnement selon l'invention.

Après de nombreux calculs et réflexion , les inventeurs ont trouvés un ensemble de variables déduites des grandeurs physiques caractéristiques et

35

permettant de mettre en oeuvre une méthode itérative d'estimation dont le principe fonctionnel est décrit figure 4.

Une première étape 510 de la méthode consiste donc à déterminer un ensemble de variables dépendant de grandeurs physiques caractéristiques du gyrolaser G. Les grandeurs physiques utilisées sont les grandeurs connues mesurées classiquement décrites dans l'état de la technique, soit les intensités lumineuses  $I_1$  et  $I_2$  correspondant respectivement au premier et à au deuxième mode contra-propagatif et la différence de phase  $\varphi$  entre ces deux modes.

10 Selon un mode préféré non limitatif, l'ensemble des variables comprend 5 variables définies comme suit :

$$u = \frac{1}{2}(I_1 + I_2) \quad (10)$$

$$v = \frac{1}{2}(I_1 - I_2) \quad (11)$$

$$\dot{u} = \frac{du}{dt}$$

$$\dot{v} = \frac{dv}{dt}$$

$$\cos\varphi$$

15  $\sin\varphi$

Les variables sont définies à partir de la connaissance d'une modélisation du comportement du gyrolaser, de sorte qu'elles soient reliées entre elles par au moins deux relations de dépendance, une première relation que nous 20 dénommerons R1 et une deuxième relation que nous dénommerons R2, ces relations étant déduites du modèle de comportement du gyrolaser. Ces deux équations établissent une relation entre les variables en utilisant une pluralité de coefficients F, ces coefficients étant fonction de paramètres de la cavité laser comprenant les coefficients de diffusion.

25

Dans l'exemple précité, la modélisation du comportement du gyrolaser est réalisée à partir des équations différentielles de Lamb (sans linéarisation du gain) décrites dans l'état de la technique (équations (7)):

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{g_0}{1 + \frac{I_1}{I_s} + \frac{I_2}{I_c}} I_1 - \Gamma I_1 + 2m\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi + \xi)$$

30

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{g_0}{1 + \frac{I_2}{I_s} + \frac{I_1}{I_c}} I_2 - \Gamma I_2 + 2m\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi - \xi)$$

Avec

$I_1, I_2$  intensité des deux modes contrapropagatifs,

$\varphi$  différence effective de phase entre les deux modes

$m$  amplitude et  $\xi$  phase de la rétrodiffusion des miroirs dans la cavité,

5  $\Gamma$  perte et  $g_0$  gain de la cavité du gyrolaser, avec  $g_0 > \Gamma$

$I_c$  intensité de saturation croisée et  $I_s$  intensité d'autosaturation de la cavité avec  $I_c \gg I_s$

L'évolution des variables  $(u, v)$  de l'invention selon l'exemple est modélisée  
10 par les équations suivantes déduites des équations de Lamb :

$$\dot{u} = 2m\bar{I}\cos(\xi)\cos(\varphi) - \alpha u + \alpha\bar{I} \quad \text{correspondant à R1}(u, \dot{u}, \cos\varphi), \quad (12)$$

$$\dot{v} = -2m\bar{I}\sin(\xi)\sin(\varphi) - \alpha \frac{I_c - I_s}{I_c + I_s} v \quad \text{correspondant à R2}(v, \dot{v}, \sin\varphi) \quad (13)$$

15

Avec :

$$\bar{I} = \frac{I_c I_s}{I_c + I_s} \left( \frac{g_0}{\Gamma} - 1 \right)$$

$$\alpha = \frac{\Gamma}{g_0} (g_0 - \Gamma) e$$

20

Ces constantes  $\alpha$  et  $\bar{I}$  peuvent être déterminées de manière séparées et sont considérées comme des constantes connues.

On obtient ainsi deux relations de dépendance, une première relation R1 qui  
25 relie les variables  $u, \dot{u}$  et  $\cos\varphi$  entre elles, dénommées premier ensemble de variable, et une deuxième relation R2 qui relie les variables  $v, \dot{v}$  et  $\sin\varphi$  entre elles, dénommées deuxième ensemble de variables :

Parmi l'ensemble de variable, on choisi une variable de référence par relation  
30 de dépendance, ces variables de référence étant celles qui vont être utilisées pour le calcul récursif d'optimisation.

On choisi à titre illustratif  $\hat{u}$  comme variable de référence pour la première relation de dépendance et  $\hat{v}$  comme variable de référence dans la deuxième relation de dépendance. Mais selon un autre exemple on peut prendre  $(u,v)$  ou  $(\cos\varphi, \sin\varphi)$ , comme variable de référence. L'estimateur s'applique de la même manière.

Nous avons présenté le cadre mathématique utilisé par la méthode selon l'invention, qui a été mis au point par les inventeurs. Un choix particulier de variables permet via une transformation des équations de Lamb d'utiliser de manière originale un estimateur pour remonter à des paramètres du gyrolaser reliés directement aux coefficients de diffusion.

Une étape 520 mesure les valeurs des grandeurs physiques caractéristiques du gyrolaser en fonctionnement  $I_1, I_2, \varphi$ , par des moyens classiques, pendant un laps de temps suffisant pour pouvoir déterminer la dérivée par rapport au temps de  $I_1$  et  $I_2$ . Par exemple, on filtre la dérivée, et donc typiquement quelque micro secondes sont nécessaires (la bande passante du filtre est à 150 KHz).

Par exemple la phase  $\varphi$  est déterminée à partir de la mesure des intensités et des signaux de battement  $y_c$  et  $y_s$  définis précédemment :

20

$$\cos(\varphi) = \frac{y_c - I_1 - I_2}{2\sqrt{I_1 I_2}} \quad (14)$$

$$\sin(\varphi) = \frac{y_s - I_1 - I_2}{2\sqrt{I_1 I_2}} \quad (15)$$

25 Dans ce cas , les grandeurs physiques mesurées à l'étape 520 sont  $I_1, I_2, y_c$  et  $y_s$ .

Mais d'autres moyens de mesure de la phase  $\varphi$  peuvent être utilisés.

30 Ensuite dans une étape 530 on détermine des valeurs mesurées des variables déduites des valeurs mesurées des grandeurs physiques caractéristiques.

A partir de  $I_1, I_2$  et  $\varphi$  mesurées sur le gyrolaser en fonctionnement, on déduit :

- les valeurs de  $u$  et  $v$  à partir des relations (12) et (13),

## 16

- les valeurs de  $\dot{u}$  et  $\dot{v}$  à partir de la mesure de  $I_1(t)$  et  $I_2(t)$  sur un temps suffisant pour mesurer les dérivées  $\dot{I}_1$  et  $\dot{I}_2$  et,
- les valeurs de  $\cos\varphi$  et  $\sin\varphi$  à partir de la mesure de la phase  $\varphi$ . Lorsque l'on mesure les battements  $y_s$  et  $y_c$ ,  $\cos\varphi$  et  $\sin\varphi$  sont déduits des formules (14) et (15).

Pour ne pas alourdir les formules mathématiques, les valeurs des variables déduites des valeurs des grandeurs physiques mesurées ne présentent pas d'indice particulier. Elles sont nommées valeurs mesurées, afin de les différencier des valeurs estimées décrites ci-dessous.

10

L'étape suivante 540 estime, par une méthode itérative, des valeurs estimées des coefficients  $\hat{F}$  minimisant un écart entre les valeurs mesurées  $\dot{u}$ ,  $\dot{v}$  des variables de références d'une part, et des valeurs estimées  $\hat{u}$ ,  $\hat{v}$  des variables de référence, cette estimation étant réalisée à partir des valeurs des coefficients  $F_i$ , indice  $i$  décrivant une itération de la méthode, et des valeurs mesurées des variables  $u$ ,  $\cos\varphi$ ,  $v$ ,  $\sin\varphi$  autres que celles de référence.

En reprenant notre exemple, les valeurs de  $\hat{u}$ ,  $\hat{v}$  sont obtenues à partir des équations (12) et (13)° que l'on réécrit sous la forme :

$$\hat{u} = k_1 \cdot \cos(\varphi) + k_2 \cdot u + k_3 \cdot 1 \quad \text{R1} \quad (16)$$

$$\hat{v} = k_4 \cdot \sin(\varphi) + k_5 \cdot v \quad \text{R2} \quad (17)$$

La pluralité de coefficients dénommé F comprend 5 coefficients :

25  $F(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5)$  :

Avec :

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= 2m\bar{I}\cos(\xi) \\ k_2 &= -\alpha \\ k_3 &= \alpha\bar{I} \\ k_4 &= -2m\bar{I}\sin(\xi) \\ k_5 &= -\alpha \frac{I_c - I_s}{I_c + I_s} \end{aligned} \right\} (18)$$

30

On voit que sur l'exemple les relations de dépendance sont telles qu'une variable d'un ensemble, ici  $\hat{u}$  ou  $\hat{v}$  est égale à une combinaison linéaire des autres variables du même ensemble.

5 Cette propriété permet d'utiliser plusieurs types d'estimateurs qui vont converger rapidement.

Typiquement, l'étape d'estimation comprend une sous étape d'initialisation de la valeur de F. On peut initialiser avec n'importe quelle valeur de F (des coefficients k dans l'exemple), l'estimateur convergera naturellement vers les  
10 valeurs optimales.

Puis à chaque itération i,  $\hat{u}$  est déterminé à partir de u,  $\cos\phi$  mesurées et des valeurs  $k_1(i)$ ,  $k_2(i)$ ,  $k_3(i)$  selon la relation de dépendance R1 (équation (16)) et  $\hat{v}$  est déterminé à partir de v,  $\sin\phi$  mesurées et des valeurs  $k_4(i)$ ,  
15  $k_5(i)$  selon la relation de dépendance R2 (équation (17)).

On calcule ensuite les écarts  $e1 = \hat{u} - u$  et  $e2 = \hat{v} - v$ .

La méthode itérative utilise un estimateur qui va rechercher les valeurs estimées de  $\hat{F}$  soit les valeurs estimées  $\hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4, \hat{k}_5$  des coefficients qui minimise ces deux écarts ( $\hat{u} - u$ ) et ( $\hat{v} - v$ ). Nous décrirons plus loin un  
20 exemple de mise en œuvre de l'estimateur selon l'invention.

Ainsi une valeur estimée d'une variable de référence est comparée à chaque itération avec une valeur mesurée de cette même variable de référence qui est issue directement des grandeurs physiques mesurées du gyrolaser. Les  
25 coefficients F sont modifiés à chaque itération tant que le résultat de la comparaison n'est pas nul ou n'est pas minimum.

Une fois les valeurs estimées des coefficients  $\hat{F}$  déterminées, on détermine dans une étape 550 des valeurs estimées des coefficients de diffusion  $\hat{m}, \hat{\xi}$   
30 à partir des valeurs estimées  $\hat{F}$  des coefficients.

Avec notre exemple on remonte à  $\hat{m}, \hat{\xi}$  à l'aide des formules déduites des formules (18) :

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= -\hat{k}_2 \\ \bar{l} &= \frac{k_3}{\alpha} \\ m &= \frac{1}{2\bar{l}} \text{abs}(\hat{k}_1 + i \cdot \hat{k}_4) \\ \varphi &= \text{arg}(\hat{k}_1 + i \cdot \hat{k}_4) \end{aligned} \right\} (19)$$

- 5 La méthode 50 selon l'invention permet donc de calculer à l'aide d'une méthode itérative temps réel les valeurs « instantanées » des coefficients de diffusion. Cette technique présente l'avantage d'être rapide et fiable, et peut s'adapter sur des gyrolaser actuels, pour lesquels on effectue déjà les mesures de I1, I2 et  $\varphi$ .
- 10 Selon un mode de réalisation préféré illustré figure 6, dès que l'estimateur a convergé, on reboucle à l'étape de mesure 520 de manière à déterminer des valeurs estimées des coefficients de diffusion du gyrolaser G en fonctionnement au fil du temps. On peut ainsi suivre en temps réel la valeur
- 15 instantanée de l'amplitude et de la phase de la rétrodiffusion, soit de la qualité des miroirs, ce qui permet de simplifier la procédure de caractérisation des gyroscopes ainsi que l'étape d'alignement des miroirs. Selon un autre mode de réalisation, la méthode 50 est effectuée ponctuellement, à intervalles réguliers ou non dans le temps.
- 20 Selon un mode de réalisation préféré également illustré figure 6, la méthode 50 selon l'invention comprend en outre une étape 560 de détermination d'une rotation angulaire  $\Delta\Theta$  du gyrolaser G à partir des valeurs estimées des coefficients de diffusion  $\hat{m}$ ,  $\hat{\xi}$ , cette détermination s'effectuant de manière
- 25 classique comme décrit dans l'état de la technique. La mesure de la rotation est alors obtenue à partir d'une phase corrigée à l'aide des coefficients de diffusion estimés déterminés aux étapes 520 à 550 au moment où l'information de rotation est souhaitée, les paramètres de diffusion correspondant à l'état actuel du gyrolaser.
- 30 Le caractère « temps réel » de la mesure de  $\Delta\Theta$  est obtenu lorsque l'estimateur converge suffisamment rapidement vers une solution unique de coefficients.

Un avantage de la méthode selon l'invention est qu'elle peut être implémentée sur un système existant. La figure 7a illustre la chaîne de mesure selon l'état de la technique. A partir de mesures classiques effectuées sur le gyrolaser, comme explicité dans l'état de la technique, on remonte à la mesure de la rotation angulaire  $\Delta\theta$ . La figure 7b illustre schématiquement l'implémentation de la méthode selon l'invention dans la chaîne classique. Les coefficients de diffusion estimés servent à corriger la phase, qui est ensuite traitée classiquement pour remonter à la rotation angulaire.

10

En résumé, la méthode 50 selon l'invention consiste à dupliquer le système composé du gyrolaser en fonctionnement à partir d'équations différentielles reformulées, et les différents paramètres de ce duplicata, dénommé estimateur, sont accessibles via la mesure. On applique à l'estimateur la même entrée que subit le système, c'est-à-dire une pluralité de paramètres reliés aux caractéristiques optiques de la cavité, et on compare les sorties des deux systèmes. Tant qu'elles ne sont pas identiques, on modifie en temps réel les paramètres (les coefficients F) de l'estimateur. Lorsque les deux sorties sont identiques, il suffit de lire les paramètres de l'estimateur afin de remonter à ceux du système physique, soit le gyrolaser en fonctionnement.

20

Tout l'art de l'estimateur consiste à trouver la façon avec laquelle on modifie en temps réel les paramètres de l'estimateur (les coefficients F) afin qu'ils correspondent à ceux du système physique.

25

Le comportement dynamique de l'estimateur peut être comparé à celui d'un système physique possédant un seul point d'équilibre stable, un pendule par exemple. Ce point d'équilibre correspond au jeu de coefficients inconnus du gyroscope.

30

N'ayant aucune connaissance a priori de ce jeu de paramètres, on initialise l'estimateur à 0, mais n'importe quelle valeur d'initialisation convient. Tel un pendule l'estimateur converge vers sa position d'équilibre.

35

L'intérêt d'utiliser un estimateur dans la méthode selon invention est que l'estimateur suivra son point d'équilibre même si celui-ci change, permettant ainsi de suivre en temps réel l'évolution des paramètres du gyroscope même s'ils ne sont pas constants.

Nous allons à présent décrire plus précisément le fonctionnement de l'estimateur.

La théorie de l'estimation introduit le concept d'observabilité, qui consiste à  
 5 s'assurer que le jeu de paramètres trouvé est unique et donc correspond bien au système physique. On démontre que le jeu de paramètres est unique pour un gyrolaser soumis à une activation mécanique, donc préférentiellement pour l'implémentation de la méthode selon l'invention sur le gyrolaser en fonctionnement, on soumettra celui-ci à une activation  
 10 mécanique.

L'équation d'évolution des variables  $(u, v)$  définies précédemment peut être réécrite:

$$\dot{u} = F_1^T M_1$$

$$\dot{v} = F_2^T M_2$$

Avec :

$$F_1 = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix}$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \\ u \\ 1 \end{pmatrix}$$

15 et

$$F_2 = \begin{pmatrix} k_4 \\ k_5 \end{pmatrix}$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} \sin(\varphi) \\ v \end{pmatrix}$$

On cherche donc à estimer les constantes  $(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5)$ .

On choisit  $(\dot{u}, \dot{v})$  comme "variables de références" dans l'ensemble des variables correspondant à des mesures transformées  
 20  $\{u, \dot{u}, v, \dot{v}, \cos(\varphi), \sin(\varphi), 1\}$  et on pose:

$$\widehat{F}_1 = \begin{pmatrix} \widehat{k}_1 \\ \widehat{k}_2 \\ \widehat{k}_3 \end{pmatrix}$$

$$\widehat{F}_2 = \begin{pmatrix} \widehat{k}_4 \\ \widehat{k}_5 \end{pmatrix}$$

A titre d'exemple nous allons décrire le fonctionnement de l'estimateur moindré carré récursif, mais la méthode selon l'invention peut fonctionner avec d'autres types d'estimateurs, tels l'estimateur de Kalman, ou

- 5 l'estimateur utilisant une fonction de Lyapunov...
- La vitesse de convergence de l'estimateur est un paramètre de réglage. Dans la pratique les estimateurs diffèrent par leur robustesse (ie leur sensibilité au bruit), sachant que la vitesse de convergence est surtout réglée par rapport au bruit (plus l'estimateur est rapide plus il est sensible au bruit).
- 10 Donc au cas par cas, on choisit un estimateur plutôt qu'un autre en fonction de la qualité des mesures (bruitées ou pas) et de la sensibilité de l'estimateur à une éventuelle distorsion des signaux.

L'estimateur moindré carré récursif est donné par les équations suivantes

15 (sans filtrage pour simplifier):

L'erreur entre la valeur mesurée de la variable de référence mesure de référence et sa valeur estimée est donnée par :

$$e_1 = \dot{u} - \widehat{F}_1^T M_1 = \dot{u} - \hat{u}$$

$$e_2 = \dot{v} - \widehat{F}_2^T M_2 = \dot{v} - \hat{v}$$

20 La mise à jour de l'estimation des paramètres :

$$\frac{d\widehat{F}_1}{dt} = P_1 \cdot M_1 \cdot e_1$$

$$\frac{d\widehat{F}_2}{dt} = P_2 \cdot M_2 \cdot e_2$$

On a  $\frac{d\widehat{F}_1}{dt} = \frac{d\widehat{F}_2}{dt} = 0$  si  $e_1 = e_2 = 0$

La variation de l'estimation des paramètres  $(\frac{d\widehat{F}_1}{dt}, \frac{d\widehat{F}_2}{dt})$  est proportionnelle à l'erreur  $(e_1, e_2)$ . Si l'erreur est nulle l'estimation ne varie plus.

25 Les matrices  $(P_1, P_2)$  sont des intermédiaires de calculs (proches des matrices de covariances des mesures  $M_1, M_2$ ).

On a :

$$\frac{dP_1}{dt} = K_1 \cdot P_1 - P_1 \cdot (M_1 \cdot M_1^T) \cdot P_1$$

$$\frac{dP_2}{dt} = K_2 \cdot P_2 - P_2 \cdot (M_2 \cdot M_2^T) \cdot P_2$$

Ces équations sont issues de la minimisation du critère de moindre carré:

$$V(M) = \int_0^t e^{-\alpha(t-\tau)} (y_{ref} - M^T F)^2 d\tau$$

Les matrices de covariances des deux équations sont :

$$R_1(t) = P_1^{-1}(t) = \int_0^t e^{-\alpha(t-\tau)} M_1 \cdot M_1^T d\tau$$

$$R_2(t) = P_2^{-1}(t) = \int_0^t e^{-\alpha(t-\tau)} M_2 \cdot M_2^T d\tau$$

Où  $(K_1, K_2)$  sont des constantes qui déterminent la dynamique de  
5 l'estimateur.

L'estimateur reboucle via le calcul de l'erreur. A chaque itération la prochaine mise à jour des coefficients est proportionnelle à l'erreur actuelle.

La vitesse de convergence est donnée par le coefficient  $K$  ( $K_1, K_2$ ) de  
10 l'estimateur, et est déterminée en fonction du bruit sur les mesures et de la bande passante désirée. Plus l'estimateur est rapide (ie, plus sa bande passante est grande) plus il est sensible au bruit.

Selon un autre aspect, l'invention concerne un système gyroscopique 70 tel qu'illustré figure 8 qui comprend un gyrolaser G comprenant une cavité  
15 présentant deux modes contra-propagatifs, et des moyens de mesure 71 configurés pour mesurer des valeurs grandeurs physiques caractéristiques du gyroscope en fonctionnement. Ces grandeurs physiques comprennent une première intensité lumineuse I1 et une deuxième intensité lumineuse I2 correspondant respectivement au premier et au deuxième mode contra-  
20 propagatif, et la différence de phase  $\varphi$  entre les modes. Ces moyens de mesure sont classiquement par exemple des photo-détecteurs pour les intensités, et un interféromètre pour les signaux de battement qui permettent de remonter à la phase  $\varphi$ .

25 Le système gyroscopique 70 comprend en outre un estimateur E configuré pour déterminer des valeurs estimées de coefficients fonction de paramètres de la cavité du gyroscope, l'estimateur étant configuré pour :

\*déterminer un ensemble de variables, par exemple  $u, \dot{u}, v, \dot{v}, \cos\varphi, \sin\varphi$ , dépendant de grandeurs physiques caractéristiques du gyrolaser G, les variables étant déterminées de sorte qu'elles soient reliées entre elles par au moins deux relations de dépendance, une première relation R1, par exemple  
 5 entre  $(u, \dot{u}, \cos\varphi)$ , et une deuxième relation R2, par exemple entre  $(v, \dot{v}, \sin\varphi)$ , modélisant le comportement du gyrolaser et utilisant une pluralité de coefficients F, les coefficients étant fonction de paramètres de la cavité laser comprenant les coefficients de diffusion, une variable de référence par relation de dépendance étant choisie parmi les variables, par exemple  $\dot{u}$  pour  
 10 R1 et  $\dot{v}$  pour R2,

\*déterminer des valeurs mesurées des variables, déduites des valeurs mesurées des grandeurs physiques caractéristiques,

\*estimer par une méthode itérative des valeurs estimées des coefficients  $\hat{F}$  minimisant un écart entre les valeurs mesurées  $(\dot{u}, \dot{v})$  des variables de  
 15 références, et des valeurs estimées  $(\hat{u}, \hat{v})$  des variables de référence à partir de valeurs des coefficients et des valeurs mesurées des variables autres que celles de référence, par exemple  $u, \cos\varphi, v, \sin\varphi$  lorsque  $\dot{u}$  et  $\dot{v}$  sont choisies comme variable de référence,

Enfin le système 70 comprend un module de calcul 40 configuré pour  
 20 déterminer des valeurs estimées des coefficients de diffusion  $\hat{m}, \hat{\xi}$  à partir des valeurs estimées  $\hat{F}$  des coefficients.

Avantageusement, le système gyroscopique 70 selon est en outre configuré pour déterminer une rotation angulaire  $\Delta\Theta$  du gyrolaser G à partir des  
 25 valeurs estimées des coefficients de diffusion  $\hat{m}$  et  $\hat{\xi}$ .

La méthode selon l'invention et le système gyroscopique associé s'appliquent à tout type de gyrolaser, tels des gyrolaser à gaz ou à état solide.

## REVENDEICATIONS

1. Méthode (50) itérative de détermination des coefficients de diffusion ( $m, \xi$ ) de la cavité d'un gyrolaser (G) en fonctionnement présentant deux modes contra-propagatifs, comprenant les étapes consistant à :
- 5 -déterminer (510) un ensemble de variables ( $u, \dot{u}, v, \dot{v}, \cos\varphi, \sin\varphi$ ) dépendant de grandeurs physiques caractéristiques du gyrolaser (G),  
 les grandeurs physiques caractéristiques comprenant une première (I1) et une deuxième (I2) intensité lumineuse correspondant respectivement au premier et à au deuxième mode contra-progatif, et une différence de  
 10 phase ( $\varphi$ ) entre lesdits modes,  
 lesdites variables étant déterminées de sorte qu'elles soient reliées entre elles par au moins deux relations de dépendance ( $R1(u, \dot{u}, \cos\varphi)$ ,  $R2(v, \dot{v}, \sin\varphi)$ ) modélisant le comportement du gyrolaser et utilisant une pluralité de coefficients (F), lesdits coefficients étant fonction de paramètres  
 15 de la cavité laser comprenant lesdits coefficients de diffusion,  
 une variable de référence ( $\dot{u}, \dot{v}$ ) par relation de dépendance étant choisie parmi les variables,  
 -mesurer (520) des valeurs des grandeurs physiques caractéristiques du gyrolaser en fonctionnement (I1, I2,  $\varphi$ ),  
 20 -déterminer (530) des valeurs mesurées des variables, déduites des valeurs mesurées des grandeurs physiques caractéristiques,  
 -estimer (540) par une méthode itérative des valeurs estimées des coefficients ( $\hat{F}$ ) minimisant un écart entre les valeurs mesurées ( $\dot{u}, \dot{v}$ ) des variables de références, et des valeurs estimées ( $\hat{u}, \hat{v}$ ) des variables de  
 25 référence à partir de valeurs des coefficients et des valeurs mesurées des variables ( $u, \cos\varphi, v, \sin\varphi$ ) autres que celles de référence,  
 -déterminer (550) des valeurs estimées des coefficients de diffusion ( $\hat{m}, \hat{\xi}$ ) à partir des valeurs estimées ( $\hat{F}$ ) des coefficients.
- 30 2. Méthode (50) selon la revendication 1 dans laquelle l'étape de détermination d'un ensemble de variable comprend la détermination d'une première (R1) et une deuxième (R2) relation de dépendance entre les

variables ( $u, \dot{u}, v, \dot{v}, \cos\varphi, \sin\varphi$ ) à partir des équations différentielles de Lamb.

3. Méthode (50) selon l'une des revendications précédentes dans laquelle l'étape de détermination d'un ensemble de variables définit les variables suivantes :

$$u = \frac{1}{2}(I_1 + I_2)$$

$$v = \frac{1}{2}(I_1 - I_2)$$

$$\dot{u} = \frac{du}{dt}$$

$$\dot{v} = \frac{dv}{dt}$$

$\cos\varphi$

$\sin\varphi$

avec :

- 10  $I_1, I_2$  les intensités lumineuses des deux modes contra-propagatifs.

$\cos\varphi$  et  $\sin\varphi$  respectivement cosinus et sinus de la différence de phase entre les deux modes.

4. Méthode (50) selon la revendication 3 dans laquelle la première relation de dépendance R1( $u, \dot{u}, \cos\varphi$ ) relie entre elles les variables  $u, \dot{u}$  et  $\cos\varphi$  dénommées premier ensemble de variables, et la deuxième relation de dépendance R2( $v, \dot{v}, \sin\varphi$ ) relie entre elles les variables  $v, \dot{v}$  et  $\sin\varphi$  dénommées deuxième ensemble de variables :

- 20 5. Méthode (50) selon la revendication 4 dans laquelle les première (R1) et deuxième (R2) relations de dépendance sont telles qu'une variable d'un ensemble est égale à une combinaison linéaire des autres variables du même ensemble.

- 25 6. Méthode (50) selon l'une des revendications 3 à 5 dans laquelle on choisit  $\dot{u}$  comme variable de référence pour la première relation de dépendance et  $\dot{v}$  comme variable de référence dans la deuxième relation de dépendance.

- 30 7. Méthode (50) selon l'une des revendications précédentes dans laquelle la différence de phase ( $\varphi$ ) entre les deux modes contra-propagatif est

déterminée à partir d'un premier signal de battement ( $y_c$ ) et un deuxième signal de battement ( $y_s$ ) en quadrature avec le premier signal de battement.

8. Méthode (50) selon la revendication 7 dans laquelle le cosinus et le sinus de la différence de phase ( $\varphi$ ) sont déterminés comme suit :

$$\cos(\varphi) = \frac{y_c - I_1 - I_2}{2\sqrt{I_1 I_2}}$$

$$\sin(\varphi) = \frac{y_s - I_1 - I_2}{2\sqrt{I_1 I_2}}$$

avec :

$I_1, I_2$  les intensités lumineuses des deux modes contra-propagatifs.

10  $y_c$  premier signal de battement

$y_s$  deuxième signal de battement en quadrature avec  $y_c$

9. Méthode (50) selon l'une des revendications précédentes dans laquelle l'étape d'estimation (440) comprend les sous étapes consistant à :

15 -initialiser les valeurs des coefficients

-déterminer à partir des relations de dépendance (R1, R2) les variables de référence estimées ( $\hat{u}, \hat{v}$ ) à partir des valeurs des coefficients et des valeurs mesurées des variables autres que celles de référence,

20 -déterminer des écarts ( $\hat{u} - u$ ), ( $\hat{v} - v$ ) entre variables de référence estimées et variables de références mesurées,

-à partir desdits écarts ( $\hat{u} - u$ ), ( $\hat{v} - v$ ), estimer selon une méthode itérative des valeurs estimées des coefficients ( $\hat{F}$ ) minimisant ledit écart,

25 10. Méthode (50) selon l'une des revendications précédentes dans laquelle la méthode itérative est un moindre carré récursif.

30 11. Méthode (50) selon l'une des revendications précédentes dans laquelle on reboucle à l'étape de mesure (420) de manière à déterminer des valeurs estimées des coefficients de diffusion du gyrolaser (G) en fonctionnement au fil du temps.

12. Méthode (50) selon l'une des revendications précédentes comprenant en outre une étape de détermination d'une rotation angulaire ( $\Delta\Theta$ ) du gyrolaser (G) à partir des valeurs estimées des coefficients de diffusion ( $\hat{m}$ ,  $\hat{\xi}$ ).

5 13. Système gyroscopique comprenant :

-un gyrolaser (G) comprenant une cavité présentant deux modes contra-propagatifs,

-des moyens de mesure (71) configurés pour mesurer des valeurs grandeurs physiques caractéristiques du gyroscope en fonctionnement, comprenant  
10 une première (I1) et une deuxième (I2) intensité lumineuse correspondant respectivement au premier et à au deuxième mode contraprogatif, et une différence de phase ( $\varphi$ ) entre lesdits modes,

-un estimateur (E) configuré pour déterminer des valeurs estimées de coefficients fonction de paramètres de la cavité du gyroscope, l'estimateur  
15 étant configuré pour :

\*déterminer un ensemble de variables ( $u, \dot{u}, v, \dot{v}, \cos\varphi, \sin\varphi$ ) dépendant de grandeurs physiques caractéristiques du gyrolaser (G), lesdites variables étant déterminées de sorte qu'elles soient reliées entre elles par au moins deux relations de dépendance ( $R1(u, \dot{u}, \cos\varphi), R2(v, \dot{v}, \sin\varphi)$ ) modélisant le comportement du gyrolaser et utilisant une pluralité de coefficients (F), lesdits coefficients étant fonction de paramètres de la cavité laser comprenant lesdits coefficients de diffusion, une variable de référence ( $\dot{u}, \dot{v}$ ) par relation de dépendance étant choisie parmi les variables,  
20

\*déterminer des valeurs mesurées des variables, déduites des valeurs mesurées des grandeurs physiques caractéristiques,

\*estimer par une méthode itérative des valeurs estimées des coefficients ( $\hat{F}$ ) minimisant un écart entre les valeurs mesurées ( $\dot{u}, \dot{v}$ ) des variables de références, et des valeurs estimées ( $\hat{\dot{u}}, \hat{\dot{v}}$ ) des variables de référence  
30 à partir de valeurs des coefficients et des valeurs mesurées des variables ( $u, \cos\varphi, v, \sin\varphi$ ) autres que celles de référence,

-un module de calcul (40) configuré pour déterminer des valeurs estimées des coefficients de diffusion ( $\hat{m}, \hat{\xi}$ ) à partir des valeurs estimées ( $\hat{F}$ ) des coefficients.

35

14. Système gyroscopique selon la revendication 13 dans lequel le module de calcul est en outre configuré pour déterminer une rotation angulaire ( $\Delta\Theta$ ) du gyrolaser (G) à partir des valeurs estimées des coefficients de diffusion ( $\hat{m}$ ,  $\hat{\xi}$ ).

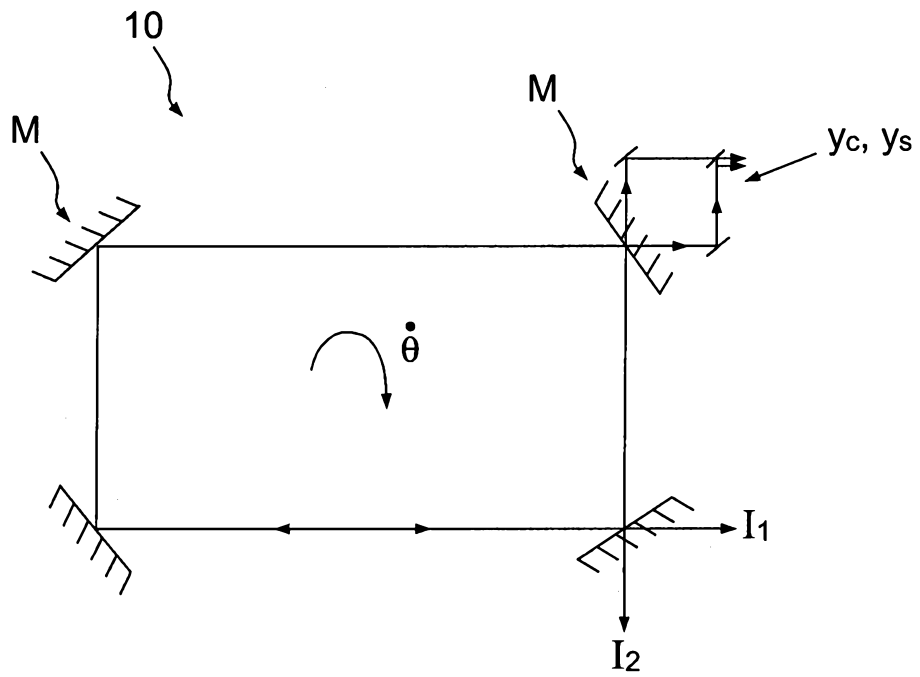


FIG.1

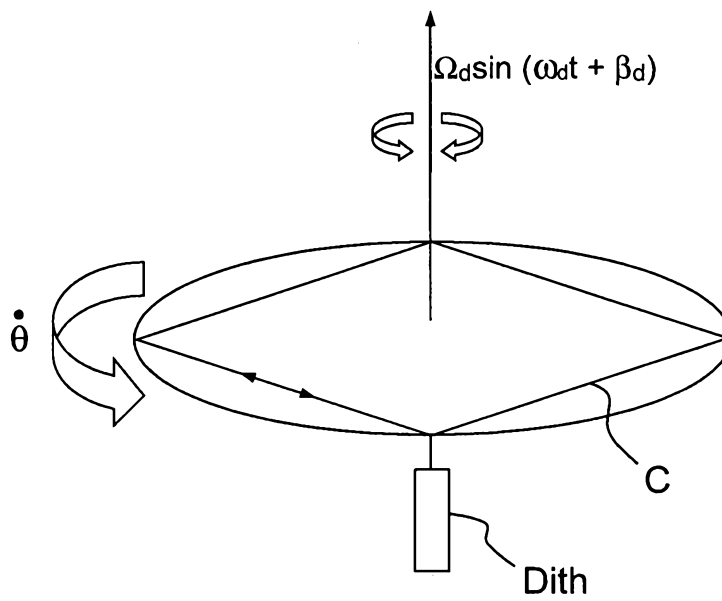


FIG.2

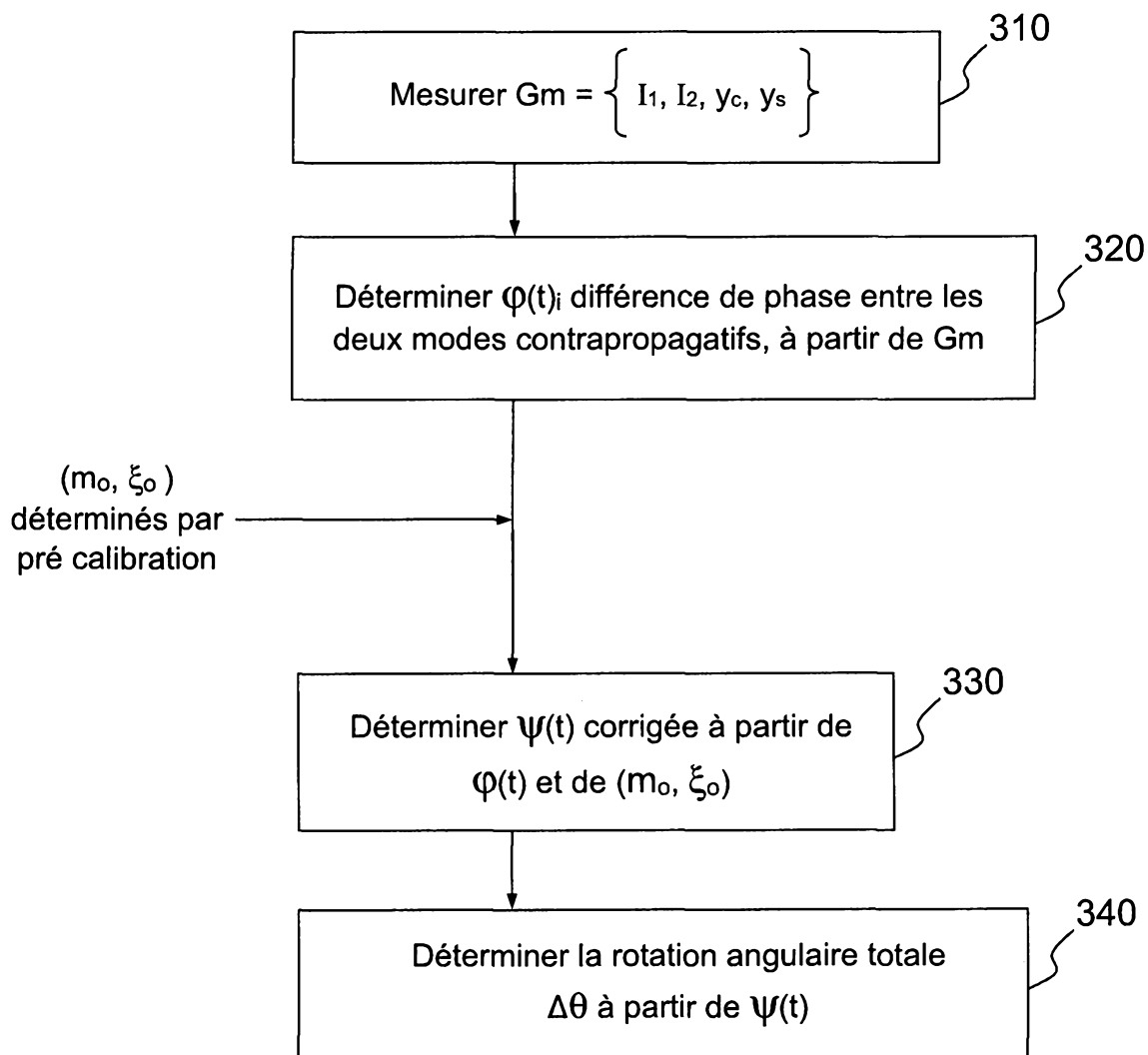


FIG.3

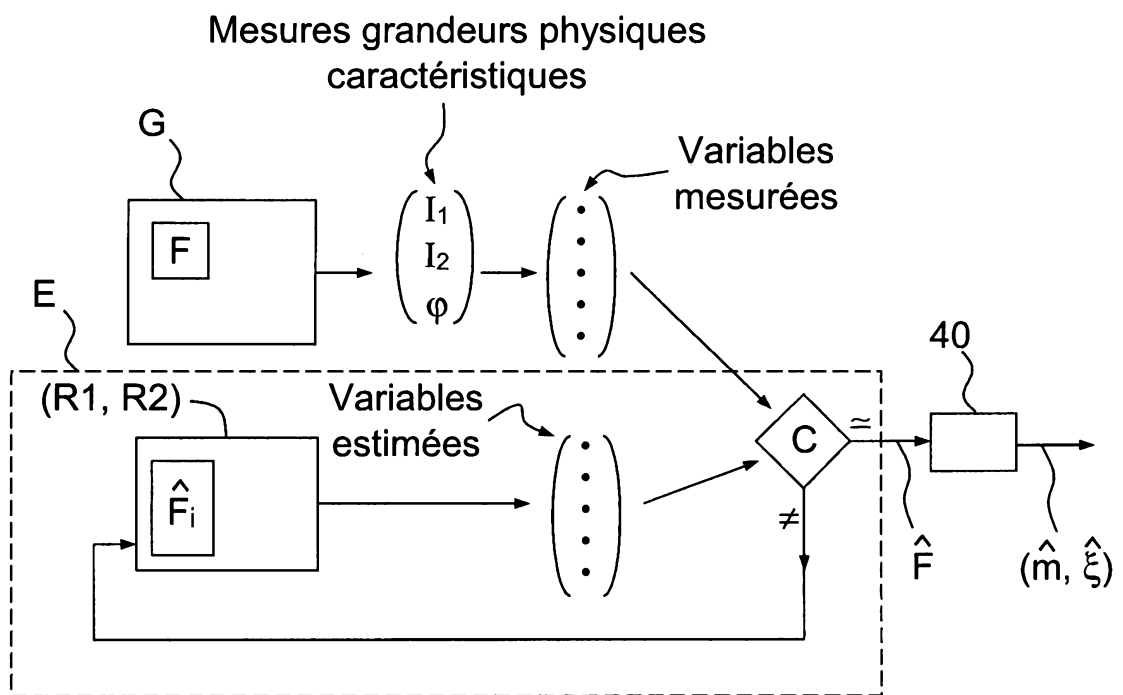


FIG.4

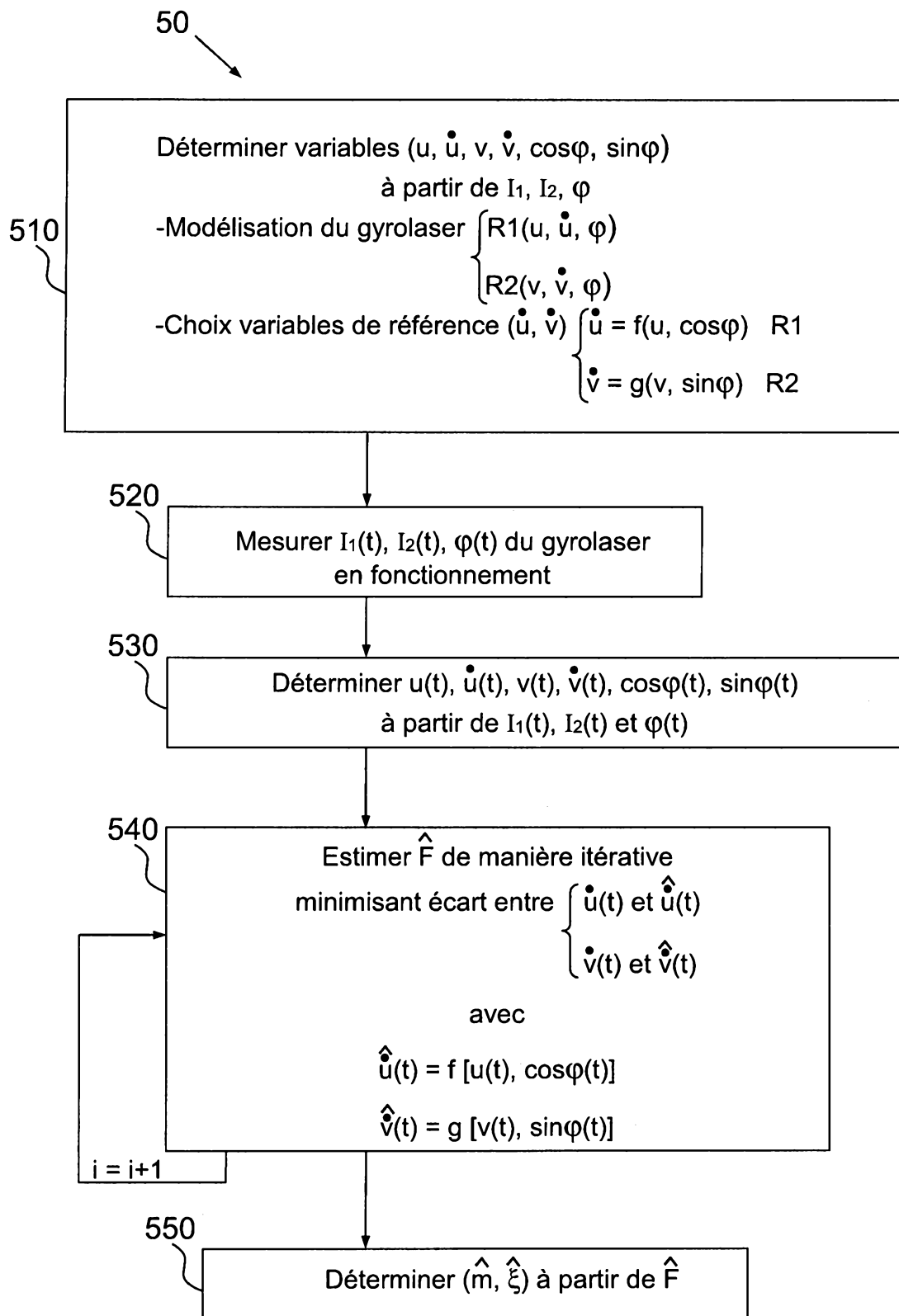


FIG.5

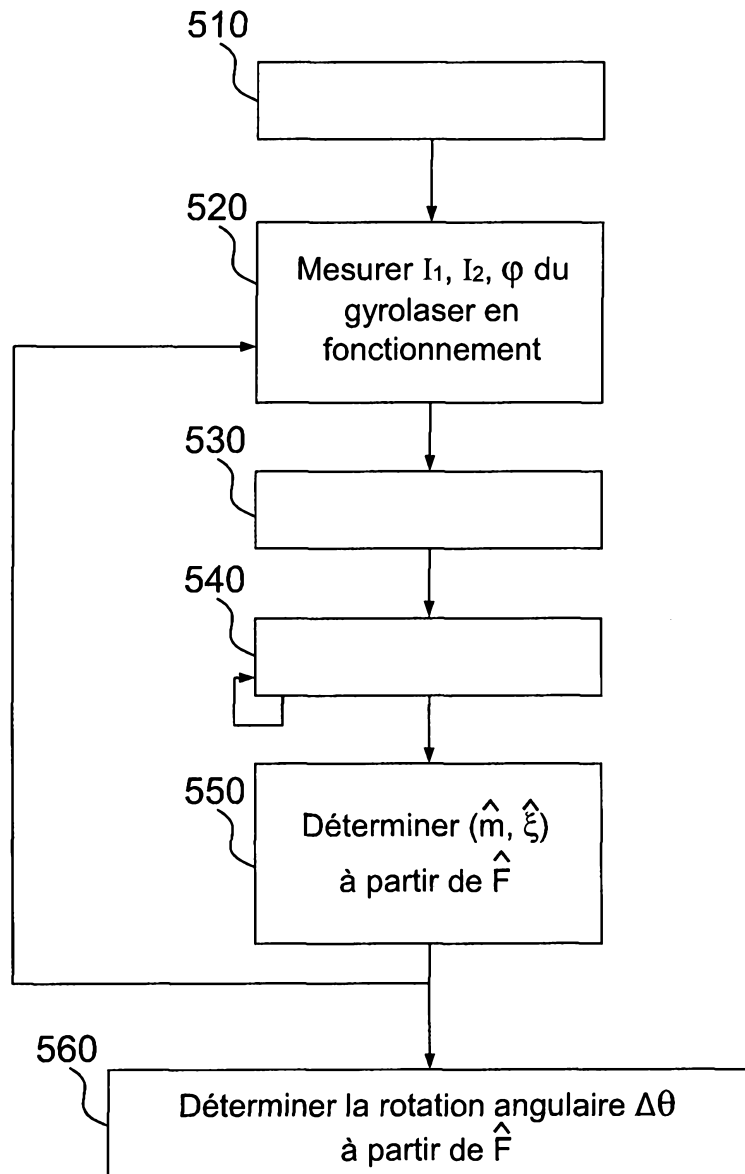


FIG.6

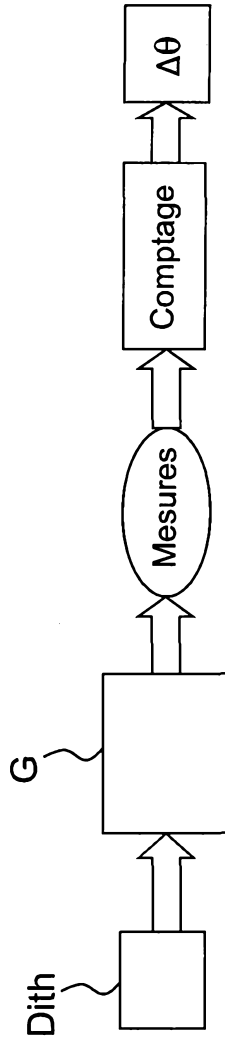


FIG.7a

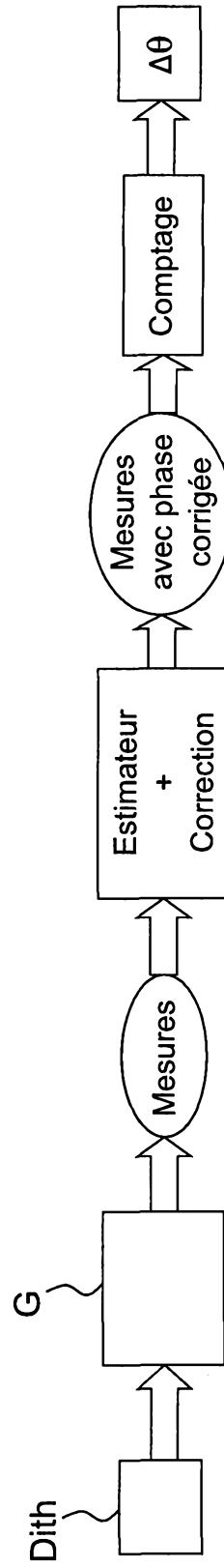


FIG.7b

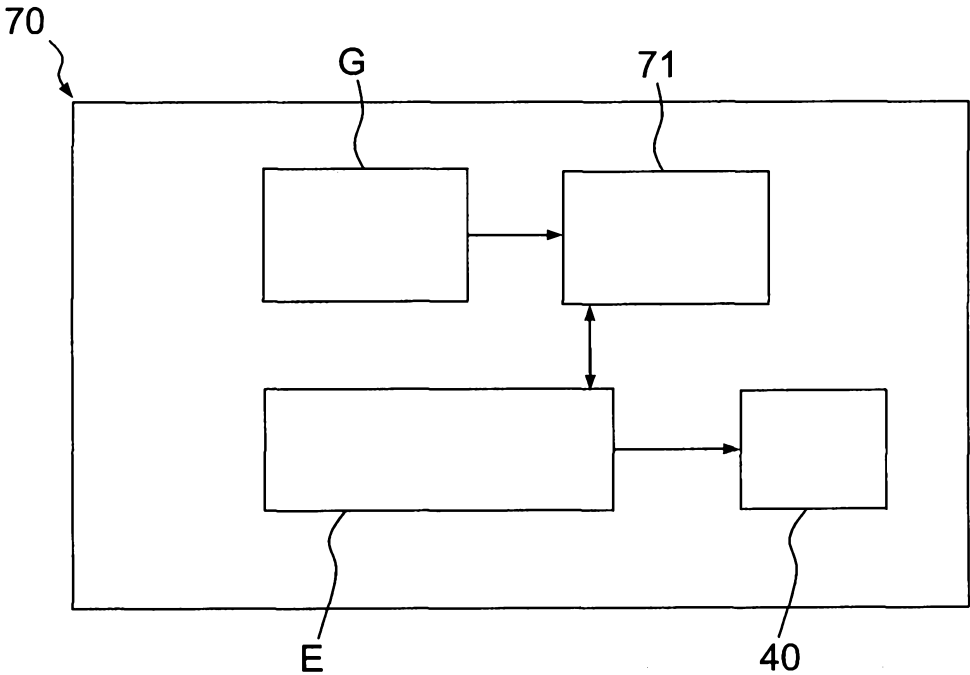


FIG.8

# RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-17 et R.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

## OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

---

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

## CONDITIONS D'ÉTABLISSEMENT DU PRÉSENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

- Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.
- Le demandeur a maintenu les revendications.
- Le demandeur a modifié les revendications.
- Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.
- Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.
- Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

## DOCUMENTS CITÉS DANS LE PRÉSENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

- Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.
- Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.
- Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.
- Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

NEANT

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL**

ZHENFANG FAN ET AL: "Online effective backscattering estimation for ring laser gyro", CHINESE OPTICS LETTERS, vol. 10, no. 5, 10 mai 2012 (2012-05-10), pages 051404-1, XP055310898, CN ISSN: 1671-7694, DOI: 10.3788/COL201210.051404

US 5 442 442 A (KANEGBERG EDWARD [US] ET AL)  
15 août 1995 (1995-08-15)

US 4 551 021 A (CALLAGHAN STEPHEN P [US] ET AL)  
5 novembre 1985 (1985-11-05)

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT