

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

①① N° de publication :

3 132 944

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national :

22 01526

⑤① Int Cl⁸ : **G 01 B 9/02** (2022.01), G 01 R 33/032, 29/08, G 02 B 6/12, G 02 F 1/225

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②② Date de dépôt : 21.02.22.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public de la
demande : 25.08.23 Bulletin 23/34.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

⑥③ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : IXBLUE SAS — FR.

⑦② Inventeur(s) : Moluçon Cédric et VILLEDIEU Tho-
mas.

⑦③ Titulaire(s) : IXBLUE SAS.

⑦④ Mandataire(s) : JACOBACCI CORALIS HARLE.

⑤④ Interféromètre à fibre optique et procédé de mesure de champ magnétique ou de courant électrique basé
sur cet interféromètre.

⑤⑦ L'invention concerne un interféromètre à fibre optique
comprenant une source (20), un modulateur différentiel de
phase (16), un système de traitement du signal (900), une
fibre optique de détection (73) présentant une constante de
Verdet apte à induire un effet Faraday magnéto-optique
non-réciproque, l'interféromètre étant apte à détecter une
différence de phase d'un faisceau interférométrique (300)
formé par interférences entre deux ondes lumineuses pola-
risées (111, 112) ayant parcouru simultanément la fibre op-
tique (73) suivant un chemin optique fermé et à en déduire,
par division de la différence de phase par un facteur
d'échelle, une valeur de champ magnétique intégré le long
du chemin optique fermé ou une valeur d'un courant élec-
trique passant dans un conducteur électrique (120).

Selon l'invention, le système de traitement du signal
(900) est adapté pour mesurer une variation de contraste de
puissance d'une partie du faisceau interférométrique et pour
déduire de la variation de contraste une mesure de variation
du facteur d'échelle.

Figure pour l'abrégé : Fig. 1

FR 3 132 944 - A1



Description

Titre de l'invention : Interféromètre à fibre optique et procédé de mesure de champ magnétique ou de courant électrique basé sur cet interféromètre

Domaine technique

- [0001] La présente invention concerne de manière générale le domaine des capteurs basés sur un interféromètre à fibre optique. Elle concerne plus particulièrement un capteur utilisant l'effet Faraday magnéto-optique pour intégrer un champ magnétique le long d'un chemin optique fermé dans une fibre optique.
- [0002] Un tel capteur trouve notamment des applications comme capteur de courant électrique (ou FOCS pour fiber-optic current sensor) dans lequel la fibre optique entoure un conducteur électrique ou encore comme capteur de champ magnétique.
- [0003] Elle concerne en particulier un capteur et un procédé de mesure de courant électrique de grande précision, corrigé des erreurs impactant le facteur d'échelle.

Technique antérieure

- [0004] Dans le domaine ci-dessus, la publication J. Blake et al. « In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor » IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, n° 1, pages 116-121, 1996 décrit un interféromètre à fibre optique en réflexion (ou en ligne) utilisé comme capteur de courant électrique via le champ magnétique induit.
- [0005] La publication « Highly accurate fiber-optic DC current sensor for the electro-winning industry », K. Bohnert, H. Brändle, M. Brunzel, P. Gabus et P. Guggenbach, IEEE, PCIC-2005-14, pp. 121-128 décrit aussi un capteur de courant basé sur un interféromètre à fibre optique pour mesurer l'effet Faraday induit dans une fibre optique de détection. Selon cette publication, le capteur de courant peut être basé sur une configuration d'interféromètre de Sagnac à fibre optique ou d'interféromètre à fibre optique en réflexion. La fibre optique de détection est disposée de manière à former au moins un tour autour de la périphérie d'un câble électrique parcouru par un courant électrique dont on cherche à mesurer l'intensité. La fibre de détection est en général à maintien de polarisation circulaire. Dans le cas d'un d'interféromètre de Sagnac, on mesure une différence de phase entre deux ondes ayant parcouru la fibre optique de détection avec un même état de polarisation circulaire, et en sens mutuellement opposés. Dans le cas d'un interféromètre à fibre optique en réflexion, on mesure une différence de phase entre deux ondes ayant parcouru conjointement la fibre optique de détection suivant un aller-retour, avec des états de polarisation circulaires orthogonaux entre eux, ces états s'inversant entre le chemin aller et le chemin retour à la réflexion sur le miroir. Au repos, c'est-à-dire ici en absence de courant électrique ou de champ magnétique, les

chemins optiques parcourus par les deux ondes sont parfaitement identiques de par la réciprocité de la propagation des ondes en sens opposé ; on dit d'ailleurs que les deux chemins sont parfaitement réciproques.

- [0006] Un courant électrique passant dans un conducteur électrique induit un champ magnétique. Ce champ magnétique génère dans la fibre optique de détection un effet Faraday, ou effet magnéto-optique colinéaire non-réciproque. Plus précisément, l'effet Faraday est l'effet rotatoire de polarisation optique produit par un champ magnétique. Ainsi, le plan de polarisation d'un faisceau de lumière de polarisation linéaire traversant un matériau, par exemple de la silice, placé dans un champ magnétique B et se propageant parallèlement à ce champ, tourne d'un angle de rotation β qui dépend de la constante de Verdet du matériau de la fibre optique de détection, notée V , du champ magnétique B et de la longueur, d , du chemin optique dans le matériau traversé. L'angle de rotation β de la polarisation est proportionnel à la circulation du champ magnétique B le long de la fibre optique de détection. L'angle de rotation de la polarisation dépend du sens du champ magnétique et aussi du sens de propagation de la lumière (voir aussi « The fiber optic gyroscope », second Edition, Hervé Lefèvre, Artech House, [Fig.7].1-a page 107). Cette rotation d'un angle β de la polarisation linéaire est interprétée comme une biréfringence circulaire. En effet, la polarisation linéaire peut être décomposée en deux polarisations circulaires opposées (dextrogyre et lévogyre, right-handed et left-handed en anglais). Par effet Faraday, ces deux polarisations circulaires, se propageant dans le même sens, subissent une différence de phase qui s'observe par une rotation de la polarisation linéaire qui est la combinaison de ces deux polarisations circulaires co-propagatives.

- [0007] Dans le cas d'un capteur de courant basé sur un interféromètre de Sagnac, les deux ondes se propagent en sens opposé, et avec la même polarisation circulaire. L'effet Faraday ne modifie pas cette polarisation circulaire, mais une différence de phase est créée entre les deux ondes se propageant en sens opposé (voir aussi « The fiber optic gyroscope », second Edition, Hervé Lefèvre, Artech House, [Fig.7].1-b page 107). Cette différence de phase $\Delta\Phi_S$ est mesurée après recombinaison des deux ondes en sortie de l'interféromètre, et elle est égale à :

[0008]
$$\Delta\Phi_S = 2 V N I$$

- [0009] où V représente la constante de Verdet du matériau du cœur de la fibre optique de détection, N le nombre entier de tours de fibre optique enroulée autour du conducteur électrique et I l'intensité du courant électrique parcourant le conducteur électrique.

- [0010] Dans le cas d'un capteur de courant basé sur un interféromètre à fibre optique en réflexion, la différence de phase mesurée $\Delta\Phi_R$ est proportionnelle à :

[0011]
$$\Delta\Phi_R = 4 V N I$$

- [0012] Dans le cas d'un interféromètre à fibre optique en réflexion, le facteur d'échelle est

double ($4 VNI$ au lieu de $2 VNI$) par comparaison avec un interféromètre de Sagnac, du fait que les ondes polarisées parcourent chacune un aller-retour dans la fibre optique de détection. De plus, un interféromètre à fibre optique en réflexion est plutôt moins sensible qu'un interféromètre en boucle à la vitesse de rotation de l'interféromètre, aux vibrations ainsi qu'aux effets thermiques.

- [0013] De tels capteurs à fibre optique présentent de nombreux avantages. Ils permettent une mesure de champ magnétique ou de courant électrique sans contact, avec une précision de l'ordre de 1 %. Ils permettent des mesures de courant sur une gamme dynamique étendue, par exemple entre une valeur minimum de courant détectable de l'ordre de quelques micro-ampères et une valeur maximum de courant détectable de l'ordre de quelques milliers d'ampères. Enfin, ils sont insensibles à de nombreux facteurs environnementaux.
- [0014] Toutefois, il est souhaitable d'améliorer la précision des capteurs basés sur un interféromètre à fibre optique et en particulier le facteur d'échelle, qui définit la linéarité de la réponse du capteur en fonction du signal détecté, c'est à dire de la différence de phase mesurée. Une précision de mesure meilleure que 0,1 % ou même 0,01 % est souhaitable.
- [0015] Cependant, ces interféromètres à fibre optique sont sensibles à d'autres effets indésirables. Ces défauts indésirables sont susceptibles d'impacter le facteur d'échelle.
- [0016] D'une part, le facteur d'échelle d'un interféromètre à fibre optique peut présenter un défaut par construction, par exemple à cause d'un défaut d'alignement d'un composant optique. Notamment, dans le cas où on utilise une lame quart d'onde pour transformer une onde de polarisation linéaire en une onde de polarisation circulaire, cette lame peut avoir un déphasage effectif différent du déphasage théorique de $\pi/2$ d'une lame quart d'onde et/ou présenter un défaut d'alignement de ses axes propres par rapport à la polarisation linéaire incidente.
- [0017] D'autre part, le facteur d'échelle d'un interféromètre à fibre optique peut varier dans le temps. En particulier, il est connu que la constante de Verdet de la fibre dépend de la température et de la longueur d'onde du faisceau. Le facteur d'échelle peut présenter des variations du fait de variations de la constante de Verdet de la fibre optique, induites par exemple par des variations de température au niveau de la partie sensible du capteur. Le facteur d'échelle peut aussi varier à cause de variations de température au niveau du modulateur différentiel de phase optique.
- [0018] Enfin, d'autres perturbations peuvent affecter les mesures interférométriques comme par exemple des variations de puissance lumineuse de la source.
- [0019] Un des buts de l'invention est de proposer un capteur de courant électrique ou de champ magnétique basé sur un interféromètre à fibre optique permettant de mesurer en temps réel une variation ou un défaut de facteur d'échelle, quelle que soit l'origine de

cette variation ou de ce défaut. Un autre but de l'invention est de permettre de corriger en temps réel cette erreur de facteur d'échelle dans un tel capteur.

Exposé de l'invention

- [0020] Afin de remédier aux inconvénients précités de l'état de la technique, la présente divulgation propose un interféromètre à fibre optique comprenant une source de lumière apte à générer un faisceau source, un modulateur différentiel de phase, un dispositif à base de fibre optique, un système de détection, un système de traitement du signal, le dispositif à base de fibre optique comprenant une fibre optique de détection présentant une constante de Verdet apte à induire un effet Faraday magnéto-optique non réciproque, la fibre optique de détection étant disposée dans un champ magnétique ou formant au moins un tour autour d'un conducteur électrique, l'interféromètre à fibre optique étant apte à détecter une différence de phase d'un faisceau interférométrique formé par interférences entre deux ondes lumineuses polarisées ayant parcouru simultanément la fibre optique de détection suivant un chemin optique fermé, les deux ondes lumineuses polarisées étant modulées par le modulateur différentiel de phase, et l'interféromètre à fibre optique étant apte à en déduire, par division de la différence de phase par un facteur d'échelle, une valeur du champ magnétique intégré le long du chemin optique fermé ou une valeur d'un courant électrique passant dans le conducteur électrique, le facteur d'échelle étant proportionnel à la constante de Verdet de la fibre optique.
- [0021] Selon l'invention, le système de traitement du signal est adapté et configuré pour mesurer une variation de contraste de puissance d'une partie du faisceau interférométrique modulé par le modulateur différentiel de phase et pour déduire de la variation de contraste une mesure de variation du facteur d'échelle.
- [0022] Selon un aspect particulier, le système de traitement du signal est adapté et configuré pour mesurer un minimum de puissance de la partie du faisceau interférométrique modulé détecté et/ou une différence entre un maximum et un minimum de puissance de la partie du faisceau interférométrique modulé détecté.
- [0023] Selon un autre aspect particulier et avantageux, le système de traitement du signal est adapté et configuré pour corriger en temps réel le facteur d'échelle en fonction de la mesure de variation de ce facteur d'échelle.
- [0024] Dans le premier et deuxième mode de réalisation, la fibre optique de détection est à maintien de polarisation circulaire, le dispositif à base de fibre optique comprenant un retardateur optique de phase et un réflecteur, le retardateur optique de phase étant disposé à une extrémité de la fibre optique de détection et le réflecteur à une autre extrémité de la fibre optique de détection, l'interféromètre étant configuré de façon à ce que les deux ondes lumineuses polarisées parcourent la fibre optique de détection

suivant un aller-retour avec deux états orthogonaux de polarisation circulaire s'inversant par réflexion sur le réflecteur.

- [0025] Selon un aspect du premier mode de réalisation, le modulateur différentiel de phase est un modulateur électro-optique de biréfringence qui comprend un seul guide d'onde apte à guider deux états orthogonaux de polarisation linéaire suivant deux axes perpendiculaires ; le modulateur de biréfringence module, en différentiel, les phases des deux polarisations linéaires orthogonales. L'interféromètre comporte aussi un polariseur disposé entre la source de lumière et le modulateur électro-optique de biréfringence, le polariseur étant orienté à 45 degrés des axes du modulateur électro-optique de biréfringence, et une extrémité du modulateur électro-optique de biréfringence est reliée au dispositif à base de fibre optique.
- [0026] Selon un aspect du deuxième mode de réalisation, l'interféromètre comprend un séparateur à jonction Y disposé entre la source de lumière et le modulateur différentiel de phase comprenant deux guides d'onde aptes à guider deux faisceaux de même polarisation linéaire et comprenant, chacun, un modulateur de phase connecté de préférence en configuration push-pull, c'est à dire avec un signe opposé. Le dispositif à base de fibre optique comporte une section de fibre optique à maintien de polarisation et une autre section de fibre optique à maintien de polarisation, la section de fibre optique, et respectivement, l'autre section de fibre optique, étant reliée chacune, d'une part, à un des deux guides d'onde du modulateur différentiel de phase et, d'autre part, à un coupleur-séparateur de polarisation, l'autre section de fibre optique étant orientée de manière à faire tourner une polarisation linéaire de 90 degrés.
- [0027] Selon un troisième mode de réalisation, la fibre optique de détection est à maintien de polarisation circulaire, le dispositif à base de fibre optique comprend un séparateur à jonction Y disposé entre la source de lumière et le modulateur différentiel de phase qui comprend deux guides d'onde aptes à guider deux faisceaux de même polarisation linéaire, et comprenant, chacun, un modulateur de phase connecté de préférence en configuration push-pull, c'est à dire avec un signe opposé. Le dispositif à base de fibre optique comporte une section de fibre optique à maintien de polarisation, un retardateur optique de phase, une autre section de fibre optique à maintien de polarisation, et un autre retardateur optique de phase, la section de fibre optique, et respectivement, l'autre section de fibre optique, étant reliée chacune, d'une part, à un des deux guides d'onde du modulateur différentiel de phase et, d'autre part, au retardateur optique de phase, respectivement, à l'autre retardateur optique de phase, le retardateur optique de phase étant disposé à une extrémité de la fibre optique de détection et l'autre retardateur optique de phase étant disposé à une autre extrémité de la fibre optique de détection, l'interféromètre étant configuré de façon à ce que les deux ondes lumineuses polarisées parcourent la fibre optique de détection en sens opposés avec un

même état de polarisation circulaire.

- [0028] Selon un aspect particulier et avantageux de l'un quelconque de ces modes de réalisation, le retardateur optique de phase, et/ou respectivement l'autre retardateur optique de phase, forment chacun une lame quart d'onde à la longueur d'onde du faisceau source.
- [0029] Avantageusement, le retardateur optique de phase et/ou respectivement l'autre retardateur optique de phase, est décalé de manière à introduire un défaut, et le système de traitement du signal est adapté pour extraire du signal interférométrique détecté une mesure de variation du facteur d'échelle du système et ainsi en déduire une variation de température du retardateur optique de phase, respectivement de l'autre retardateur optique de phase.
- [0030] L'invention concerne aussi un procédé de mesure de champ magnétique ou de courant électrique basé sur un interféromètre à fibre optique selon l'un des modes de réalisation décrits, le procédé comprenant les étapes suivantes : émission d'un faisceau source issu d'une source de lumière ; séparation du faisceau source en deux ondes lumineuses polarisées ; modulation différentielle de phase des deux ondes lumineuses polarisées ; transmission des deux ondes lumineuses polarisées à un dispositif à base de fibre optique comprenant une fibre optique de façon à ce que les deux ondes lumineuses polarisées parcourent simultanément la fibre optique suivant un chemin optique fermé, la fibre optique présentant une constante de Verdet apte à induire un effet Faraday magnéto-optique non réciproque, la fibre optique de détection étant disposée dans un champ magnétique ou formant au moins un tour autour d'un conducteur électrique ; recombinaison des deux ondes lumineuses polarisées en sortie du dispositif à base de fibre optique pour former un faisceau interférométrique ; détection du faisceau interférométrique ; et traitement du signal détecté pour extraire une mesure d'une différence de phase du faisceau interférométrique et pour déduire, par division de la différence de phase par un facteur d'échelle, une valeur du champ magnétique intégré le long du chemin optique fermé ou une valeur d'un courant électrique passant dans le conducteur électrique.
- [0031] Selon la présente divulgation, le traitement du signal est adapté et configuré pour mesurer une variation de contraste de puissance d'une partie du faisceau interférométrique modulé par le modulateur différentiel de phase et pour déduire de la variation de contraste une mesure de variation du facteur d'échelle.
- [0032] Bien entendu, les différentes caractéristiques, variantes et formes de réalisation de l'invention peuvent être associées les unes avec les autres selon diverses combinaisons dans la mesure où elles ne sont pas incompatibles ou exclusives les unes des autres.

Brève description des dessins

- [0033] De plus, diverses autres caractéristiques de l'invention ressortent de la description annexée effectuée en référence aux dessins qui illustrent des formes, non limitatives, de réalisation de l'invention et où :
- [0034] [Fig.1] illustre un premier mode de réalisation d'un capteur de courant électrique ou de champ magnétique basé sur un interféromètre à fibre optique en réflexion;
- [0035] [Fig.2] illustre un deuxième mode de réalisation d'un capteur de courant électrique ou de champ magnétique basé sur un interféromètre à fibre optique en réflexion ;
- [0036] [Fig.3] illustre un troisième mode de réalisation d'un capteur de courant électrique ou de champ magnétique basé sur un interféromètre de Sagnac à fibre optique;
- [0037] [Fig.4] représente une courbe théorique de réponse en puissance du signal interférométrique détecté en fonction d'un déphasage introduit par le signal à mesurer ou par la modulation ajoutée à l'aide du modulateur différentiel de phase, en l'absence de défauts ;
- [0038] [Fig.5] représente une courbe de réponse en puissance d'une partie du signal interférométrique détecté en fonction d'un déphasage introduit par le signal à mesurer ou par la modulation ajoutée à l'aide du modulateur, dans le cas d'un interféromètre à fibre optique présentant un défaut de facteur d'échelle ;
- [0039] [Fig.6] représente une courbe de réponse en puissance d'une autre partie du signal interférométrique détecté en fonction d'un déphasage introduit par le signal à mesurer, dans le cas d'un interféromètre à fibre optique présentant un défaut de facteur d'échelle ;
- [0040] [Fig.7] représente une courbe de réponse en puissance résultant de la somme des signaux interférométriques détectés en fonction d'un déphasage introduit par la modulation ajoutée à l'aide du modulateur, représentés sur les figures 5 et 6, dans le cas d'un interféromètre à fibre optique présentant un défaut de facteur d'échelle ;
- [0041] [Fig.8] est une vue schématique sous forme de phasors de différents faisceaux se propageant dans un interféromètre à fibre optique dans une application de capteur de champ magnétique ou de courant électrique, en absence d'effet Faraday ;
- [0042] [Fig.9] est une vue schématique sous forme de phasors de différents faisceaux se propageant dans le même interféromètre à fibre optique, en présence d'effet Faraday ;
- [0043] [Fig.10] est une représentation schématique d'un exemple de modulation à 8 niveaux et 12 états.
- [0044] Il est à noter que sur ces figures les éléments structurels et/ou fonctionnels communs aux différentes variantes peuvent présenter les mêmes références.

Description détaillée

- [0045] Nous allons décrire les éléments principaux d'un capteur de courant électrique ou de champ magnétique basé sur un interféromètre à fibre optique en lien avec les figures 1

à 3. Nous détaillerons plus bas les différences entre le premier mode de réalisation illustré en [Fig.1], le deuxième mode de réalisation illustré en [Fig.2] et le troisième mode de réalisation illustré en [Fig.3].

- [0046] De manière générale, un capteur de courant électrique basé sur un interféromètre à fibre optique comporte un bloc source-détecteur 200, un polariseur 24, un modulateur électro-optique différentiel de phase 16, un dispositif 400 à base de fibre optique formant un chemin optique fermé pour entourer un conducteur électrique 120, un système de traitement du signal 900 et un système d'interfaces (non représenté). Dans la suite du présent document, le modulateur électro-optique différentiel de phase 16 est aussi appelé modulateur optique différentiel de phase, modulateur différentiel de phase ou modulateur optique.
- [0047] Le bloc source-détecteur 200 comprend une source de lumière 20, un système de détection 18 et un séparateur source-récepteur 22, dit séparateur de récepteur. L'ensemble des composants électriques, électroniques analogiques ou numériques peut être inclus dans un boîtier.
- [0048] Le polariseur 24 et le modulateur optique 16 sont disposés en série entre le bloc source-détecteur 200 et le dispositif 400 à base de fibre optique.
- [0049] Le dispositif à base de fibre optique 400 comprend une fibre optique de détection 73 apte à former au moins un tour autour du conducteur électrique 120. La fibre optique de détection 73 est utilisée comme fibre sensible à un effet magnéto-optique. A cet effet, la fibre optique de détection 73 est choisie pour présenter une constante de Verdet, V . Par exemple, la fibre optique de détection 73 a un cœur de silice, qui présente une constante de Verdet de l'ordre d'environ $0.6 \text{ rad T}^{-1}\text{m}^{-1}$ à la longueur d'onde de 1550nm pour la silice. Avantageusement, la fibre optique de détection 73 est une fibre à maintien de polarisation torsadée ou twistée au fibrage, aussi appelée fibre SPUN. Une telle fibre SPUN permet de conserver la polarisation circulaire de la lumière. En variante, la fibre optique de détection 73 est à maintien de polarisation linéaire. Toutefois, une telle configuration est beaucoup moins efficace.
- [0050] La source de lumière 20 génère un faisceau source 100. Le séparateur source-récepteur 22 transmet le faisceau source 100, par exemple via une section de fibre optique 23, au polariseur 24. Le polariseur 24 reçoit le faisceau source et transmet un faisceau source polarisé 110 linéairement en direction du modulateur optique 16.
- [0051] La [Fig.1] représente schématiquement un capteur de courant basé sur un interféromètre à fibre optique selon un premier mode de réalisation. Le polariseur 24 et le modulateur électro-optique différentiel de phase 16 sont disposés et configurés pour recevoir le faisceau source polarisé 110 linéairement et le séparer en deux ondes 101, 102 polarisées linéairement suivant deux états de polarisation orthogonaux. Plus précisément, un séparateur de polarisation est constitué en orientant les axes propres du

polariseur 24 à 45 degrés des axes propres du modulateur électro-optique différentiel de phase 16. Le modulateur électro-optique de différentiel de phase 16 est par exemple constitué d'un modulateur électro-optique intégré sur substrat de niobate de lithium et formé par exemple par diffusion de titane. Le circuit optique intégré 34 comporte un unique guide d'onde formé par exemple par diffusion de titane dans un substrat de niobate de lithium. Le guide d'onde permet avantageusement de guider les deux états de polarisation linéaires transverses. Les électrodes du modulateur de phase 16 sont disposées le long des côtés du guide d'onde. Le guide d'onde du circuit optique intégré 34 est biréfringent. La combinaison du polariseur 24 et du modulateur électro-optique différentiel de phase 16 permet ainsi de séparer en polarisation le faisceau source polarisé 110 linéairement en une première onde 101 monomode polarisée et une deuxième onde 102 polarisée orthogonalement, qui se propagent sur le même guide d'onde monomode du modulateur électro-optique différentiel de phase 16. Par exemple, dans la suite, on considère la première onde monomode 101 linéairement polarisée TE et la deuxième onde monomode 102 linéairement polarisée TM.

- [0052] Le modulateur électro-optique différentiel de phase 16 ayant une efficacité différente selon la polarisation, il génère un déphasage des deux ondes et va permettre de moduler la phase. L'extrémité du modulateur électro-optique différentiel de phase 16 est ici reliée directement au dispositif 400 à base de fibre optique.
- [0053] Le dispositif 400 à base de fibre optique comprend ici une section de fibre optique 74 à maintien de polarisation linéaire, un retardateur optique de phase 42 (ci-après retardateur optique) et un réflecteur 26. La section de fibre optique 74 et la fibre optique de détection 73 sont disposées en série et reliées entre elles par le retardateur optique 42. Le réflecteur 26 est arrangé à une autre extrémité, ou extrémité distale, de la fibre optique de détection 73. Le dispositif à base de fibre optique 400 reste principalement à l'extérieur du boîtier du bloc source-récepteur 200.
- [0054] Dans le sens aller, la première onde 101 monomode polarisée TE et la deuxième onde 102 polarisée TM sont injectées à une extrémité proximale de la section de fibre optique 74 à maintien de polarisation linéaire. Le retardateur optique 42 est disposé entre une extrémité distale de la section de fibre optique à maintien de polarisation 74 et une extrémité proximale de la fibre optique 73 de détection. Le retardateur optique 42 est par exemple une lame quart d'onde. En variante, le retardateur optique 42 est constitué d'une fibre optique à cœur elliptique dont la longueur et l'orientation sont déterminées pour induire un déphasage quart d'onde.
- [0055] La première onde monomode 101 polarisée TE et la deuxième onde monomode 102 polarisée TM sont injectées dans la section de fibre optique 74 à maintien de polarisation linéaire. De façon avantageuse, les axes propres de la fibre optique à maintien de polarisation 74 sont alignés sur les axes de polarisation TE et TM. La section de

fibre optique 74 à maintien de polarisation transporte la première onde monomode 101 polarisée et la deuxième onde monomode 102 polarisée, tout en conservant la polarisation linéaire de chacune de ces ondes. Cette section de fibre optique à maintien de polarisation 74 sert à déporter la partie sensible du capteur constituée par la fibre optique 73 par rapport au boîtier du bloc source-détecteur 200. La section de fibre optique à maintien de polarisation 74 a une longueur comprise entre 1m et 10 km, par exemple d'environ 400 m. La section de fibre optique à maintien de polarisation 74 est optionnelle.

- [0056] Le retardateur optique 42 reçoit la première onde monomode linéairement polarisée TE, notée 101, et forme une première onde monomode de polarisation circulaire 111 droite. De manière analogue, le retardateur optique 42 reçoit la deuxième onde monomode linéairement polarisée TM, notée 102, et forme une deuxième onde monomode de polarisation circulaire 112 gauche. Les deux ondes polarisées circulairement 111 et 112 sont injectées simultanément dans la fibre optique de détection 73. La fibre optique de détection 73 est utilisée comme fibre sensible à un effet rotatoire magnéto-optique. Avantagusement, la fibre optique de détection 73 est une fibre à maintien de polarisation torsadée ou twistée au fibrage, aussi appelée fibre SPUN. Une telle fibre permet de conserver la polarisation circulaire de la lumière. De cette manière, la première onde monomode de polarisation circulaire 111 droite se propage dans la fibre optique de détection 73 tout en restant polarisée circulaire droite tout le long de la fibre optique de détection 73 jusqu'au réflecteur 26. De la même manière, la deuxième onde monomode de polarisation circulaire 112 gauche se propage dans la fibre optique de détection 73 tout en restant polarisée circulaire gauche tout le long de la fibre 73 jusqu'au réflecteur 26.
- [0057] Le réflecteur 26 est par exemple un miroir en espace libre. En variante, l'extrémité distale de la fibre optique de détection 73 est métallisée pour former le réflecteur 26.
- [0058] Après un premier passage dans la fibre optique de détection 73, les deux ondes monomodes de polarisation circulaires orthogonales 111, 112 se réfléchissent sur le miroir 26. A la réflexion sur le miroir 26, les états de polarisation des deux ondes monomodes s'inversent. Lors de la réflexion sur le réflecteur 26, la première onde monomode de polarisation circulaire 111 droite change de sens de propagation et de polarisation pour former une première onde polarisée circulaire 111 gauche. Et inversement, lors de la réflexion sur le réflecteur 26, la deuxième onde monomode de polarisation circulaire 112 gauche change de sens de propagation et de polarisation pour former une deuxième onde polarisée circulaire 112 droite. Les deux ondes réfléchies polarisées circulairement 111, 112 se propagent dans le sens retour dans la fibre optique de détection 73 tout en conservant leur polarisation circulaire respective. Dans le sens retour, le retardateur optique 42 reçoit la première onde polarisée circulaire 111

gauche et la transforme en une première onde linéairement polarisée TM. De manière analogue, dans le sens retour, le retardateur optique 42 reçoit la deuxième onde polarisée circulaire 112 droite et la transforme en une deuxième onde monomode linéairement polarisée TE.

- [0059] Dans le sens retour, la première onde monomode linéairement polarisée TM et la deuxième onde monomode linéairement polarisée TE sont transmises directement au modulateur électro-optique différentiel de phase 16 puis au polariseur 24.
- [0060] Dans le sens retour, le modulateur différentiel de phase et le polariseur recombinent la première onde monomode linéairement polarisée TM et la deuxième onde monomode linéairement polarisée TE pour former un faisceau interférométrique 300 polarisé linéairement.
- [0061] Dans tous les modes de réalisation, le séparateur source-récepteur 22 guide le faisceau interférométrique 300 vers le photodétecteur 18. Le détecteur 18 reçoit le faisceau interférométrique et génère un signal détecté 80.
- [0062] Dans le deuxième mode de réalisation, illustré sur la [Fig.2], le séparateur de polarisation comprend un séparateur spatial, par exemple constitué d'une jonction Y, notée 15, qui sépare le faisceau source polarisé 110 linéairement, par exemple TE, en une première onde 101 monomode polarisée TE et une deuxième onde 103 monomode polarisée TE. Le polariseur 24 est avantageusement un polariseur à guide d'onde formé par la branche commune de la jonction Y, notée 15. Dans ce cas, la première onde 101 monomode polarisée TE et la deuxième onde 103 monomode polarisée TE se propagent chacune sur un guide d'onde monomode distinct du modulateur électro-optique différentiel de phase 16, par exemple en niobate de lithium sur circuit intégré optique. De façon avantageuse, la jonction Y et le modulateur électro-optique différentiel de phase 16 sont fabriqués sur un même circuit intégré optique 14. Dans ce cas, le guide d'onde est de préférence formé par échange de protons, de façon à guider un seul état de polarisation sur la branche commune de la jonction Y.
- [0063] Dans le deuxième mode de réalisation, le dispositif à base de fibre optique 400 comporte en outre une section de fibre optique 71 et une autre section de fibre optique 72 reliées chacune, d'une part, à un guide d'onde de sortie du modulateur électro-optique différentiel de phase 16 et, d'autre part, à un coupleur-séparateur de polarisation 27.
- [0064] Dans le sens aller, en sortie du modulateur électro-optique différentiel de phase 16, la première onde monomode 101 se propage dans la section de fibre optique 71 à maintien de polarisation. La deuxième onde monomode 103 se propage dans l'autre section de fibre optique 72 à maintien de polarisation. L'autre section de fibre optique 72 est orientée de manière à faire tourner de 90 degrés la polarisation linéaire de la deuxième onde monomode 103, qui devient ainsi une deuxième onde monomode 102

polarisée linéairement avec une polarisation orthogonale à la première onde monomode 101. Le coupleur-séparateur de polarisation 27 recombine la première onde monomode 101 et la deuxième onde monomode 102, de polarisations linéaires orthogonales sur un même guide d'onde monomode. Le coupleur-séparateur de polarisation 27 est relié à une extrémité proximale de la section de fibre optique 74 à maintien de polarisation linéaire.

- [0065] La propagation de la première onde monomode 101 et de la deuxième onde monomode 102 suivant un aller-retour à travers le retardateur optique 42, la fibre optique de détection 73 et la réflexion sur le réflecteur 26 est analogue à celle décrite en lien avec le premier mode de réalisation.
- [0066] Dans le sens retour, après réflexion sur le réflecteur et transmission via la fibre optique de détection 73, le retardateur optique 42 et la section de fibre 74, la première onde monomode linéairement polarisée TM est transmise via l'autre section de fibre optique 72 qui fait tourner de 90 degrés la polarisation linéaire de la première onde monomode, qui devient ainsi une première onde monomode linéairement polarisée TE. La deuxième onde monomode linéairement polarisée TE est transmise par la section de fibre optique 71 à maintien de polarisation. La jonction Y 15 recombine la première onde monomode linéairement polarisée TE et la deuxième onde monomode linéairement polarisée TE pour former le faisceau interférométrique 300 polarisé linéairement, ici TE.
- [0067] Dans les premier et deuxième modes de réalisation, on dispose ainsi de la première onde monomode 101 polarisée linéairement suivant un premier état de polarisation et de la deuxième onde monomode 102 polarisée linéairement suivant un deuxième état de polarisation transverse au premier état de polarisation, se propageant sur un seul et même guide d'onde, soit directement en sortie du modulateur électro-optique différentiel de phase 16, soit en sortie du coupleur-séparateur de polarisation 27.
- [0068] Dans le premier et le deuxième mode de réalisation, le modulateur électro-optique différentiel de phase 16 module la phase de la polarisation de la première onde monomode 101 linéairement polarisée TE par rapport à la phase de la deuxième onde monomode 102 linéairement polarisée TM. A cet effet, le modulateur électro-optique différentiel de phase 16 applique un déphasage $\Phi_m(t)$ modulé périodiquement avec une période de modulation T.
- [0069] La [Fig.3] représente un capteur de courant électrique ou de champ magnétique basé sur un interféromètre de Sagnac à fibre optique, selon un troisième mode de réalisation. On retrouve les éléments communs aux deux premiers modes de réalisation : la source de lumière 20 générant un faisceau source 100, un dispositif 400 à base de fibre optique formant un chemin optique fermé pour encercler un conducteur électrique 120, un système de détection 18 et un système de traitement du signal 900. Dans ce

troisième mode de réalisation, l'interféromètre de Sagnac, dit en boucle, utilise un chemin optique refermé, généralement entre les deux extrémités d'une bobine de fibre optique 73. Un composant optique, par exemple constitué d'une jonction Y notée 15, sépare le faisceau source 100 en deux ondes distinctes qui parcourent le chemin optique refermé en sens mutuellement opposés et le même composant optique recombine les deux ondes en sortie de la bobine de fibre optique. Dans un interféromètre à fibre optique en boucle, les deux ondes séparées utilisent le même état de polarisation sur le chemin optique refermé. Au repos, les chemins optiques parcourus par les deux ondes sont parfaitement réciproques. Le polariseur 24, la jonction Y notée 15 et le modulateur différentiel de phase 16 sont disposés et fonctionnent de manière analogue aux mêmes éléments décrits en lien avec la [Fig.2].

- [0070] Dans le troisième mode de réalisation, le dispositif 400 à base de fibre optique comporte la fibre optique de détection 73 reliée à chacune de ses extrémités à un retardateur optique de phase, notés respectivement 32 et 33. Le dispositif à base de fibre optique 400 comporte en outre une section de fibre optique 71 à maintien de polarisation et une autre section de fibre optique 72 à maintien de polarisation. La section de fibre optique 71 est reliée, d'une part, à un guide d'onde de sortie du modulateur optique différentiel de phase 16 et, d'autre part, au retardateur optique 32. L'autre section de fibre optique 72 est reliée, d'une part, à un autre guide d'onde de sortie du modulateur optique différentiel de phase 16 et, d'autre part, au retardateur optique 33. La fibre optique de détection 73 est enroulée de façon à former au moins un tour autour du conducteur électrique 120, dans une application à un capteur de courant.
- [0071] Le retardateur optique de phase 32, respectivement 33, est par exemple une lame quart d'onde.
- [0072] Dans le troisième mode de réalisation, dans le sens aller, en sortie du modulateur optique différentiel de phase 16, la première onde monomode 101 se propage dans la section de fibre optique 71 à maintien de polarisation et la deuxième onde monomode 102 se propage dans l'autre section de fibre optique 72 à maintien de polarisation. La première onde monomode 101 et la deuxième onde monomode 102 sont de polarisations linéaires parallèles, par exemple ici TE. Le retardateur optique 32, respectivement 33, reçoit la première onde monomode 101, respectivement la deuxième onde monomode 102, et la transforme en une première onde monomode de polarisation circulaire 111 droite, respectivement une deuxième onde monomode de polarisation circulaire 112 droite. La première onde monomode de polarisation circulaire 111 droite, respectivement une deuxième onde monomode de polarisation circulaire 112 droite parcourent la fibre optique de détection 73 en sens mutuellement opposé. En sortie de la fibre optique de détection 73, le retardateur optique 32, respectivement 33, reçoit la deuxième onde monomode de polarisation circulaire 112 droite, respec-

tivement la première onde monomode de polarisation circulaire 111 droite, et la transforme en une deuxième onde monomode de polarisation linéaire TE, respectivement une première onde monomode de polarisation linéaire TE. Comme dans le deuxième mode de réalisation, le modulateur optique de différentiel de phase 16 et la jonction Y 15 recombinent la première onde monomode de polarisation linéaire TE et la deuxième onde monomode de polarisation linéaire TE pour former un faisceau interférométrique 300 polarisé linéairement.

- [0073] Dans le sens retour, dans les trois modes de réalisation décrits ci-dessus, après un temps de parcours $\Delta\tau$, le modulateur optique différentiel de phase 16 reçoit la première onde monomode linéairement polarisée et la deuxième onde monomode linéairement polarisée. Le modulateur optique différentiel de phase 16 module la phase de la polarisation de la première onde polarisée par rapport à la phase de la deuxième onde monomode polarisée. Ainsi, le modulateur optique différentiel de phase 16 forme, une première onde de sortie et, respectivement, une deuxième onde de sortie, ayant une différence de phase modulée $\Delta\Phi_m(t) = \Phi_m(t) - \Phi_m(t - \Delta\tau)$. Ici, $\Delta\tau$ représente le temps de parcours aller-retour de chaque onde dans le dispositif à fibre optique 400.
- [0074] Dans le premier mode de réalisation, le temps de parcours $\Delta\tau$ à considérer pour la modulation de phase $\Delta\Phi_m(t)$ est le temps de parcours de la première onde ou de la deuxième onde pour un aller-retour dans la section de fibre à maintien de polarisation 74 et la fibre optique de détection 73.
- [0075] Dans le deuxième mode de réalisation, le temps de parcours $\Delta\tau$ à considérer pour la modulation de phase $\Delta\Phi_m(t)$ est le temps de parcours de la première onde ou de la deuxième onde pour un passage dans les sections de fibre optique 71 et 72 et pour un aller-retour dans la section de fibre à maintien de polarisation 74 et la fibre optique de détection 73.
- [0076] Dans le troisième mode de réalisation, le temps de parcours $\Delta\tau$ à considérer pour la modulation de phase $\Delta\Phi_m(t)$ est le temps de parcours de la première onde ou de la deuxième onde pour un passage dans une section de fibre optique 71, une section de fibre optique 72 et pour un aller simple dans la fibre optique de détection 73.
- [0077] Dans les exemples illustrés sur les figures 1 à 3, on utilise un système numérique de traitement du signal. En variante, le système de traitement du signal peut être entièrement analogique.
- [0078] Sur les figures 1 à 3, le système de traitement du signal 900 comprend par exemple un convertisseur analogique-numérique 19, un processeur numérique 30, par exemple de type DSP (Digital Signal Processor), FPGA (Field Programmable Gate Array) ou ASIC (Application Specific Integrated Circuit), et un convertisseur numérique-analogique 31. Le processeur numérique 30 permet d'extraire un signal d'un paramètre à mesurer 90, par exemple le champ magnétique ou l'intensité d'un courant électrique,

sur une sortie numérique. Le convertisseur numérique-analogique 31 permet d'appliquer une tension de modulation 60 sur les électrodes du modulateur optique différentiel de phase 16. Les résultats du ou des paramètre(s) mesuré(s) 90 sont par exemple affichés sur une interface homme-machine.

- [0079] Le système de traitement du signal 900 applique l'un quelconque des schémas de modulation-démodulation connus pour extraire une mesure de différence de phase, qui est ensuite transformée en intensité du courant électrique. Une modulation du déphasage $\Phi_m(t)$ est obtenue en appliquant une tension électrique 60 modulée $V_m(t)$ sur les électrodes du modulateur différentiel de phase 16. Dans le cas d'une modulation numérique, la tension de modulation comporte M états de modulation où M est un nombre entier par exemple égal à 4, 6, 8 ou 12. Toutefois, il existe aussi des schémas de modulation/démodulation analogiques que l'homme du métier adaptera sans difficulté.
- [0080] La modulation du déphasage $\Phi_m(t)$ est périodique avec une période de modulation T telle que $T/2 = 1/(2.F_p) = \Delta\tau$ où F_p représente la fréquence propre du dispositif à fibre optique 400. Le système de détection 18 acquiert la puissance du faisceau interférométrique en sortie de l'interféromètre suivant les M états de modulation. Le système de traitement du signal numérise le faisceau interférométrique détecté et démodule le signal détecté.
- [0081] Dans l'application à un capteur de courant électrique, la fibre optique de détection 73 est enroulée pour former une bobine autour d'un conducteur électrique 120 dans lequel circule un courant électrique ayant une intensité I . L'axe de la bobine de la fibre optique de détection 73 est confondu avec l'axe longitudinal du conducteur électrique 120. On note N le nombre de tours de fibre optique de détection 73 fermés autour du conducteur électrique 120. Le courant électrique induit un champ magnétique B suivant des lignes de champ circulaires autour de la circonférence du conducteur électrique 120.
- [0082] Comme décrit plus haut, il est connu que le déphasage interférométrique $\Delta\phi$ introduit par effet Faraday magnéto-optique entre les deux ondes polarisées circulairement en sortie de la fibre de détection 73 après un aller-retour dans un interférométrie en réflexion, est relié à l'intensité I du courant électrique par l'équation suivante, où V représente la constante de Verdet de la fibre optique de détection 73, lorsque le système interférométrique est parfait.

[Math.1]

$$\Delta\phi = 4VNI$$

- [0083] Dans ce cas, le facteur d'échelle est égal à $4VN$. La constante de Verdet de la silice est égale à environ $0.6 \text{ rad T}^{-1}\text{m}^{-1}$ à la longueur d'onde de 1550nm . N représente le

nombre de tours de la fibre optique sensible, N étant compris entre 1 et 100000 et généralement inférieur à 20000.

[0084] Comme décrit plus haut, dans le cas d'un interféromètre de Sagnac, le facteur d'échelle est égal à $2VN$.

[0085] Un interféromètre à fibre optique en ligne ou en boucle comportant une fibre optique de détection 73 permet ainsi de mesurer un champ magnétique ou un courant électrique.

[0086] La [Fig.4] représente la réponse de l'interféromètre en termes de puissance mesurée en fonction du déphasage $\Delta\phi(t)$ introduit par le modulateur différentiel de phase 16, dans le cas d'un interféromètre parfait. En théorie, le déphasage est parfaitement modulé entre une valeur maximale, notée P_0 , et une valeur minimale P_{min} , nulle.

[0087] Toutefois, des erreurs peuvent affecter la réponse d'un tel interféromètre.

[0088] Par exemple, dans le premier mode de réalisation, on note θ l'angle entre le polariseur 24 et le modulateur optique différentiel de phase 16. En général, comme indiqué plus haut, θ est ajusté à environ 45 degrés. Dans le deuxième mode de réalisation, l'angle θ représente par exemple un déséquilibre entre les deux branches de la jonction Y 15, qui ne sépare pas l'onde source à 50-50 entre les deux branches.

[0089] L'amplitude de modulation, notée $P_{modulation}$, de la puissance détectée s'exprime comme la différence entre la puissance maximum, notée P_{max} , et la puissance minimum, notée P_{min} .

[0090] Lorsque l'interféromètre est parfait, on obtient, comme illustré sur la [Fig.4] :
[Math.2]

$$P_{modulation} = P_{max} - P_{min} = P_0 \frac{\sin^2(2\theta)}{2}$$

[Math.2]

$$P_{min} = 0$$

[0091] Toutefois, le système interférométrique peut présenter un défaut, par exemple un défaut d'alignement entre les axes propres des fibres 73 et 74, un défaut du retardateur optique 42, qui n'est pas exactement une lame quart d'onde à la longueur d'onde utilisée ou encore une biréfringence résiduelle. Dans ce cas, en faisant l'hypothèse où VNI est petit, le déphasage mesuré devient $\Delta\phi = 4VNI / \cos(2\gamma)$ où γ représente l'angle du défaut considéré, par exemple du fait d'un désalignement de la fibre 74 ou d'un défaut de la lame quart d'onde 42. On considère ici un angle petit lorsqu'il est inférieur à environ 0,1rad.

[0092] La [Fig.5] représente une partie du signal interférométrique détecté correspondant aux interférences entre les deux ondes principales et aux interférences entre les deux ondes doublement couplées par un défaut γ , ces ondes ayant parcouru l'interféromètre en fonction d'un déphasage $\Delta\phi(t)$ modulé en fonction de la mesure de courant ou de

champs magnétique ou en fonction du déphasage introduit par la modulation grâce au modulateur et en présence d'un défaut γ . On note P_0 la puissance de la source. Au lieu d'atteindre la valeur maximale P_0 , la puissance maximum de cette partie du signal détecté est limitée à la valeur $P_0 \cos^2(\gamma)$.

[0093] Toutefois, le défaut γ induit aussi des interférences entre d'autres ondes parasites à couplage simple, qui contribuent à une autre partie du signal détecté. Comme illustré sur la [Fig.6], on montre que l'amplitude de cette autre partie du signal interférométrique en fonction d'un déphasage $\Delta\phi(t)$ dû au signal à mesurer présente une puissance maximum égale à $P_0 \sin^2(\gamma)$. La modulation de phase à travers le modulateur n'a aucune incidence sur ces signaux à partir du moment où ils sont décorrélés des signaux principaux et doubles de la [Fig.5].

[0094] Plus précisément, lorsque l'interféromètre est imparfait, on obtient, comme illustré sur la [Fig.7], la somme de ces deux signaux d'interférences correspondant à un signal interférométrique détecté qui est modulé entre une valeur P_{min} , égale à $P_0 \sin^2(\gamma)$ et une valeur maximale P_{max} . Plus précisément, la [Fig.7] représente la puissance en fonction de la modulation appliqué au modulateur de phase.

[Math.3]

$$P_{modulation} = P_{max} - P_{min} = P_0 \frac{\sin^2(2\theta)}{2} \cdot \cos^2(2\gamma)$$

[Math.3]

$$P_{min} = P_0 \frac{\sin^2(2\gamma)}{2} \cdot \frac{(1 + \cos^2(2\theta))}{2}$$

[0095] On observe que l'interféromètre n'est plus parfaitement contrasté, la puissance minimum P_{min} n'étant pas nulle et l'amplitude de modulation étant réduite, ce qui dégrade le facteur d'échelle du système interférométrique.

[0096] Dans le cas d'un interféromètre de Sagnac, ce problème technique de dégradation du facteur d'échelle se produit aussi par exemple s'il existe un défaut sur chaque lame quart d'onde 32, 33 aux extrémités de la fibre optique de détection 73. On observe dans ce cas que P_{min} reste proche de zéro et que la valeur de P_{max} est réduite. Par conséquent, l'amplitude $P_{max} - P_{min}$ baisse par comparaison avec un interféromètre de Sagnac utilisant des composants parfaits.

[0097] Ces effets indésirables peuvent être dus à des couplages parasites dans l'interféromètre à fibre optique. Ils peuvent avoir pour origine des instabilités thermiques dans la fibre optique de détection 73 du fait d'un défaut d'orientation ou de retard optique du retardateur optique 42, ou respectivement de chacun des retardateurs optiques 32 et 33.

[0098] Une représentation graphique de l'erreur de mesure de déphasage liée à cette dégradation du facteur d'échelle est illustrée en lien avec les figures 8 et 9. Nous dé-

taillons maintenant la propagation des ondes polarisées dans l'interféromètre à fibre optique en ligne en termes de vecteur de phase en lien avec la [Fig.8], c'est-à-dire dans le cas d'un interféromètre imparfait mais au repos, en absence d'effet Faraday magnéto-optique.

- [0099] En sortie du modulateur optique différentiel de phase 16, dans le sens retour, notons A_{1122} la première onde monomode polarisée, c'est-à-dire l'onde principale passant polarisée TE (ou en « 1 ») dans le modulateur optique différentiel de phase 16 dans le sens aller, polarisée circulaire droite (en « 1 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens aller et polarisée circulaire gauche (en « 2 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens retour et polarisée TM (en « 2 ») dans le modulateur optique différentiel de phase 16 dans le sens retour. En sortie du modulateur optique différentiel de phase 16, dans le sens retour, notons A_{2211} la deuxième onde monomode polarisée, c'est-à-dire l'onde principale passant polarisée TM (en « 2 ») dans le modulateur optique différentiel de phase 16 dans le sens aller, polarisée circulaire gauche (en « 2 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens aller puis polarisée circulaire droite (en « 1 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens retour et polarisée TE (en « 1 ») dans le modulateur optique différentiel de phase 16 dans le sens retour.
- [0100] La recombinaison de la première onde A_{1122} et la deuxième onde A_{2211} forme le signal interférométrique principal.
- [0101] Toutefois, en cas de défaut d'alignement de l'interféromètre, il existe 6 autres ondes parasites : deux ondes résultant de couplages doubles (troisième et quatrième onde) et quatre autres ondes résultant de couplages simples (cinquième à huitième onde).
- [0102] La troisième onde A_{1212} est l'onde passant polarisée TE (en « 1 ») dans le modulateur optique différentiel de phase 16 dans le sens aller, polarisée circulaire gauche (en « 2 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens aller, polarisée circulaire droite (en « 1 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens retour et polarisée TM (en « 2 ») dans le modulateur optique différentiel de phase 16 dans le sens retour.
- [0103] La quatrième onde A_{2121} est l'onde passant polarisée TM (en « 2 ») dans le modulateur optique différentiel de phase 16 dans le sens aller, polarisée circulaire droite (en « 1 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens aller, polarisée circulaire gauche (en « 2 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens retour et polarisée TE (en « 1 ») dans le modulateur optique différentiel de phase 16 dans le sens retour.
- [0104] La troisième onde A_{1212} et la quatrième onde A_{2121} sont cohérentes avec la première onde A_{1122} et la deuxième onde A_{2211} car elles voient exactement les mêmes déphasages. De plus, la troisième onde A_{1212} et la quatrième onde A_{2121} sont modulées de façon similaire au signal principal, ce sont ces deux ondes qui créent un problème de facteur d'échelle.

- [0105] Il existe aussi une cinquième onde, notée A_{1211} qui est l'onde passant polarisée TE (en « 1 ») dans le modulateur dans le sens aller, polarisée circulaire gauche (en « 2 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens aller, polarisée circulaire droite (en « 1 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens retour et polarisée TE (en « 1 ») dans le modulateur optique différentiel de phase 16 dans le sens retour.
- [0106] La sixième onde, notée A_{2122} est l'onde passant polarisée TM (en « 2 ») dans le modulateur dans le sens aller, polarisée circulaire droite (en « 1 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens aller, polarisée circulaire gauche (en « 2 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens retour et polarisée TM (en « 2 ») dans le modulateur optique différentiel de phase 16 dans le sens retour.
- [0107] La septième onde, notée A_{1121} est l'onde passant polarisée TE (en « 1 ») dans le modulateur dans le sens aller, polarisée circulaire droite (en « 1 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens aller, polarisée circulaire gauche (en « 2 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens retour et polarisée TE (en « 1 ») dans le modulateur optique différentiel de phase 16 dans le sens retour.
- [0108] La huitième onde, notée A_{2212} est l'onde passant polarisée TM (en « 2 ») dans le modulateur dans le sens aller, polarisée circulaire gauche (en « 2 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens aller, polarisée circulaire droite (en « 1 ») dans la fibre optique de détection 73 dans le sens retour et polarisée TM (en « 2 ») dans le modulateur optique différentiel de phase 16 dans le sens retour.
- [0109] La cinquième onde A_{1211} et la septième onde A_{1121} sont cohérentes entre elles. La sixième onde A_{2122} et la huitième onde A_{2212} sont aussi cohérentes entre elles. Par contre la sixième onde et la huitième onde ne sont pas cohérentes avec la cinquième onde et la septième onde. En effet, on utilise ici une source à large bande spectrale, c'est-à-dire ayant une longueur de cohérence limitée. Les chemins 1 et 2 présentent une différence de longueur de chemin optique supérieure à la longueur de cohérence de la source.
- [0110] Les cinquième à huitième ondes ne créent pas de problème de facteur d'échelle. Par contre, ces ondes peuvent nous renseigner sur la proportion des ondes qui créent un problème de facteur d'échelle. En effet, par conservation de l'énergie, elles sont les complémentaires des ondes qui servent à la mesure.
- [0111] La [Fig.8] représente les première à quatrième ondes, sous forme de vecteurs de phase ou phasors, en absence d'effet Faraday magnéto-optique. La première onde A_{1122} et la deuxième onde A_{2211} ont exactement la même amplitude. La troisième onde A_{1212} et la quatrième onde A_{2121} ont exactement la même amplitude, mais leur amplitude est beaucoup plus faible que celle de la première et de la deuxième onde, puisque la troisième onde A_{1212} et la quatrième onde A_{2121} résultent d'un défaut ou d'un couplage parasite de l'interféromètre. Par conséquent, la résultante 131 de la combinaison de la

première onde A_{1122} et de la troisième onde A_{1212} est d'amplitude réduite par rapport à l'amplitude de la première onde et parallèle à cette première onde. La résultante 124 de la combinaison de la deuxième onde A_{2211} et de la quatrième onde A_{2121} est d'amplitude réduite par rapport à l'amplitude de la deuxième onde, et parallèle à cette deuxième onde.

- [0112] La [Fig.9] représente les première à quatrième ondes sous forme de phasors, en présence d'effet Faraday magnéto-optique. L'effet Faraday magnéto-optique induit un déphasage égal à $\Delta\Phi_F/2$ sur la première onde A_{1122} et un déphasage égal à $-\Delta\Phi_F/2$ sur la deuxième onde A_{2211} . Simultanément, l'effet Faraday magnéto-optique induit aussi un déphasage égal à $\Delta\Phi_F/2$ sur la troisième onde A_{1212} et un déphasage égal à $-\Delta\Phi_F/2$ sur la quatrième onde A_{2121} . La résultante 131 de la combinaison de la première onde A_{1122} et de la troisième onde A_{1212} présente une amplitude et un angle de phase modifiés par rapport à la première onde A_{1122} . De manière analogue, la résultante 124 de la combinaison de la deuxième onde A_{2211} et de la quatrième onde A_{2121} présente une amplitude et un angle de phase modifiés par rapport à la deuxième onde A_{2211} . La [Fig.9] illustre schématiquement l'erreur introduite par les troisième et quatrième ondes sur la mesure de déphasage magnéto-optique. On observe aussi que l'amplitude des ondes résultantes est réduite par rapport à l'amplitude des ondes principales.
- [0113] Cette erreur de mesure de déphasage magnéto-optique induit un défaut dans le facteur d'échelle. Comme on l'a vu plus haut, dans un interféromètre en réflexion parfait, le facteur d'échelle est égal à $4VN$. Dans un interféromètre en réflexion présentant des défauts, le facteur d'échelle est modifié et devient $4VN/\cos(2\gamma)$. Dans un interféromètre de Sagnac, le facteur d'échelle est modifié de manière analogue et devient $2VN/\cos(2\gamma)$.
- [0114] Selon la présente divulgation, l'amplitude de modulation de puissance du faisceau interférométrique détecté, autrement dit $P_{\max}-P_{\min}$ ou $P_{\text{modulée}}$, est proportionnelle à $\cos^2(2\gamma)$, où γ représente l'angle du défaut impactant le facteur d'échelle, et la puissance minimum du faisceau interférométrique détecté, $P_{\min}$, est proportionnelle à $\sin^2(2\gamma)$.
- [0115] A partir d'une mesure de l'amplitude de modulation de puissance du faisceau interférométrique détecté et/ou d'une mesure de la puissance minimum du faisceau interférométrique détecté, on en déduit une mesure de l'angle d'un défaut impactant de facteur d'échelle.
- [0116] En particulier, dans un interféromètre en réflexion, la détection que la puissance minimum $P_{\min}$ est non nulle permet de mettre en évidence un défaut de facteur d'échelle. Par exemple, la puissance arrivant sur le photodétecteur est d'environ $P=30\mu W$ au maximum de puissance. En présence d'un défaut tel que $\cos(2\gamma)=99,5\%$, la puissance minimum est égale à $P_{\min}=P*\sin^2(2\gamma)$, soit 1% de P , c'est-à-dire environ

0,3 μW . L'amplitude de modulation de puissance $P_{\text{max}} - P_{\text{min}}$ est alors égale à 99% de P soit 29,7 μW . Dans un interféromètre en boucle (3^{ème} mode de réalisation), il n'y a pas de variation du minimum mais seulement de l'amplitude $P_{\text{max}} - P_{\text{min}}$.

- [0117] Plus généralement, une mesure de variation de la puissance minimum du faisceau interférométrique détecté ou une mesure de variation d'amplitude de modulation de puissance du faisceau interférométrique détecté permet de mesurer une variation du facteur d'échelle en fonction du temps pour un interféromètre à fibre optique en ligne.
- [0118] En pratique, il existe différentes manières de mesurer la puissance minimum P_{min} et l'amplitude de modulation de puissance du faisceau interférométrique détecté.
- [0119] Nous allons maintenant détailler un système interférométrique avec un exemple de modulation de phase et de démodulation du signal détecté, adapté pour mesurer un signal représentatif d'un défaut d'alignement de l'interféromètre, ce défaut d'alignement étant susceptible de dégrader le facteur d'échelle.
- [0120] Dans le domaine des systèmes interférométriques à base de fibre optique en ligne, on connaît différentes techniques de modulation et de démodulation. Cette modulation est obtenue en appliquant une tension électrique modulée $V_m(t)$ entre les électrodes du modulateur différentiel de phase 16 pour moduler la différence de phase $\Delta\Phi_m(t)$ du signal interférométrique mesuré. Cette modulation permet une mise au biais qui augmente la sensibilité du système interférométrique, notamment pour des mesures de champ magnétique ou de courant électrique de faible amplitude.
- [0121] En particulier, il est connu d'appliquer une modulation dite 2-états, en modulant la tension de modulation V_m en carré entre deux valeurs de paliers, de manière à produire une modulation de la différence de phase sur deux niveaux, par exemple de $\Delta\Phi_b(t) = \pm \pi/2$, dite différence de phase de mise au biais, à la fréquence propre F_p du dispositif à base de fibre optique 400. La fréquence propre F_p est définie de telle manière que $T/2 = 1/(2.F_p) = \Delta\tau$ où T représente la période de la modulation carrée. Ainsi, la demi-période de modulation $T/2$ correspond au temps de parcours $\Delta\tau$ de chaque onde monomode dans le dispositif à base de fibre optique 400. Le système de traitement du signal numérise le faisceau interférométrique détecté et démodule à la fréquence propre F_p le signal détecté en échantillonnant deux mesures de puissance sur chaque période de modulation et en affectant un signe négatif à un premier niveau et un signe positif au niveau suivant.
- [0122] Afin d'étendre et de linéariser la dynamique de réponse d'un système interférométrique, il est aussi connu d'appliquer un signal de contre-réaction.
- [0123] Dans la suite du présent document on entend par niveau (ou niveau de modulation) la valeur asymptotique des différentes valeurs de différence de phase modulée $\Delta\Phi_m$ pour chaque palier de modulation. On entend par états de modulation, les différentes valeurs de puissance P mesurées correspondant aux niveaux de modulation qui s'enchainent

sur chaque période de modulation. Sur une période de modulation, plusieurs états peuvent utiliser un même niveau de modulation.

- [0124] Dans le cadre de la présente divulgation, nous considérons le cas d'une modulation numérique à au moins 4 états, pour permettre de mesurer d'une part le déphasage Faraday magnéto-optique, et d'autre part, la puissance minimum et/ou l'amplitude de modulation de puissance ($P_{\text{Max}}-P_{\text{min}}$).
- [0125] Dans le domaine ci-dessus, le brevet FR2654827_A1 propose d'appliquer une tension de modulation dite 4-états qui génère 4 niveaux successifs de modulation sur chaque période de modulation T égale à $2\Delta\tau$, et d'échantillonner 4 mesures de puissance sur chaque période de modulation. Dans la modulation 4-états, il est aussi possible d'extraire un signal, dit $V\pi$ ou V_{π} , modulé à $2F_p$. Le signal $V\pi$ représente la fonction de transfert du modulateur différentiel de phase, c'est-à-dire le rapport entre la tension appliquée V_m au modulateur et le déphasage Φ_m induit, avec $V\pi/\pi = V_m/\Phi_m$. Or ce signal $V\pi$ fluctue avec l'environnement, par exemple avec la température du modulateur différentiel de phase 16.
- [0126] Dans le domaine des systèmes interférométriques à fibre optique, le brevet EP2005113_B1 décrit une modulation dite 6-états, basée sur 4 niveaux de différence de phase de mise au biais. Cette modulation 6-états peut se décomposer en une superposition d'une première modulation du déphasage $\Phi_m(t)$ de $\pm\pi/2$ à la fréquence propre F_p et d'une seconde modulation du déphasage $\Phi_m(t)$ à $\pm\alpha/2$ à $3F_p$. On échantillonne 6 mesures de puissance sur chaque période de modulation.
- [0127] Le brevet EP2005113_B1 décrit aussi l'utilisation d'une modulation à 8 états et 8 niveaux sur une période totale T égale à $4\Delta\tau$. Selon cette modulation 8-états conventionnelle, la modulation est effectuée d'abord sur 4 états hauts correspondant à $\pm(\alpha + \beta)$ puis sur 4 autres états bas correspondant à $\pm(\alpha - \beta)$. La puissance de sortie P est échantillonnée en 8 mesures P_i correspondant aux 8 états $i = 1, \dots, 8$ par période de modulation.
- [0128] Enfin, la demande de brevet FR 3095053A1 décrit un système basé sur une modulation comportant par période de modulation T au moins huit niveaux de modulation et sur l'acquisition d'au moins 12 mesures de puissance du faisceau interférométrique détecté par période de modulation. Le traitement du signal extrait un signal représentatif de la grandeur à mesurer qui est égal à une somme des mesures de puissance du faisceau interférométrique acquises par période de modulation, chaque mesure étant affectée d'un signe +1 ou -1.
- [0129] De façon avantageuse, l'interféromètre comprend un système de rétroaction adapté pour asservir la mesure du signal représentatif de la grandeur à mesurer, sur la base d'un signal de fonction de transfert du modulateur différentiel de phase et/ou du signal de fonction de transfert du système de détection.

[0130] Dans l'exemple détaillé ici, on utilise un schéma de modulation/démodulation à 8 niveaux et 12 états, basé sur celui de la demande de brevet FR 3 095 053. Le schéma de modulation est illustré sur la [Fig.10]. On rappelle que les modulations en tension et en phase sont homothétiques car on se place à la fréquence propre F_p . Plus précisément, on se base sur une modulation à 8 niveaux de $\Delta\Phi_m(t)$ et 12 états de la puissance $P(t)$ détectée correspondante.

[0131] La modulation est définie dans le tableau I suivant, où α (aussi noté alpha) représente la modulation classique à partir de π et β (aussi noté beta) la surmodulation ajoutée pour moduler sur 8 niveaux :

[Tableaux1]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
modulation	$\Pi-\alpha$	$\Pi+\alpha+\beta$	$-\Pi+\alpha$	$-\Pi-\alpha$	$\Pi-\alpha-\beta$	$\Pi+\alpha$	$-\Pi+\alpha$	$-\Pi-\alpha-\beta$	$\Pi-\alpha$	$\Pi+\alpha$	$-\Pi+\alpha+\beta$	$-\Pi-\alpha$

[0132] Selon un aspect particulier et avantageux, la démodulation des 12 états est définie dans le tableau 2 suivant, qui montre le signe ou le coefficient appliqué à la mesure de chacun des 12 états de puissance pour en déduire les différents signaux. Plus précisément, comme indiqué sur la première ligne du tableau 2, on calcule un signal représentatif du champ magnétique ou du courant électrique, correspondant au déphasage Faraday magnéto-optique. Comme indiqué sur la deuxième ligne du tableau 2, de façon optionnelle, on calcule un signal représentatif du signal $V\pi$ (ou $V\pi$), c'est à dire représentatif de la fonction de transfert du modulateur optique différentiel de phase. Comme indiqué sur la troisième ligne du tableau 2, selon un aspect de la présente divulgation, on calcule un signal représentatif de la puissance modulée. De façon optionnelle, comme indiqué sur la quatrième ligne du tableau 2, on calcule un signal représentatif de la puissance moyenne. La mesure de la puissance moyenne permet de différencier les défauts ou variations de facteur d'échelle des variations de puissance de la source.

[Tableaux2]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Champ magnétique /courant électrique	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-
V_{pi}	0	0	-	+	0	0	0	0	-	+	0	0
Puissance/puissance modulée	0	+	0	0	0	-	0	+	0	0	0	-
moyenne	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

- [0133] On dispose ainsi d'une méthode de modulation-démodulation parfaitement adaptée pour mesurer simultanément, à chaque période de modulation, une mesure de courant électrique ou de champ magnétique et une mesure de la puissance modulée. En option, on calcule en outre une mesure de la puissance moyenne et/ou une mesure du signal V_{π} (ou V_{pi}) représentatif de la fonction de transfert du modulateur différentiel de phase.
- [0134] Nous calculons tout d'abord la réponse de l'interféromètre dans le cas idéal ou sans défaut, par exemple illustré sur la [Fig.1]. Nous montrons ensuite comment un défaut γ de facteur d'échelle affecte les différentes mesures, en boucle ouverte et, respectivement, en boucle fermée.
- [0135] On suppose que la source de lumière 20 émet un faisceau source 100 non polarisé. Le faisceau source 100 a une puissance totale $P_0 = A_0^2$ avec A_0 l'amplitude de l'onde source. Le polariseur 24 en entrée-sortie est par exemple une fibre polarisante, aussi appelée fibre PZ, dont les axes sont parfaitement alignés à 45 degrés des axes de biréfringence du modulateur optique 16 à l'entrée-sortie 25 du circuit optique intégré 34. On suppose que la fibre optique 74 à maintien de polarisation linéaire est parfaite, c'est-à-dire sans défaut de couplage entre modes de polarisation transverses. La fibre optique 74 à maintien de polarisation linéaire est aussi appelée fibre de déport. On suppose que la lame quart d'onde 42 est parfaite et orientée à 45 degrés par rapport aux axes propres de la fibre optique 74 à maintien de polarisation linéaire. La fibre optique de détection 73 à maintien de polarisation torsadée ou twistée au fibrage, est aussi appelée fibre SPUN ou encore fibre capteur car il s'agit de la partie sensible du capteur de champ magnétique ou de courant électrique. On suppose que la fibre capteur (spun) 73 conserve parfaitement la polarisation circulaire droite et, respectivement, la polarisation circulaire gauche. On note ϕ_s le déphasage introduit par le champ magnétique déphasage magnéto-optique.
- [0136] En sortie du polariseur 24 (fibre PZ), la puissance du faisceau lumineux est réduite de

moitié car la source de lumière 20 est non polarisée.

[0137] La puissance P_1 à la sortie de la fibre polarisante 24 est donc égale à :

[Math.4]

$$P_1 = \frac{P_0}{2} = \frac{A_0^2}{2}$$

[0138] L'amplitude de l'onde en sortie du polariseur 24 (à l'entrée du modulateur différentiel de phase) est donc de $A_0/\sqrt{2}$ selon l'axe de polarisation de la fibre PZ 74 et nul sur l'autre axe car on considère ici un polariseur 24 parfait.

[0139] On note θ l'angle entre l'axe de polarisation de la fibre PZ 24 avec l'axe TE du modulateur différentiel de phase 16. On peut maintenant projeter le faisceau polarisé linéairement sur les axe TE et TM du modulateur différentiel de phase 16. On obtient les amplitudes suivantes :

[Math5]

$$A_{TE} = \frac{A_0}{\sqrt{2}} e^{i\alpha} \cdot \cos(\theta) \quad \text{et}$$

$$A_{TM} = \frac{A_0}{\sqrt{2}} e^{i\alpha} \cdot \sin(\theta)$$

[0140] Chaque onde polarisée se propage de façon parfaite dans l'interféromètre sauf au couplage entre le modulateur différentiel de phase 16 et la fibre à maintien de polarisation linéaire 74. On note γ l'angle entre l'axe TE du modulateur différentiel de phase 16 et l'axe rapide ou axe TE de la fibre PM 74.

[0141] Résultat de la démodulation en boucle fermée

[0142] On suppose dans tous les cas que la tension V_{pi} est bien asservie par la démodulation standard car les états démodulés sont similaires à ceux d'un interféromètre à fibre optique en boucle de Sagnac standard dans tous les cas. Seul le bruit est ici différent de celui d'un interféromètre à fibre optique en boucle de Sagnac.

[0143] On applique les calculs directement pour chaque état de modulation (les états 1 à 12 par exemple) avec le signe adéquat indiqué sur la première ligne du Tableau 2. On considère le déphasage magnéto-optique φ_s petit et constant sur une période de modulation $1/F_p$.

[0144] Il en découle que la puissance du courant modulé/démodulé s'exprime comme suit (en absence de défaut γ):

[Math.6]

$$P_{\text{courant d'émulée}}(1/Fp) = \frac{A_0^2 \cdot \sin^2(2\theta)}{4} \cdot (8 \sin(\alpha) + 4 \sin(\alpha + \beta)) \cdot \sin(-4 \cdot \varphi_S - \varphi_r)$$

[0145] En boucle fermée, on asservit de manière à ce que :

[Math.7]

$$\varphi_r = -4 \cdot \varphi_S$$

Où φ_r représente la contre-réaction réalisée à l'aide du modulateur.

[0146] En présence d'un défaut γ affectant le facteur d'échelle, la réponse de l'interféromètre est modifiée. On considère par exemple un défaut d'alignement d'un angle γ de la fibre PM 74 en sortie du modulateur différentiel de phase 16. Dans ce cas, on asservit en boucle fermée selon la relation suivante entre φ_r et φ_S .

[Math.8]

$$\tan(\varphi_r) = \frac{\sin(\varphi_r)}{\cos(\varphi_r)} = - \frac{\sin(4 \cdot \varphi_S) \cdot \cos(2\gamma)}{\cos(4 \cdot \varphi_S) \cdot \left(\frac{1 + \cos^2(2\gamma)}{2} \right) - \frac{\sin^2(2\gamma)}{2}}$$

[0147] Si φ_S est petit et φ_r est petit (c'est à dire de l'ordre de quelques pourcents de 2π), l'expression ci-dessus est modifiée comme suit :

[Math.9]

$$\varphi_r = - \frac{4 \cdot \varphi_S}{\cos(2\gamma)}$$

[0148] Résultat de la démodulation de la puissance modulée en boucle fermée de courant

[0149] On applique les calculs directement pour chacun des 12 états de modulation avec le signe adéquat indiqué à la 3^{ème} ligne du Tableau 2.

[0150] En absence de défaut γ , la puissance modulée/démodulée en boucle fermée de courant s'écrit comme suit :

[0151] [Math.10]

$$P_{\text{puissance modulée/démodulée}}(1/Fp) = \frac{A_0^2 \cdot \sin^2(2\theta)}{4} \cdot \left(4 \cdot \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right)$$

[0152] En présence d'un défaut γ affectant le facteur d'échelle, la puissance modulée/démodulée en boucle fermée de courant est modifiée et s'écrit comme suit :

[Math.11]

$$P_{\text{puissance modulée/démodulée}}(1/Fp) = \frac{A_0^2 \cdot \sin^2(2\theta)}{4} \cdot \left(4 \cdot \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right) \cdot \cos^2(2\gamma)$$

[0153] Il s'ensuit que l'amplitude de modulation $P_{\text{modulé}} = P_{\text{max}} - P_{\text{min}}$ est égale à l'amplitude de modulation en absence de défaut multipliée par $\cos^2(2\gamma)$.

[0154] Si γ est petit et θ proche de 45 degrés, et si ϕ_s est petit et ϕ_r est petit (c'est à dire de l'ordre de quelques pourcents de 2π), on en déduit :
$$\phi_r = -\frac{4 \cdot \phi_s}{\cos(2\gamma)}$$

déduire $4 \cdot \phi_s$ qui est $\phi_r \cdot \cos(2\gamma)$.

[0155] Cette méthode de modulation et de démodulation permet de mesurer le défaut γ à travers la puissance modulée. En effet le facteur d'échelle (FE) dépend uniquement de γ . La puissance modulée dépend de β , α , A_0 , θ , et de γ . Or β et α sont asservis par l'asservissement de la tension V_{pi} . D'autre part A_0 et θ sont relatifs à la puissance totale qui peut être calculée.

[0156] Il est ainsi possible de mesurer précisément et en temps réel le coefficient γ . Cette mesure permet de compenser l'erreur de facteur d'échelle en temps réel, à chaque période de modulation.

[0157] De façon particulièrement avantageuse, à partir de la mesure en temps réel du défaut de facteur d'échelle, le système interférométrique est adapté pour compenser ou corriger les variations du facteur d'échelle en fonction du temps et en temps réel.

[0158] Les variations de facteur d'échelle sont par exemple dues à des défauts d'alignement des fibres et de la lame quart d'onde qui peuvent varier en température.

[0159] Résultat de la démodulation de V_{pi} en boucle fermée de courant

[0160] On applique les calculs directement pour chacun des 12 états de modulation avec le signe adéquat indiqué à la 2ème ligne du Tableau 2 en créant une erreur de V_{pi} par exemple pour l'état 1 : $\pi - \alpha$ devient $(\pi - \alpha) \cdot (1 + \epsilon)$ avec ϵ petit et ainsi de suite pour chacun des autres états.

[0161] En absence de défaut γ , la puissance V_{pi} démodulée s'écrit comme suit :

[Math.12]

$$P_{V_{pi} \text{ démodulée}}(1/F_p) = \frac{A_0^2 \cdot \sin^2(2\theta)}{4} \cdot (4 \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\epsilon \pi))$$

[0162] En présence d'un défaut γ affectant le facteur d'échelle, et si ϕ_s est petit et ϕ_r est petit (c'est à dire de l'ordre de quelques pourcents de 2π), l'expression ci-dessus est modifiée et s'écrit comme suit:

[Math.13]

$$P_{V_{pi} \text{ démodulée}}(1/F_p) = \frac{A_0^2 \cdot \sin^2(2\theta)}{4} \cdot (4 \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\epsilon \pi) \cdot \cos^2(2\gamma))$$

[0163] Lorsqu'on asservit l'interféromètre en boucle fermée sur la tension V_{pi} , on ajuste la tension V_{pi} pour que $P_{V_{pi} \text{ démodulée}}$ soit nulle donc pour que ϵ soit nul. On a ainsi également un contrôle des paramètres α et β par ce paramètre car la puissance de la tension V_{pi} est calculée en temps réel à chaque période de modulation, tous les $1/F_p$.

Or, l'asservissement du Vpi permet de connaître précisément les valeurs de α et β .

[0164] Résultat de la démodulation de la puissance moyenne (++++) en boucle fermée

[0165] La puissance moyenne est démodulée en appliquant aux 12 états de modulation les signes adéquats indiqués à la 4^{ème} ligne du Tableau 2.

[0166] En absence de défaut γ , la puissance moyenne démodulée s'exprime comme suit :
[Math.14]

$$P_{\text{moyennedémodulée}}(1/Fp) = \frac{A_0^2 \cdot \sin^2(2\theta)}{4} \cdot (12 - (8 \cos(\alpha) + 4 \cos(\alpha + \beta)))$$

[0167] En présence d'un défaut γ affectant le facteur d'échelle, l'expression de la puissance moyenne est modifiée et s'écrit comme suit :
[Math.15]

$$P_{\text{moyennedémodulée}}(1/Fp) = \frac{A_0^2 \cdot \sin^2(2\theta)}{4} \cdot (8 \cos(\alpha) + 4 \cos(\alpha + \beta)) \cdot \frac{\sin(4\varphi_S)}{\sin(\varphi_r)} \cdot \cos(2\gamma) + 3 A_0^2 (\sin^2(2\theta) + \cos^2(2\theta) \cdot \sin^2(2\gamma) \cdot (1 + \cos(4\varphi_S)))$$

[0168] On suppose ici que le défaut γ a été déterminé à partir de la modulation de la puissance modulée, comme indiqué au paragraphe résultat de démodulation de la puissance modulée en boucle fermée de courant. La démodulation de la puissance moyenne permet par exemple de déterminer les variations de la puissance de la source A_0 en fonction du temps et de θ .

[0169] Les calculs ci-dessus s'appliquent à une modulation à 12 états pour un capteur de courant sans défaut et pour un défaut de couplage de la fibre PM de déport sur le modulateur différentiel de phase. L'homme du métier appréciera que des calculs similaires s'appliquent également aux défauts de la lame quart d'onde, ou à un défaut de biréfringence, ou à tout autre défaut de l'interféromètre.

[0170] La méthode décrite ci-dessus permet aussi d'en déduire une mesure de la température du retardateur optique 42, par exemple une lame quart d'onde.

[0171] En effet, la tension Vpi est une bonne mesure de la température au niveau du circuit optique intégré 34, qui permet donc de contrôler la température du circuit optique intégré 34 et de la boîte électrique 35.

[0172] A cet effet, on décale volontairement la lame quart d'onde pour créer un défaut γ important mais encore petit, compris entre 0,1% et quelques %, par exemple 5%. Une variation de la température au niveau de la lame quart d'onde provoque une variation de γ . De façon particulièrement avantageuse, la lame quart d'onde est décalée suffisamment pour rendre l'évolution monotone et linéaire en fonction des variations de température, qu'il est ainsi aisé de mesurer.

[0173] La mesure des variations de γ donne une information sur la température au niveau de la lame quart d'onde. Par apprentissage et calibration, il est ainsi possible de

compenser les défauts et même les variations de la constante de Verdet de la fibre optique de détection 73.

[0174] Bien entendu, diverses autres modifications peuvent être apportées à l'invention dans le cadre des revendications annexées.

Revendications

- [Revendication 1] Interféromètre à fibre optique comprenant une source (20) de lumière apte à générer un faisceau source (100), un modulateur différentiel de phase (16), un dispositif (400) à base de fibre optique, un système de détection (18), un système de traitement du signal (900), le dispositif (400) à base de fibre optique comprenant une fibre optique de détection (73) présentant une constante de Verdet apte à induire un effet Faraday magnéto-optique non réciproque, la fibre optique de détection (73) étant disposée dans un champ magnétique ou formant au moins un tour autour d'un conducteur électrique (120), l'interféromètre à fibre optique étant apte à détecter une différence de phase d'un faisceau interférométrique (300) formé par interférences entre deux ondes lumineuses polarisées (111, 112) ayant parcouru simultanément la fibre optique de détection (73) suivant un chemin optique fermé, les deux ondes lumineuses polarisées (111, 112) étant modulées par le modulateur différentiel de phase, et à en déduire, par division de la différence de phase par un facteur d'échelle, une valeur du champ magnétique intégré le long du chemin optique fermé ou une valeur d'un courant électrique passant dans le conducteur électrique (120), le facteur d'échelle étant proportionnel à la constante de Verdet de la fibre optique (73), caractérisé en ce que le système de traitement du signal (900) est adapté et configuré pour mesurer une variation de contraste de puissance d'une partie du faisceau interférométrique modulé par le modulateur différentiel de phase et pour déduire de la variation de contraste une mesure de variation du facteur d'échelle.
- [Revendication 2] Interféromètre à fibre optique selon la revendication 1 dans lequel le système de traitement du signal (900) est adapté et configuré pour mesurer un minimum de puissance de la partie du faisceau interférométrique modulé détecté et/ou une différence entre un maximum et un minimum de puissance de la partie du faisceau interférométrique modulé détecté.
- [Revendication 3] Interféromètre à fibre optique selon la revendication 1 ou 2 dans lequel le système de traitement du signal (900) est adapté et configuré pour corriger en temps réel le facteur d'échelle en fonction de la mesure de variation du facteur d'échelle.
- [Revendication 4] Interféromètre à fibre optique selon l'une des revendications 1 à 3 dans lequel la fibre optique de détection (73) est à maintien de polarisation

circulaire, le dispositif (400) à base de fibre optique comprenant un retardateur optique de phase (42) et un réflecteur (26), le retardateur optique de phase (42) étant disposé à une extrémité de la fibre optique de détection (73) et le réflecteur (26) à une autre extrémité de la fibre optique de détection (73), l'interféromètre étant configuré de façon à ce que les deux ondes lumineuses polarisées (111, 112) parcourent la fibre optique de détection (73) suivant un aller-retour avec deux états orthogonaux de polarisation circulaire s'inversant par réflexion sur le réflecteur (26).

[Revendication 5]

Interféromètre à fibre optique selon la revendication 4 dans lequel le modulateur différentiel de phase (16) est un modulateur électro-optique de biréfringence qui comprend un seul guide d'onde apte à guider deux états orthogonaux de polarisations linéaires orientées suivant deux axes perpendiculaires, l'interféromètre comportant un polariseur (24) disposé entre la source (20) de lumière et le modulateur électro-optique de biréfringence (16), le polariseur étant orienté à 45 degrés des axes du modulateur électro-optique de biréfringence (16), et dans lequel une extrémité du modulateur électro-optique de biréfringence est reliée au dispositif (400) à base de fibre optique.

[Revendication 6]

Interféromètre à fibre optique selon la revendication 4 comprenant un séparateur à jonction Y disposé entre la source (20) de lumière et le modulateur différentiel de phase (16), dans lequel le modulateur différentiel de phase (16) comprend deux guides d'onde aptes à guider deux faisceaux de même polarisation linéaire et ayant chacun un modulateur de phase, et dans lequel le dispositif à base de fibre optique (400) comporte une section de fibre optique (71) à maintien de polarisation et une autre section de fibre optique (72) à maintien de polarisation, la section de fibre optique (71), et respectivement, l'autre section de fibre optique (72), étant reliée chacune, d'une part, à un des deux guides d'onde du modulateur différentiel de phase (16) et, d'autre part, à un coupleur-séparateur de polarisation (27), l'autre section de fibre optique (72) étant orientée de manière à faire tourner une polarisation linéaire de 90 degrés.

[Revendication 7]

Interféromètre à fibre optique selon l'une des revendications 1 à 3 dans lequel la fibre optique de détection (73) est à maintien de polarisation circulaire, le dispositif (400) à base de fibre optique comprenant un séparateur à jonction Y disposé entre la source (20) de lumière et le modulateur différentiel de phase (16), dans lequel le modulateur différentiel

de phase (16) comprend deux guides d'onde aptes à guider deux faisceaux de même polarisation linéaire, et dans lequel le dispositif à base de fibre optique (400) comporte une section de fibre optique (71) à maintien de polarisation, un retardateur optique de phase (32), une autre section de fibre optique (72) à maintien de polarisation, et un autre retardateur optique de phase (33), la section de fibre optique (71), et respectivement, l'autre section de fibre optique (72), étant reliée chacune, d'une part, à un des deux guides d'onde du modulateur différentiel de phase (16) et, d'autre part, au retardateur optique de phase (32), respectivement, à l'autre retardateur optique de phase (33), le retardateur optique de phase (32) étant disposé à une extrémité de la fibre optique de détection (73) et l'autre retardateur optique de phase (33) étant disposé à une autre extrémité de la fibre optique de détection (73), l'interféromètre étant configuré de façon à ce que les deux ondes lumineuses polarisées (111, 112) parcourent la fibre optique de détection (73) en sens opposés avec un même état de polarisation circulaire.

[Revendication 8] Interféromètre à fibre optique selon l'une des revendications 4 à 7 dans lequel le retardateur optique de phase (42, 32), et/ou respectivement l'autre retardateur optique de phase (33), forment chacun une lame quart d'onde à une longueur d'onde du faisceau source (100).

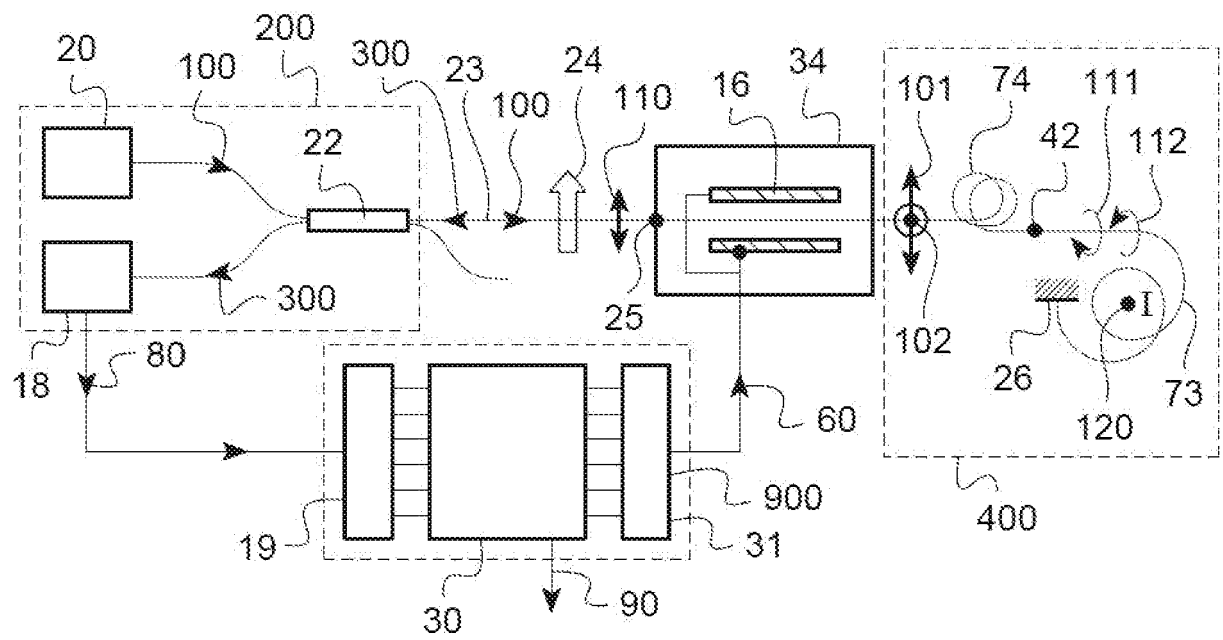
[Revendication 9] Interféromètre à fibre optique selon la revendication 8 dans lequel le retardateur optique de phase (42, 32) et/ou respectivement l'autre retardateur optique de phase (33), est décalé de manière à introduire un défaut, et dans lequel le système de traitement du signal (900) est adapté pour extraire du signal interférométrique détecté une mesure de variation du facteur d'échelle du système et en déduire une variation de température du retardateur optique de phase (42, 32), respectivement de l'autre retardateur optique de phase (33).

[Revendication 10] Procédé de mesure de champ magnétique ou de courant électrique basé sur un interféromètre à fibre optique selon l'une des revendications 1 à 9, le procédé comprenant les étapes suivantes :

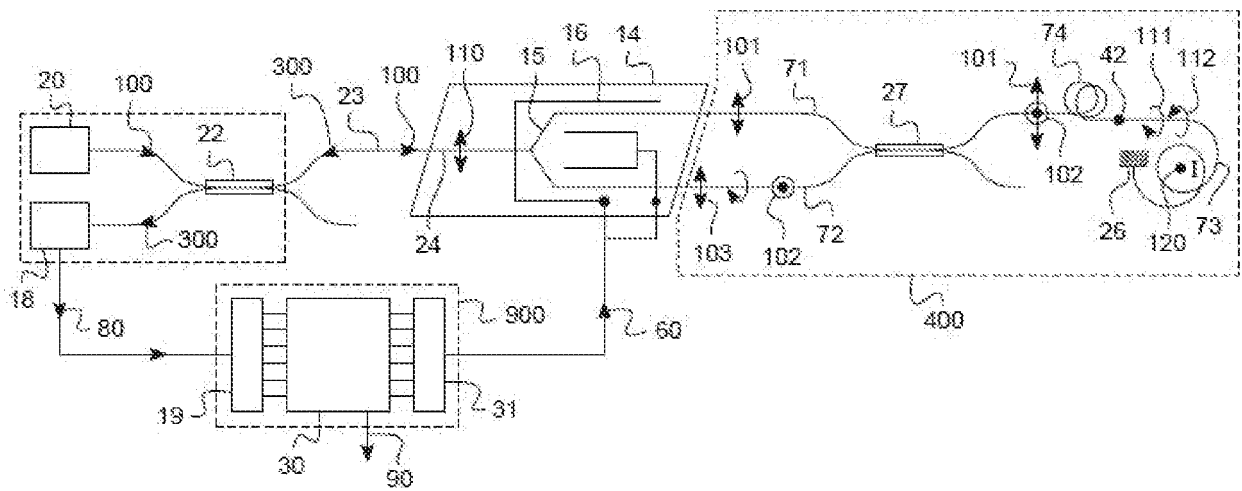
- émission d'un faisceau source (100) issu d'une source (20) de lumière,
- séparation du faisceau source en deux ondes lumineuses polarisées ;
- modulation différentielle de phase des deux ondes lumineuses polarisées ;

- transmission des deux ondes lumineuses polarisées à un dispositif à base de fibre optique comprenant une fibre optique de détection (73) de façon à ce que les deux ondes lumineuses polarisées (111, 112) parcourent simultanément la fibre optique (73) suivant un chemin optique fermé, la fibre optique de détection (73) présentant une constante de Verdet apte à induire un effet Faraday magnéto-optique non-réciproque, la fibre optique de détection (73) étant disposée dans un champ magnétique ou formant au moins un tour autour d'un conducteur électrique (120),
- recombinaison des deux ondes lumineuses polarisées (111, 112) en sortie du dispositif (400) à base de fibre optique pour former un faisceau interférométrique (300),
- détection du faisceau interférométrique (300) ; et
- traitement du signal détecté pour extraire une mesure d'une différence de phase du faisceau interférométrique (300) et pour déduire, par division de la différence de phase par un facteur d'échelle, une valeur du champ magnétique intégré le long du chemin optique fermé ou une valeur d'un courant électrique passant dans le conducteur électrique (120),
- caractérisé en ce que :
- le traitement du signal est adapté et configuré pour mesurer une variation de contraste de puissance d'une partie du faisceau interférométrique modulé par le modulateur différentiel de phase et pour déduire de la variation de contraste une mesure de variation du facteur d'échelle.

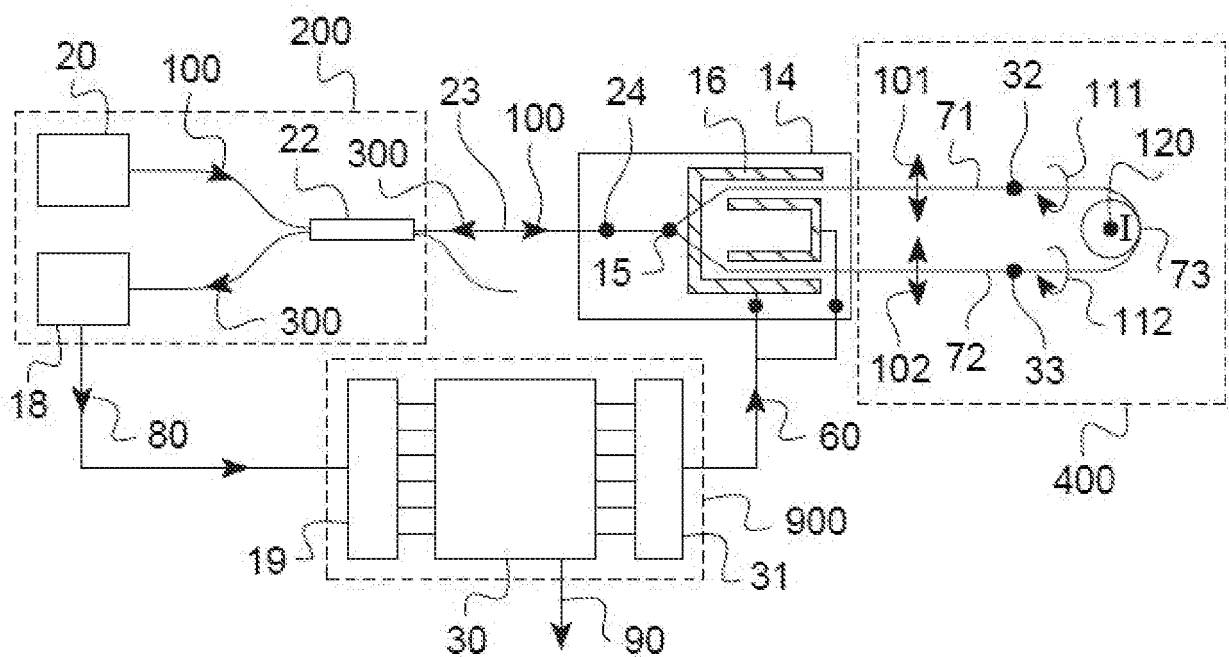
[Fig. 1]



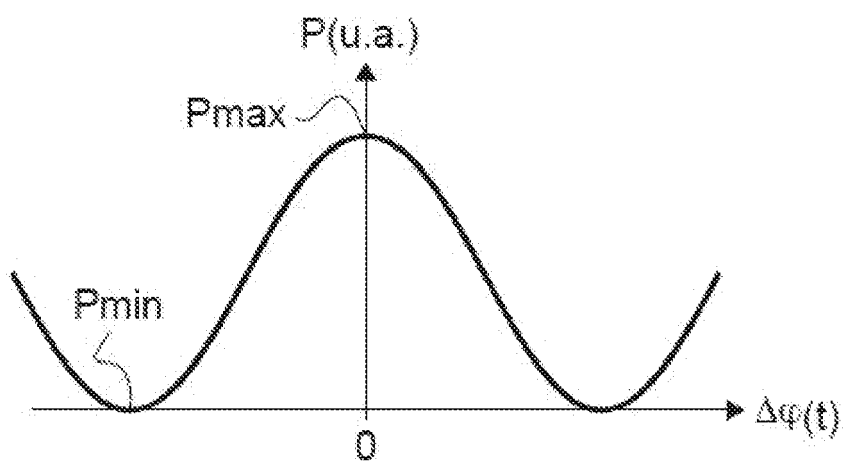
[Fig. 2]



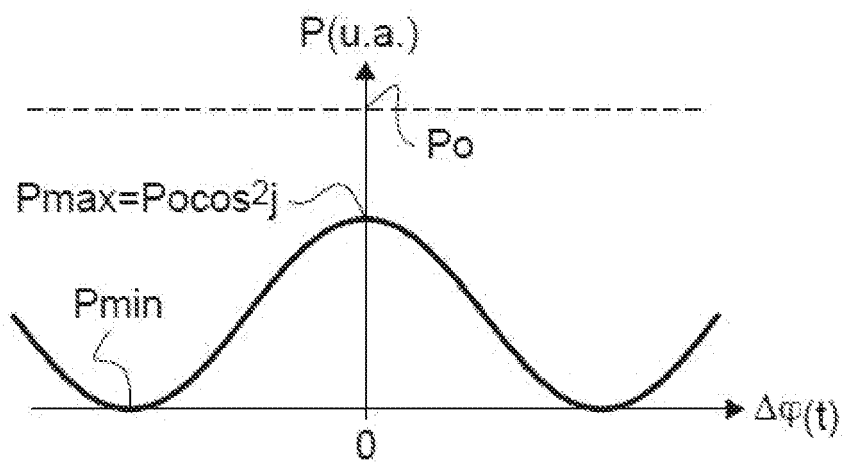
[Fig. 3]



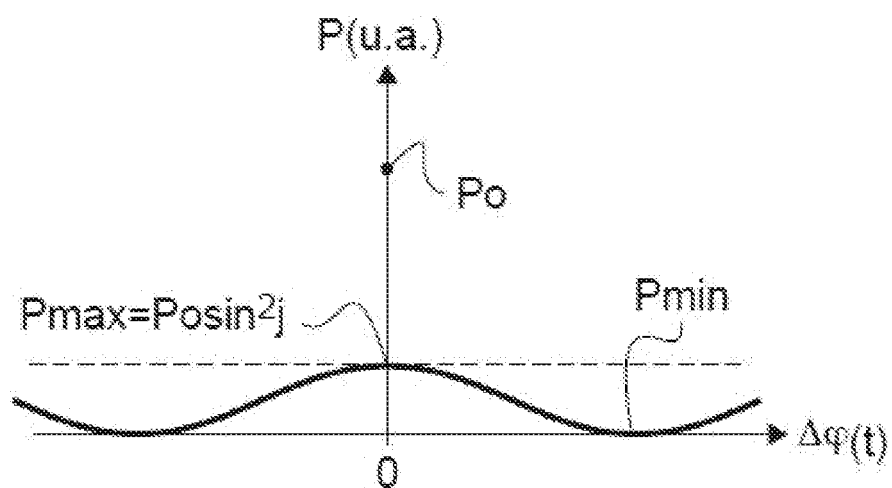
[Fig. 4]



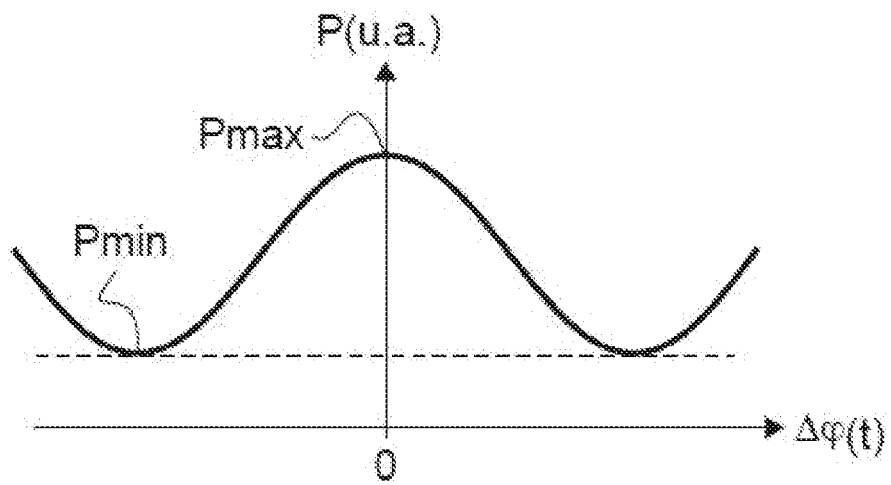
[Fig. 5]



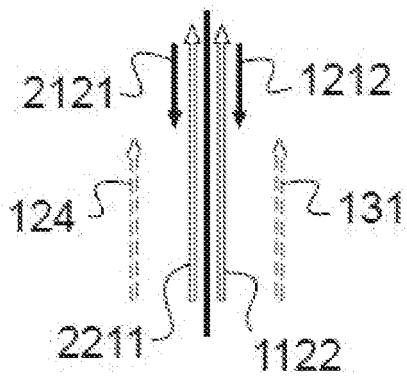
[Fig. 6]



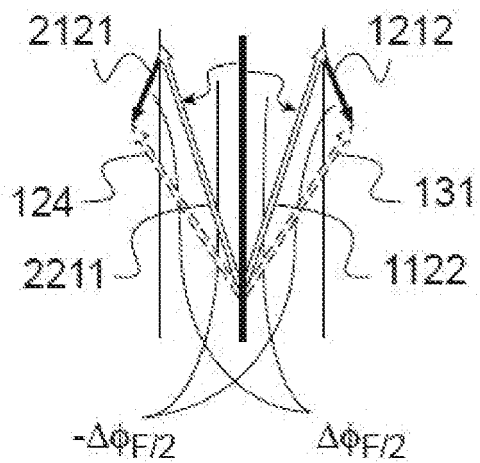
[Fig. 7]



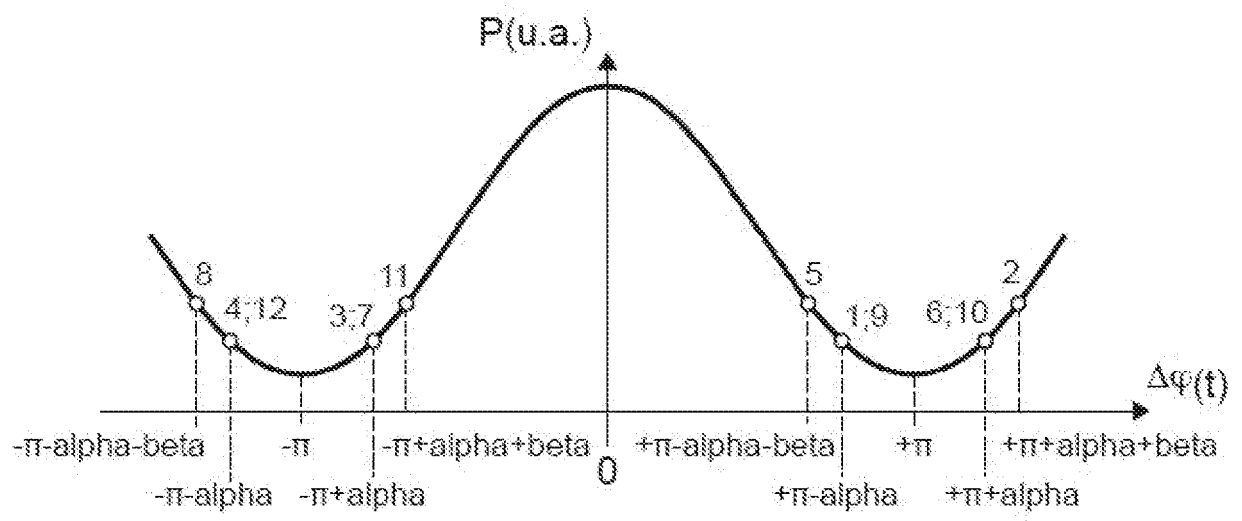
[Fig. 8]



[Fig. 9]



[Fig. 10]



ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2201526 FA 905840**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
 Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **10-10-2022**
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication		Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 5987195	A	16-11-1999	AU	9678498 A	23-04-1999
			BR	9815403 A	27-11-2001
			EP	1019745 A1	19-07-2000
			JP	2001518626 A	16-10-2001
			US	5987195 A	16-11-1999
			WO	9917129 A1	08-04-1999

US 2012283969	A1	08-11-2012	AU	2009356476 A1	21-06-2012
			CN	102667502 A	12-09-2012
			EP	2510364 A1	17-10-2012
			JP	2013513785 A	22-04-2013
			US	2012283969 A1	08-11-2012
			WO	2011069558 A1	16-06-2011

EP 1115000	B1	27-12-2006	AT	349706 T	15-01-2007
			CA	2329963 A1	05-07-2001
			CN	1308237 A	15-08-2001
			DE	10000306 A1	12-07-2001
			EP	1115000 A2	11-07-2001
			US	2001050551 A1	13-12-2001
