

⑫ **BREVET D'INVENTION** **B1**

⑤④ Procédé et dispositif de gestion d'une signature magnétique d'un navire, produit programme d'ordinateur et médium de stockage correspondants.

②② Date de dépôt : 13.12.22.

③③ Priorité :

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *ECA ROBOTICS Société par actions
simplifiée à associé unique — FR.*

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 14.06.24 Bulletin 24/24.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 29.11.24 Bulletin 24/48.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦② Inventeur(s) : MONTAGU Thierry et CHÉREAU
Vinciane.

⑦③ Titulaire(s) : ECA ROBOTICS Société par actions
simplifiée à associé unique.

⑦④ Mandataire(s) : SANTARELLI (Société Ipside).



Description

Titre de l'invention : Procédé et dispositif de gestion d'une signature magnétique d'un navire, produit programme d'ordinateur et médium de stockage correspondants

1. DOMAINE TECHNIQUE

- [0001] Le domaine de l'invention est celui du magnétisme des navires (bâtiments navals).
- [0002] L'invention se rapporte plus particulièrement à un procédé et un dispositif de gestion d'une signature magnétique d'un navire.
- [0003] L'invention a ainsi de nombreuses applications, notamment, mais non exclusivement, la prédiction de la signature d'un navire et la compensation de la signature d'un navire.
- [0004] De façon générale, la signature magnétique d'un navire de surface correspond au champ total sur une ligne ou un plan de référence situé sous la quille à une distance égale à la largeur du navire. Elle dépend de la position du navire sur le globe terrestre et de son orientation. Elle représente la déformation du champ magnétique terrestre par l'aimantation du navire.
- [0005] La connaissance et la réduction de la signature magnétique d'un navire (notamment militaire) est cruciale pour assurer sa sécurité en approche des côtes (zone potentiellement minée) et, dans le cas particulier d'un sous-marin, c'est sa discrétion qui est directement impactée (détection par un aéronef/drone). Il est donc primordial d'avoir un moyen de mesurer cette signature magnétique.
- [0006] Cette mesure n'est cependant pas suffisante et un passage par une modélisation est indispensable pour pouvoir prédire la signature magnétique à un endroit (position géographique) différent du globe et/ou à une distance du navire différente et/ou à une attitude du navire différente, la signature magnétique dépendant entre autres du champ magnétique terrestre local et de l'orientation du navire dans celui-ci.
- [0007] L'attitude du navire est définie par le roulis, le tangage et le cap magnétique, qui correspondent à trois rotations autour des trois axes orthogonaux conventionnels définis pour le navire. Plus précisément, les coordonnées du navire sont rapportées à un trièdre orthogonal direct dont l'axe des x est orienté vers la proue, l'axe des y vers tribord et l'axe des z vers le bas. Dans un tel système, le roulis correspond à des rotations autour de l'axe des x (positives quand le navire gîte vers tribord), le tangage correspond à des rotations autour de l'axe des y (positives quand la proue pointe vers le haut) et les variations de cap (aussi appelées « lacets ») correspondent à des rotations autour de l'axe des z (positives dans le sens des aiguilles d'une montre).
- [0008] Le cap magnétique (aussi appelé cap géomagnétique) d'un navire est l'angle exprimé en degrés (de 0 à 360°), dans le sens des aiguilles d'une montre, entre la direction du

nord magnétique et la ligne de foi du navire (c'est-à-dire la direction dans laquelle pointe l'étrave du navire, selon l'axe longitudinal du navire).

- [0009] Le cap magnétique d'un navire peut être obtenu soit directement (par exemple avec un magnétomètre), soit indirectement (par exemple par calcul à partir du cap compas ou du cap géographique).
- [0010] Le cap compas d'un navire est le cap indiqué par le compas, c'est-à-dire l'angle entre le nord du compas et la ligne de foi du navire. La différence angulaire entre le nord du compas et le nord magnétique est appelée déviation.
- [0011] Le cap géographique (aussi appelé cap vrai) d'un navire est l'angle entre le nord géographique (aussi appelé nord vrai) et la ligne de foi du navire. La différence angulaire entre le nord géographique et le nord magnétique est appelée déclinaison.
- [0012] Au-delà de la prédiction de la signature magnétique du navire, la connaissance de celle-ci permet de déterminer quelles actions sont à mener pour la réduire. Ceci peut se faire notamment par un système d'immunisation (aussi appelé « système de degaussing ») embarqué à bord du navire et constitué de boucles de courants. Pour assurer la réduction de la signature magnétique, il faut régler le système d'immunisation (en général ceci est effectué sur une station de mesure) et, là aussi, par modélisation, distribuer correctement les courants des boucles (aussi appelés « courants de degaussing ») en fonction de la signature prédite (fonction des limites de localisation (champ terrestre), de distance et d'attitude).

2. ARRIÈRE-PLAN TECHNOLOGIQUE

- [0013] Les techniques utilisées actuellement permettent de déterminer un modèle magnétique du navire en moments magnétiques, par résolution d'un problème inverse (c'est-à-dire un problème mathématique dit « inverse ») visant à déterminer des moments magnétiques du navire à partir de mesures de champs magnétiques et d'informations associées (position géographique du capteur effectuant la mesure, cap magnétique du navire et une distance par rapport au navire).
- [0014] Une telle détermination d'un modèle magnétique du navire par résolution d'un problème inverse (aussi appelée « modélisation inverse » ou encore « modélisation selon le modèle inverse ») est décrite par exemple dans la demande de brevet WO2017064432A1.
- [0015] Mais les méthodes mathématiques employées (notamment la méthode des moindres carrés) ne mènent pas à une solution unique car le problème est mal posé (de petites variations dans les champs mesurés peuvent changer drastiquement la solution calculée).
- [0016] En effet, la philosophie de modélisation du navire et de réglage du système de degaussing et la logique d'interprétation, employées depuis des dizaines d'années par les experts dans le domaine du magnétisme du navire, n'ont jamais été explicitement

traduites mathématiquement dans le domaine des moments magnétiques pour la résolution du problème de modélisation et de réglage du système de degaussing. En effet, le navire est communément modélisé par un plan de moments magnétiques (dipôles ; sources élémentaires de magnétisme) et les méthodes mathématiques employées tentent de trouver la valeur de chacun de ces moments. Plus précisément, dans l'état de l'art, les méthodes habituelles cherchent à trouver la valeur et la direction de chacune des sources également réparties en minimisant un critère entre la mesure réelle de champ magnétique et la mesure reconstruite, en considérant que toutes les sources potentielles ont une existence (c'est-à-dire une valeur non nulle).

- [0017] La solution trouvée est ainsi correcte mathématiquement mais a très peu de chance d'avoir une signification physique (dépend beaucoup du type de régularisation employée pour la résolution du problème inverse). Or, il n'y a qu'une solution qui satisfasse la physique et ce problème impose de repasser dans le domaine des champs magnétiques pour prédire la signature et régler le système de degaussing. Il y a donc un risque de mauvaise interprétation du champ magnétique (notamment, il y a un risque de compenser un moment magnétique selon un axe par des boucles de degaussing selon les autres axes) et ceci réserve l'exploitation de la prédiction et du réglage du système de degaussing à une poignée d'experts à travers le monde. Sans expert, et c'est notamment le cas pour exploiter une station de mesure portable embarquée à bord du navire, il n'est plus possible de correctement exploiter les mesures.
- [0018] En résumé, les modélisations actuelles souffrent de donner une solution mathématiquement correcte mais cette solution n'étant pas unique, elle n'a aucune raison d'être proche de la réalité physique et cela contraint la capacité à prédire la signature magnétique du navire et le risque de détection à une zone proche de la mesure initiale et, pour le réglage du système de degaussing, ne permet pas un réglage automatique simple ni un réglage en dehors de cette même zone.
- [0019] L'utilisation de méthodes mathématiques différentes (méthodes bayésiennes, notamment) a commencé depuis quelques années, mais pour le moment, ces méthodes venant de la statistique ont été exploitées juste pour le complément d'information qu'elles apportent (écart type, estimation de l'erreur,...). Les auteurs continuent à chercher les moments magnétiques également répartis dans le plan de modélisation et à repasser dans le domaine des champs magnétiques pour la prédiction de signature et le réglage du système de degaussing.
- [0020] Afin d'illustrer le fait que la modélisation, la prédiction de signature et le réglage des courants de degaussing passent aujourd'hui inexorablement par le domaine des champs magnétiques, on présente maintenant, en relation avec la [Fig.1], un procédé de gestion d'une signature magnétique d'un navire selon un mode de réalisation particulier de l'art antérieur.

- [0021] Dans une étape 11, pour un cap magnétique donné, le dispositif (exécutant le procédé) obtient des mesures de champs magnétiques associées chacune à des informations comprenant une position géographique, le cap magnétique donné du navire et une distance par rapport au navire.
- [0022] Dans une étape 12, pour le cap magnétique donné précité (voir étape 11), le dispositif détermine un modèle magnétique du navire en moments magnétiques, par résolution d'un problème inverse visant à déterminer des moments magnétiques du navire à partir des mesures de champs magnétiques et des informations associées.
- [0023] Dans une étape 13, pour le cap magnétique donné précité (voir étapes 11 et 12), le dispositif détermine une signature magnétique du navire, en fonction du modèle magnétique du navire. En d'autres termes, le dispositif repasse dans le domaine des champs magnétiques. La signature magnétique déterminée à l'étape 13 est valable uniquement pour le jeu d'informations associées aux mesures de champs magnétiques (même position géographique, même cap magnétique du navire et même distance par rapport au navire).
- [0024] Comme indiqué par le cadre référencé 10, les étapes 11, 12 et 13 sont itérées pour chacun d'une pluralité de N caps magnétiques (généralement on considère les quatre ($N = 4$) caps magnétiques particuliers suivants : cap magnétique nord (quand le cap magnétique est égal à 0°), cap magnétique sud (quand le cap magnétique est égal à 180°), cap magnétique est (quand le cap magnétique est égal à 90°) et cap magnétique ouest (quand le cap magnétique est égal à 270°)). On obtient ainsi une signature magnétique du navire pour chacun de cette pluralité de caps magnétiques. En d'autres termes, on obtient une « signature à différents caps magnétiques » (si N est supérieur à 1).
- [0025] Dans une étape 14, le dispositif effectue une prédiction de la signature magnétique du navire à une position géographique et/ou un cap magnétique du navire et/ou une distance par rapport au navire autre(s) que celle, celui ou ceux des mesures de champs magnétiques, en fonction de la signature magnétique (domaine des champs magnétiques) pour différents caps magnétiques (résultat des N itérations de l'étape 13 pour les N différents caps magnétiques) et à l'aide d'abaques et d'estimateurs construits par expérimentations.
- [0026] Dans une étape 15, le dispositif effectue une compensation de la signature magnétique du navire à l'aide du système de degaussing (système d'immunisation comprenant des boucles de courant installées à bord du navire). L'étape de compensation 15 comprend elle-même les étapes suivantes :
- détermination à l'étape 16 de l'effet magnétique, dans le domaine des champs magnétiques, des boucles de courant ;

- pour chacune des boucles de courant, détermination à l'étape 17 d'un courant de compensation en fonction de la signature magnétique du navire (celle déterminée à différents caps magnétiques à l'étape 13, ou bien celle prédite à l'étape 14 ; le second cas est symbolisé par la flèche référencée 19) et de l'effet magnétique (en champs magnétiques) des boucles de courant. En d'autres termes, l'étape 17 comprend des opérations d'analyse et de calcul effectuées dans le domaine des champs magnétiques ; et
- application à l'étape 18, sur les boucles de courant, des courants de compensation déterminés.

[0027] Pour plus de détail concernant la compensation de la signature magnétique d'un navire à l'aide d'un système de degaussing, on pourra par exemple se reporter à la demande de brevet WO2017064432A1 déjà mentionnée plus haut, ainsi qu'aux brevets EP0597014B1 et US6965505B1.

3. RÉSUMÉ

[0028] Dans un mode de réalisation de l'invention, il est proposé un procédé de gestion d'une signature magnétique d'un navire, exécuté par une machine de calcul et comprenant une étape de modélisation magnétique du navire comprenant elle-même :

- obtention de mesures de champs magnétiques associées chacune à des informations comprenant une position géographique, un cap magnétique du navire et une distance par rapport au navire ; et
- détermination d'un modèle en moments magnétiques du navire, par résolution d'un premier problème inverse visant à déterminer des moments magnétiques du navire à partir des mesures de champs magnétiques et des informations associées ;

[0029] la résolution du premier problème inverse étant réalisée avec une première méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse utilisant un a priori favorisant la parcimonie.

[0030] Ainsi, la solution proposée propose une approche tout à fait nouvelle et inventive. En effet, comme indiqué plus haut, la modélisation, la prédiction de signature et le réglage des courants de degaussing passent toujours, dans les solutions connues de l'art antérieur, par le domaine des champs magnétiques. Or le champ magnétique est une conséquence et non la source magnétique, le champ magnétique étant ce que l'on peut mesurer, mais il introduit des complexités et des biais. L'objet de l'invention est justement de pouvoir avoir accès à un modèle du navire en sources magnétiques, c'est-à-dire en moments magnétiques, exploitable pour faire des opérations directement dans ce domaine des moments magnétiques. L'enjeu est en effet qu'un moment magnétique a une direction donnée alors que le champ magnétique qui en résulte est selon les trois axes en fonction de l'endroit où l'on se place pour mesurer. L'objectif recherché

étant de correctement connaître la direction de chacune des sources magnétiques pour prédire correctement le champ magnétique créé par ces sources et ainsi effectuer correctement la prédiction de signature et/ou le réglage des courants de degaussing.

[0031] La solution proposée propose donc d'utiliser une méthode de régularisation parcimonieuse pour déterminer le modèle en moments magnétiques du navire. Du fait qu'elle utilise un a priori favorisant la parcimonie, cette méthode de régularisation parcimonieuse permet de contraindre la résolution du premier problème inverse (celui visant à déterminer des moments magnétiques du navire à partir des mesures de champs magnétiques et des informations associées) de sorte que le modèle magnétique du navire, obtenu en moments magnétiques, soit directement exploitable dans un dispositif utilisable par n'importe quelle personne à bord du navire. En d'autres termes, l'idée de l'invention est que la solution la plus simple est aussi la plus physique : rien ne sert de chercher à mettre absolument dans le modèle des sources magnétiques partout, également réparties, il vaut mieux chercher un nombre plus faible (préférentiellement le minimum) de sources qui expliquent les mesures et donc s'autoriser à annuler certaines sources (ceci est d'ailleurs en cohérence avec le principe de conception (design) d'un système de degaussing, quelques boucles donc moments magnétiques suffisant à compenser un navire). C'est là une différence essentielle avec l'état de l'art, puisque l'utilisation d'une méthode dite parcimonieuse vise justement à modéliser le navire par un nombre restreint de sources magnétiques (moments magnétiques).

[0032] Selon une caractéristique particulière, la première méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse s'appuie sur au moins une des normes λ_0 et λ_1 .

[0033] L'avantage de ces normes λ_0 et λ_1 est de permettre de trouver un nombre restreint de moments magnétiques (propriété de parcimonie).

[0034] Dans la présente description, la norme λ_0 du vecteur $\mathbf{x}$ (qui s'écrit $\|\mathbf{x}\|_0$) compte le nombre d'éléments non nuls du vecteur $\mathbf{x}$. On notera qu'il s'agit d'un abus de langage, et qu'en toute rigueur l'écriture correcte est « norme » λ_0 , car c'est en réalité une pseudo-norme.

[0035] La norme λ_1 d'un vecteur $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ s'écrit : $\|\mathbf{x}\|_1 = \left(\sum_{i=1}^n |x_i| \right)$.

[0036] Plus généralement, on rappelle que pour $p \geq 1$, la norme λ_p d'un vecteur $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ s'écrit : $\|\mathbf{x}\|_p = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}$.

[0037] Selon certains modes de réalisation, le premier problème inverse s'écrit sous une des formes mathématiques suivantes :

[0038] $\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{M}^{Navire}\|_0$ sous la contrainte $\mathbf{B}^{Navire} = \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}$

[0039] $\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{M}^{Navire}\|_1$ sous la contrainte $\mathbf{B}^{Navire} = \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}$

[0040] $\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{B}^{Navire} - \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2 + \lambda_1 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_1$

[0041] $\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{B}^{Navire} - \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2 + \lambda_1 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2$

[0042] $\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{B}^{Navire} - \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2 + \lambda_0 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_0 + \lambda_1 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2$

[0043] avec $\mathbf{M}^{Navire}$ un vecteur des moments magnétiques du navire à estimer, $\mathbf{B}^{Navire}$ un vecteur des mesures de champs magnétiques et $\mathbf{D}$ une matrice de coefficients dépendant des positions associées aux mesures de champs magnétiques.

[0044] Cette liste de formes mathématiques n'est pas exhaustive.

[0045] Dans une implémentation particulière, la première méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse est une méthode bayésienne.

[0046] Un avantage de la méthode bayésienne est qu'elle donne un bon compromis entre vitesse de convergence et qualité d'estimation du vecteur $\mathbf{M}^{Navire}$, et fournit également l'incertitude sur les moments magnétiques estimés. Cependant la présente invention n'est pas limitée à ce type de méthode.

[0047] Selon certains modes de réalisation, le procédé comprend une étape de prédiction de la signature magnétique du navire à une position géographique et/ou un cap magnétique du navire et/ou une distance par rapport au navire autre(s) que celle, celui ou ceux des mesures de champs magnétiques, en fonction du modèle en moments magnétiques du navire.

[0048] Ainsi, le modèle en moments magnétiques du navire (obtenu à l'étape de modélisation) permet de prédire la signature magnétique de navire dans des conditions différentes de celles de la mesure des champs magnétiques (c'est-à-dire à un cap magnétique donné et/ou à une distance donnée et/ou à une localisation donnée autre(s) que ceux de la mesure), et ainsi de donner aux marins à bord du navire une estimation de leur distance de détection par un dispositif ennemi (distance d'approche, profondeur minimale de navigation ou profondeur pour un navire et direction de plongée pour un sous-marin).

[0049] On notera que, contrairement à l'état de l'art, la solution proposée permet une prédiction avec un changement de distance. En effet, du fait que, dans l'invention, le modèle en moments magnétiques du navire résulte de l'utilisation d'une méthode de régularisation parcimonieuse, il est suffisamment proche de la réalité physique (contrairement aux modèles de navire obtenus avec les solutions de l'état de l'art) pour avoir une validité en dehors de la zone de mesure initiale (dans la limite de validité d'un système de degaussing ou, autrement dit, en dehors de la zone dite de champ proche).

- [0050] Selon certains modes de réalisation, le procédé comprend une étape de compensation de la signature magnétique du navire à l'aide d'un système d'immunisation comprenant des boucles de courant installées à bord du navire, l'étape de compensation de la signature magnétique du navire comprenant :
- détermination d'un modèle en moment(s) magnétique(s) de chacune des boucles de courant ;
 - pour chacune des boucles de courant, détermination d'un courant de compensation en fonction du modèle en moments magnétiques du navire et des modèles en moments magnétiques des boucles de courant ; et
 - application, sur les boucles de courant, des courants de compensation déterminés.
- [0051] Ainsi, le modèle en moments magnétiques du navire (obtenu à l'étape de modélisation) permet d'effectuer une compensation de la signature magnétique du navire à l'aide d'un système d'immunisation.
- [0052] Comme déjà mentionné plus haut, dans l'invention, le modèle en moments magnétiques du navire résulte de l'utilisation d'une méthode de régularisation parcimonieuse, il est suffisamment proche de la réalité physique (contrairement aux modèles de navire obtenus avec les solutions de l'état de l'art) pour avoir une validité en dehors de la zone de mesure initiale. Les moments magnétiques étant très directement liés aux courants électriques, et donc aux effets de boucles, ils offrent l'avantage de pouvoir régler les boucles de courants plus facilement et surtout automatiquement, rendant un opérateur lambda autonome.
- [0053] La compensation de la signature magnétique du navire peut donc être effectuée sous la forme d'un réglage automatique des courants de degaussing, avec des quantités physiques en « ampères x mètres² » qui correspondent directement aux caractéristiques des boucles de courant (boucles de compensation magnétique). *In fine*, la méthodologie fournit à l'opérateur des courants (en ampères) à appliquer sur les boucles de compensation existantes.
- [0054] Selon une caractéristique particulière, le calcul des courants de compensation est réalisé par résolution d'un deuxième problème inverse, visant à déterminer les courants de compensation en fonction du modèle en moments magnétiques du navire et des modèles en moments magnétiques des boucles de courant, avec une deuxième méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse utilisant un a priori favorisant la parcimonie.
- [0055] Ainsi, il est proposé d'utiliser une méthode de régularisation parcimonieuse également pour déterminer les courants de compensation (courants de degaussing). Du fait qu'elle utilise un a priori favorisant la parcimonie, une telle méthode de régularisation parcimonieuse permet de contraindre la résolution du deuxième

problème inverse (celui visant à déterminer les courants de compensation en fonction du modèle en moments magnétiques du navire et des modèles en moments magnétiques des boucles de courant) de sorte que la solution est physiquement pertinente.

[0056] Selon une caractéristique particulière, la deuxième méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse s'appuie sur au moins une des normes λ_0 et λ_1 .

[0057] Comme déjà mentionné plus haut, l'avantage de ces normes λ_0 et λ_1 est de faciliter les calculs.

[0058] Selon certains modes de réalisation, le deuxième problème inverse s'écrit sous une des formes mathématiques suivantes :

[0059] $\min_{\mathbf{I}} \|\mathbf{I}\|_0$ sous la contrainte $\mathbf{M}^{Navire} = -\frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles}$

[0060] $\min_{\mathbf{I}} \|\mathbf{I}\|_1$ sous la contrainte $\mathbf{M}^{Navire} = -\frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I}$

[0061] $\min_{\mathbf{I}} \|\mathbf{M}^{Navire} + \frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{I}\|_1$

[0062] $\min_{\mathbf{I}} \|\mathbf{M}^{Navire} + \frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I}\|_2^2 + \lambda_1 \|\mathbf{I}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{I}\|_2^2$

[0063] $\min_{\mathbf{I}} \|\mathbf{M}^{Navire} + \frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I}\|_2^2 + \lambda_0 \|\mathbf{I}\|_0 + \lambda_1 \|\mathbf{I}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{I}\|_2^2$

[0064] avec $\mathbf{I}$ un vecteur des courants de compensation à estimer, $\mathbf{M}^{Boucles}$ une matrice de coefficients dépendant des modèles magnétiques des boucles de courant et I_{ref} un courant de référence (appliqué à chacune des boucles de compensation lors de la mesure des effets de celles-ci).

[0065] Cette liste de formes mathématiques n'est pas exhaustive.

[0066] Dans une implémentation particulière, la deuxième méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse utilise un algorithme de type méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov.

[0067] La présente invention n'est cependant pas limitée à ce type de méthode.

[0068] Dans un autre mode de réalisation de l'invention, il est proposé un produit programme d'ordinateur qui comprend des instructions de code de programme pour la mise en œuvre du procédé précité (dans l'un quelconque de ses différents modes de réalisation), lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

[0069] Dans un autre mode de réalisation de l'invention, il est proposé un médium de stockage lisible par ordinateur et non transitoire, stockant un produit programme d'ordinateur comprenant un jeu d'instructions exécutables par un ordinateur pour mettre en œuvre le procédé précité (dans l'un quelconque de ses différents modes de réalisation).

[0070] Dans un autre mode de réalisation de l'invention, il est proposé un dispositif de gestion d'une signature magnétique d'un navire, le dispositif comprenant une machine de calcul, dédiée ou reprogrammable, configurée pour effectuer une étape de modélisation magnétique du navire comprenant elle-même :

- obtention de mesures de champs magnétiques associées chacune à des informations comprenant une position géographique, un cap magnétique du navire et une distance par rapport au navire ; et
- détermination d'un modèle en moments magnétiques du navire, par résolution d'un premier problème inverse visant à déterminer des moments magnétiques du navire à partir des mesures de champs magnétiques et des informations associées ;

[0071] la résolution du premier problème inverse étant réalisée avec une première méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse utilisant un a priori favorisant la parcimonie.

[0072] Dans des modes de réalisation du dispositif de gestion d'une signature magnétique d'un navire, la machine de calcul est également configurée pour la mise en œuvre d'autre(s) étape(s) (notamment l'étape de prédiction et/ou l'étape de compensation) et/ou caractéristique(s) du procédé précité, dans l'un quelconque de ses différents modes de réalisation.

4. LISTE DES FIGURES

[0073] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description suivante, donnée à titre d'exemple illustratif et non limitatif, en relation avec les dessins annexés, dans lesquels :

[0074] [Fig.1] La [Fig.1], déjà décrite en relation avec l'art antérieur, présente un organigramme d'un procédé de gestion d'une signature magnétique d'un navire selon un mode de réalisation de l'art antérieur ;

[0075] [Fig.2] La [Fig.2] présente un organigramme d'un procédé de gestion d'une signature magnétique d'un navire selon un mode de réalisation particulier de l'invention ; et

[0076] [Fig.3] La [Fig.3] représente un exemple de structure d'un dispositif de gestion d'une signature magnétique d'un navire selon un mode de réalisation de l'invention, permettant la mise en œuvre des étapes du procédé de la [Fig.2].

5. DESCRIPTION DÉTAILLÉE

[0077] Sur toutes les figures du présent document, les éléments et étapes identiques sont désignés par une même référence numérique.

[0078] On présente désormais, en relation avec la [Fig.2], un procédé de gestion d'une signature magnétique d'un navire selon un mode de réalisation particulier de l'invention.

- [0079] Ce procédé est par exemple mis en œuvre par un dispositif 30, tel que décrit ci-dessous en relation avec la [Fig.3]. Dans un mode de réalisation particulier, le dispositif 30 est par exemple intégré dans une station de mesure portable embarquée à bord du navire.
- [0080] Dans une étape 21, le dispositif 30 obtient des mesures de champs magnétiques associées chacune à des informations comprenant une position géographique, un cap magnétique du navire et une distance par rapport au navire.
- [0081] Comme déjà mentionné plus haut, l'information de cap magnétique du navire peut être obtenue soit directement (par exemple avec un magnétomètre), soit indirectement (par exemple par calcul à partir du cap compas ou du cap géographique).
- [0082] Dans une étape 22, le dispositif détermine un modèle en moments magnétiques du navire, par résolution d'un premier problème inverse visant à déterminer des moments magnétiques du navire à partir des mesures de champs magnétiques et des informations associées.
- [0083] Comme détaillé plus bas, la résolution du premier problème inverse est réalisée avec une première méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse utilisant un a priori favorisant la parcimonie.
- [0084] Les étapes 21 et 22 font partie d'une étape 20 de modélisation magnétique du navire, à l'issue de laquelle on obtient un modèle en moments magnétiques du navire, à un cap magnétique.
- [0085] Comme indiqué par le cadre référencé 20, les étapes 21 et 22 sont itérées pour chacun d'une pluralité de N caps magnétiques (généralement on considère les quatre ($N = 4$) caps magnétiques particuliers suivants : cap magnétique nord (quand le cap magnétique est égal à 0°), cap magnétique sud (quand le cap magnétique est égal à 180°), cap magnétique est (quand le cap magnétique est égal à 90°) et cap magnétique ouest (quand le cap magnétique est égal à 270°)). On obtient ainsi un modèle en moments magnétiques du navire pour chacun de cette pluralité de caps magnétiques.
- [0086] Dans une étape 23, le dispositif effectue une prédiction de la signature magnétique du navire à une position géographique et/ou un cap magnétique du navire et/ou une distance par rapport au navire autre(s) que celle, celui ou ceux des mesures de champs magnétiques, en fonction du modèle en moments magnétiques du navire (domaine des moments magnétiques) déterminé à l'étape 22.
- [0087] Dans une étape 24, le dispositif effectue une compensation de la signature magnétique du navire à l'aide d'un système d'immunisation (système de degaussing) comprenant des boucles de courant installées à bord du navire. L'étape de compensation 24 comprend elle-même les étapes suivantes :
- détermination à l'étape 25 d'un modèle en moment(s) magnétique(s) de chacune des boucles de courant, par simple soustraction entre le modèle en

moments magnétiques obtenu pour le navire avec une boucle activée et le modèle en moments magnétiques obtenu pour le navire sans boucle activée ;

- pour chacune des boucles de courant, détermination à l'étape 26 d'un courant de compensation en fonction du modèle en moments magnétiques du navire et des modèles en moments magnétiques des boucles de courant ; et
- application à l'étape 27, sur les boucles de courant, des courants de compensation déterminés.

[0088] Comme détaillé plus bas, dans une implémentation particulière, le calcul des courants de compensation est réalisé par résolution d'un deuxième problème inverse, visant à déterminer les courants de compensation en fonction du modèle en moments magnétiques du navire et des modèles en moments magnétiques des boucles de courant, avec une deuxième méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse utilisant un a priori favorisant la parcimonie.

[0089] On présente maintenant plus en détail divers principes et caractéristiques permettant d'explicitier le procédé de gestion d'une signature magnétique d'un navire de la [Fig.2] et les diverses étapes comprises dans celui-ci.

[0090] Principe général (modélisation magnétique du navire, prédiction et compensation)

[0091] Le navire est considéré comme un plan de dipôles/moments magnétiques. Chaque point de ce plan se décompose ainsi en trois axes et l'ensemble des moments magnétiques associés à certains points de ce plan sont notés comme suit :

- m_L : vecteur des moments selon l'axe longitudinal du navire (nous considérerons un moment positif s'il est orienté vers l'avant) ;
- m_T : vecteur des moments selon l'axe transversal du navire (nous considérerons un moment positif s'il est orienté vers tribord) ; et
- m_V : vecteur des moments selon l'axe vertical du navire (nous considérerons un moment positif s'il est orienté vers le bas).

[0092] La signature magnétique du navire dans le domaine statique est principalement due à deux contributions distinctes :

- l'aimantation permanente : liée aux caractéristiques magnétiques intrinsèques des matériaux ferromagnétiques constitutifs du navire et à leur histoire (rémanence). Cette contribution est considérée comme variant lentement sauf sous certaines conditions particulières. Pour la prédiction de signature et le réglage de degaussing, cette contribution est considérée comme constante ; et
- l'aimantation induite : liée à la présence de matériaux ferromagnétiques dans le champ terrestre. Cette contribution est donc variable selon la localisation du navire (champ terrestre local) et l'attitude du navire (cap magnétique, roulis, tangage).

[0093] On définit ainsi :

[0094] $m_L = m_{Lperm} \pm m_{Lind}$

- m_{Lperm} : vecteur des moments longitudinaux permanents
- m_{Lind} : vecteur des moments longitudinaux induits

[0095] $m_T = m_{Tperm} \pm m_{Tind}$

- m_{Tperm} : vecteur des moments transversaux permanents
- m_{Tind} : vecteur des moments transversaux induits

[0096] $m_V = m_{Vperm} \pm m_{Vind}$

- m_{Vperm} : vecteur des moments verticaux permanents
- m_{Vind} : vecteur des moments verticaux induits.

[0097] La modélisation magnétique du navire va donc consister à estimer les vecteurs de moments (longitudinaux, transversaux et verticaux) et à séparer les deux contributions (permanent et induit).

[0098] Pour cela, dans un système classique, le navire passe sur une station de mesure sous-marine où des capteurs vectoriels tri-axiaux sont alignés et fixes (profondeur de mesure figée) et où le navire passe au-dessus de cette ligne de sorte que des capteurs sont à bâbord et d'autres à tribord. La trace de la signature magnétique sur chacun des capteurs est ainsi récupérée via les trois composantes du champ magnétique mesuré (B_x , B_y , B_z). Cette mesure est réalisée à chacun des quatre caps magnétiques particuliers précités (cap magnétique nord, cap magnétique sud, cap magnétique est et cap magnétique ouest) de sorte que le champ magnétique terrestre local se trouve, pour sa part horizontale, aligné avec un des axes horizontaux du navire (longitudinal ou transversal) pour pouvoir modéliser le navire à partir de ces composantes du champ magnétique :

- Cap magnétique nord : la part permanente est toujours présente et le champ terrestre va induire une aimantation dans l'axe vertical et l'axe longitudinal :

$$\mathbf{m} = m_{Lperm} + m_{Lind} + m_{Tperm} + m_{Vperm} + m_{Vind} ;$$
- Cap magnétique sud : la part permanente est toujours présente et le champ terrestre va induire une aimantation dans l'axe vertical et l'axe longitudinal :

$$\mathbf{m} = m_{Lperm} - m_{Lind} + m_{Tperm} + m_{Vperm} + m_{Vind} ;$$
- Cap magnétique ouest : la part permanente est toujours présente et le champ terrestre va induire une aimantation dans l'axe vertical et l'axe transversal :

$$\mathbf{m} = m_{Lperm} + m_{Tperm} + m_{Tind} + m_{Vperm} + m_{Vind} ; \text{ et}$$
- Cap magnétique est : la part permanente est toujours présente et le champ terrestre va induire une aimantation dans l'axe vertical et l'axe transversal :

$$\mathbf{m} = m_{Lperm} + m_{Tperm} - m_{Tind} + m_{Vperm} + m_{Vind} ;$$

[0099] Sans boucle de compensation du champ terrestre vertical, on ne peut pas éliminer m_{Vind} ,

- [0100] En obtenant les différents moments magnétiques du navire, on peut ainsi recalculer la signature magnétique du navire selon un autre champ terrestre (autre position géographique) et/ou à une orientation différente (autre cap magnétique). En revanche le changement de distance demande à avoir une modélisation proche de la réalité physique (ce que l'invention permet contrairement à l'état de l'art) pour avoir une validité en dehors de la zone de mesure initiale.
- [0101] Pour le système de degaussing, le principe repose sur des boucles de courant positionnées selon l'un des trois axes du navire :
- Boucle L : boucle créant un moment magnétique longitudinal ;
 - Boucle A : boucle créant un moment magnétique transversal ; et
 - Boucle M : boucle créant un moment magnétique vertical.
- [0102] Le nombre de boucles de chaque type (L, A et M) et les caractéristiques de celles-ci dépendent du niveau de réduction de signature magnétique (compensation) désiré.
- [0103] Pour réaliser le réglage du degaussing, on va donc, classiquement, repasser sur la station de mesure à un cap magnétique autant de fois que l'on a de boucles afin de mesurer l'effet magnétique de chacune des boucles à un courant connu I_{ref} . On obtiendra ainsi dans la mesure l'effet magnétique du navire déjà mesuré seul et le champ magnétique créé par la boucle active.
- [0104] Schématiquement, un système de degaussing classique cherche donc à estimer les courants à partir de mesures de champs magnétiques acquises par une station de mesure dans les trois axes B_x , B_y , B_z pour les quatre caps magnétiques particuliers précités (cap magnétique nord, cap magnétique sud, cap magnétique est et cap magnétique ouest).
- [0105] Dans une implémentation particulière, la présente invention vise à régler les courants directement dans l'espace des moments magnétiques au lieu de raisonner en champ magnétique.
- [0106] Principe de fonctionnement d'un système de degaussing
- [0107] Comme indiqué ci-dessus, le système de degaussing est constitué de boucles L, A et M. Considérons par exemple quatre boucles de chaque type. Le réglage consiste donc à trouver les courants à injecter dans chacune des boucles en divisant ce courant en deux parties :
- I_{Xperm} : courant dans la boucle X qui est constant pour compenser une aimantation permanente ; et
 - I_{Xind} : courant dans la boucle X qui est variable pour compenser une aimantation induite. Le réglage est fait sur station de mesure à un champ terrestre local donné. Le système calculera ainsi, par règle de proportionnalité, le courant induit à injecter pour un champ terrestre et une attitude différente (projection du champ terrestre dans le repère navire).

- [0108] Le principe du degaussing est donc de trouver :
- [0109] $I_{L1ind}, I_{L2ind}, I_{L3ind}, I_{L4ind}$ permettant de compenser m_{Lind} ;
- [0110] $I_{L1perm}, I_{L2perm}, I_{L3perm}, I_{L4perm}$ permettant de compenser m_{Lperm} ;
- [0111] $I_{A1ind}, I_{A2ind}, I_{A3ind}, I_{A4ind}$ permettant de compenser m_{Tind} ;
- [0112] $I_{A1perm}, I_{A2perm}, I_{A3perm}, I_{A4perm}$ permettant de compenser m_{Tperm} ;
- [0113] $I_{M1ind}, I_{M2ind}, I_{M3ind}, I_{M4ind}$ permettant de compenser m_{Vind} ; et
- [0114] $I_{M1perm}, I_{M2perm}, I_{M3perm}, I_{M4perm}$ permettant de compenser m_{Vperm} .
- [0115] Définition du problème pour la compensation (système de degaussing)
- [0116] On cherche le modèle magnétique du navire en moments magnétiques :
- [0117] m_{Lind} et m_{Lperm} ;
- [0118] m_{Tind} et m_{Tperm} ; et
- [0119] $m_V = m_{Vperm} \pm m_{Vind}$ (pas séparable sauf si on a une boucle de compensation du champ terrestre vertical sur la station de mesure).
- [0120] Ce modèle est calculé à partir des mesures de champ magnétique (B_x, B_y, B_z) aux quatre caps magnétiques particuliers précités sur X capteurs.
- [0121] Pour le système de degaussing, la mesure de chaque effet de boucle est réalisé à un courant donné (ici I_{ref} qui est le même quelle que soit la boucle, dans la pratique, il peut être différent). On modélise chaque boucle X par un moment m_x (ici un seul mais on pourra en trouver plusieurs, l'important étant qu'une boucle longitudinale (respectivement transversale ou verticale) compense un moment longitudinal (respectivement transversal ou vertical) du navire.
- [0122] On cherche les courants tels que :
- [0123]
- $$m_{Lind} = - \left(\frac{m_{L1}}{I_{ref}} I_{L1ind} + \frac{m_{L2}}{I_{ref}} I_{L2ind} + \frac{m_{L3}}{I_{ref}} I_{L3ind} + \frac{m_{L4}}{I_{ref}} I_{L4ind} \right) U_l \quad (1)$$
- [0124]
- $$m_{Lperm} = - \left(\frac{m_{L1}}{I_{ref}} I_{L1perm} + \frac{m_{L2}}{I_{ref}} I_{L2perm} + \frac{m_{L3}}{I_{ref}} I_{L3perm} + \frac{m_{L4}}{I_{ref}} I_{L4perm} \right) U_l \quad (2)$$
- [0125]
- $$m_{Tind} = - \left(\frac{m_{A1}}{I_{ref}} I_{A1ind} + \frac{m_{A2}}{I_{ref}} I_{A2ind} + \frac{m_{A3}}{I_{ref}} I_{A3ind} + \frac{m_{A4}}{I_{ref}} I_{A4ind} \right) U_t \quad (3)$$
- [0126]
- $$m_{Tperm} = - \left(\frac{m_{A1}}{I_{ref}} I_{A1perm} + \frac{m_{A2}}{I_{ref}} I_{A2perm} + \frac{m_{A3}}{I_{ref}} I_{A3perm} + \frac{m_{A4}}{I_{ref}} I_{A4perm} \right) U_t \quad (4)$$
- [0127]
- $$m_V = - \left(\frac{m_{M1}}{I_{ref}} I_{M1} + \frac{m_{M2}}{I_{ref}} I_{M2} + \frac{m_{M3}}{I_{ref}} I_{M3} + \frac{m_{M4}}{I_{ref}} I_{M4} \right) U_v \quad (5)$$
- [0128] Avec $U_x = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ de dimension $x \times 1$ et l, t, v respectivement le nombre de moments dans le vecteur m_L, m_T et m_V respectivement.

[0129] En notant :

$$[0130] \quad \mathbf{mat_m}_L = \mathbf{U}_l(\mathbf{m}_{L1} \ \mathbf{m}_{L1} \ \mathbf{m}_{L2} \ \mathbf{m}_{L2} \ \mathbf{m}_{L3} \ \mathbf{m}_{L3} \ \mathbf{m}_{L4} \ \mathbf{m}_{L4})$$

$$[0131] \quad \mathbf{mat_m}_A = \mathbf{U}_t(\mathbf{m}_{A1} \ \mathbf{m}_{A1} \ \mathbf{m}_{A2} \ \mathbf{m}_{A2} \ \mathbf{m}_{A3} \ \mathbf{m}_{A3} \ \mathbf{m}_{A4} \ \mathbf{m}_{A4})$$

$$[0132] \quad \mathbf{mat_m}_M = \mathbf{U}_v(\mathbf{m}_{M1} \ \mathbf{m}_{M2} \ \mathbf{m}_{M3} \ \mathbf{m}_{M4})$$

$$[0133] \quad \mathbf{O}_{l-8} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$[0134] \quad \mathbf{O}_{L4} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$[0135] \quad \mathbf{O}_{t-8} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$[0136] \quad \mathbf{O}_{t-4} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$[0137] \quad \mathbf{O}_{v-8} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

[0138] On obtient sous forme matricielle :

[0139]

$$\begin{pmatrix} m_L \\ m_T \\ m_V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{Lind} + m_{Lperm} \\ m_{Tind} + m_{Tperm} \\ m_V \end{pmatrix} = -\frac{1}{I_{ref}} \begin{pmatrix} mat_m_L & O_{l-8} & O_{l-4} \\ O_{t-8} & mat_m_A & O_{t-4} \\ O_{v-8} & O_{v-8} & mat_m_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{Lind} \\ I_{L1perm} \\ I_{L2ind} \\ I_{L2perm} \\ I_{L3ind} \\ I_{L3perm} \\ I_{L4ind} \\ I_{L4perm} \\ I_{Aind} \\ I_{A1perm} \\ I_{A2ind} \\ I_{A2perm} \\ I_{A3ind} \\ I_{A3perm} \\ I_{A4ind} \\ I_{A4perm} \\ I_{M1} \\ I_{M2} \\ I_{M3} \\ I_{M4} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Mesures de champs magnétiques du navire

[0140] La mesure $\mathbf{B}^{Navire}$ vaut : $\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k1 & k2 & k3 \\ k4 & k5 & k6 \\ k7 & k8 & k9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_L \\ m_T \\ m_V \end{pmatrix}$ avec les vecteurs de

coefficients k_n dépendant de la position de la mesure. Ces coefficients ont donc une valeur différente pour chaque point de mesure.

Mesures des effets des boucles

[0141] La mesure va contenir les effets magnétiques du navire et de la boucle activée. Le champ magnétique étant régi par le principe de superposition, on pourra, connaissant la mesure de l'effet magnétique du navire, en déduire l'effet de la boucle seule.

[0142] Les effets de boucles mesurés valent :

[0143]
$$\begin{pmatrix} B_{xLn} \\ B_{yLn} \\ B_{zLn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k1 \\ k4 \\ k7 \end{pmatrix} m_{Ln} \quad (7)$$

[0144]
$$\begin{pmatrix} B_{xAn} \\ B_{yAn} \\ B_{zAn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k2 \\ k5 \\ k8 \end{pmatrix} m_{An} \quad (8)$$

[0145]
$$\begin{pmatrix} B_{xMn} \\ B_{yMn} \\ B_{zMn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k3 \\ k6 \\ k9 \end{pmatrix} m_{Mn} \quad (9)$$

[0146] Relation entre champs magnétiques mesurés, effets de boucles et courants recherchés

[0147] D'après les équations et en supposant un système parfait permettant de réaliser les mêmes points de mesure pour le navire et les effets de boucle (ou par modélisation et recalcul en un même point), on obtient :

[0148]
$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = -\frac{1}{I_{ref}} \begin{pmatrix} k1 & k2 & k3 \\ k4 & k5 & k6 \\ k7 & k8 & k9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} mat_m_L & O_{l-8} & O_{l-4} \\ O_{t-8} & mat_m_A & O_{t-4} \\ O_{v-8} & O_{v-8} & mat_m_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{L1ind} \\ I_{L1perm} \\ I_{L2ind} \\ I_{L2perm} \\ I_{L3ind} \\ I_{L3perm} \\ I_{L4ind} \\ I_{L4perm} \\ I_{A1ind} \\ I_{A1perm} \\ I_{A2ind} \\ I_{A2perm} \\ I_{A3ind} \\ I_{A3perm} \\ I_{A4ind} \\ I_{A4perm} \\ I_{M1} \\ I_{M2} \\ I_{M3} \\ I_{M4} \end{pmatrix} \quad (10)$$

[0149] En notant :

[0150]

$$\begin{aligned}
[0151] \quad \mathbf{mat_B}_L &= \begin{pmatrix} B_{xL} \\ B_{yL} \\ B_{zL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{xL1} & B_{xL1} & B_{xL2} & B_{xL2} & B_{xL3} & B_{xL3} & B_{xL4} & B_{xL4} \\ B_{yL1} & B_{yL1} & B_{yL2} & B_{yL2} & B_{yL3} & B_{yL3} & B_{yL4} & B_{yL4} \\ B_{zL1} & B_{zL1} & B_{zL2} & B_{zL2} & B_{zL3} & B_{zL3} & B_{zL4} & B_{zL4} \end{pmatrix} \\
[0152] \quad \mathbf{mat_B}_A &= \begin{pmatrix} B_{xA} \\ B_{yA} \\ B_{zA} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{xA1} & B_{xA1} & B_{xA2} & B_{xA2} & B_{xA3} & B_{xA3} & B_{xA4} & B_{xA4} \\ B_{yA1} & B_{yA1} & B_{yA2} & B_{yA2} & B_{yA3} & B_{yA3} & B_{yA4} & B_{yA4} \\ B_{zA1} & B_{zA1} & B_{zA2} & B_{zA2} & B_{zA3} & B_{zA3} & B_{zA4} & B_{zA4} \end{pmatrix} \\
[0153] \quad \mathbf{mat_B}_M &= \begin{pmatrix} B_{xM} \\ B_{yM} \\ B_{zM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{xM1} & B_{xM2} & B_{xM3} & B_{xM4} \\ B_{yM1} & B_{yM2} & B_{yM3} & B_{yM4} \\ B_{zM1} & B_{zM2} & B_{zM3} & B_{zM4} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = -\frac{1}{I_{ref}} \left(\mathbf{mat_B}_L \quad \mathbf{mat_B}_A \quad \mathbf{mat_B}_M \right) \begin{pmatrix} I_{L1ind} \\ I_{L1perm} \\ I_{L2ind} \\ I_{L2perm} \\ I_{L3ind} \\ I_{L3perm} \\ I_{L4ind} \\ I_{L4perm} \\ I_{A1ind} \\ I_{A1perm} \\ I_{A2ind} \\ I_{A2perm} \\ I_{A3ind} \\ I_{A3perm} \\ I_{A4ind} \\ I_{A4perm} \\ I_{M1} \\ I_{M2} \\ I_{M3} \\ I_{M4} \end{pmatrix} \quad (11)$$

[0154] Ces équations montrent bien l'intérêt de la présente invention de pouvoir résoudre le problème directement dans le domaine des moments magnétiques (équation 6) plutôt que dans celui des champs magnétiques (équation 11) comme dans les méthodes

classiques. D'une part on s'affranchit de la géométrie (termes k_n) et d'autre part le problème à résoudre est de dimension plus faible.

Propriétés des moments aux caps magnétiques

[0155] Comme décrit plus haut, la mesure est réalisée à quatre caps magnétiques particuliers précités, de sorte que :

– Cap magnétique nord : $m_N = m_{LN} + m_{TN} + m_{VN}$ avec :

[0156] $m_{LN} = m_{Lperm} + m_{Lind}$

[0157] $m_{TN} = m_{Tperm}$

[0158] $m_{VN} = m_{Vperm} + m_{Vind} = m_V$

– Cap magnétique sud : $m_S = m_{LS} + m_{TS} + m_{VS}$ avec :

[0159] $m_{LS} = m_{Lperm} - m_{Lind}$

[0160] $m_{TS} = m_{Tperm}$

[0161] $m_{VS} = m_{Vperm} + m_{Vind} = m_V$

– Cap magnétique ouest : $m_O = m_{LO} + m_{TO} + m_{VO}$ avec :

[0162] $m_{LO} = m_{Lperm}$

[0163] $m_{TO} = m_{Tperm} + m_{Tind}$

[0164] $m_{VO} = m_{Vperm} + m_{Vind} = m_V$

– Cap magnétique est : $m_E = m_{LE} + m_{TE} + m_{VE}$ avec :

[0165] $m_{LE} = m_{Lperm}$

[0166] $m_{TE} = m_{Tperm} - m_{Tind}$

[0167] $m_{VE} = m_{Vperm} + m_{Vind} = m_V$

[0168] D'où :

[0169] $m_{Lperm} = \frac{m_{LN} + m_{LS}}{2} = m_{LO} = m_{LE} \quad (12)$

[0170] $m_{Lind} = \frac{m_{LN} - m_{LS}}{2} \quad (13)$

[0171] $m_{Tperm} = \frac{m_{TO} + m_{TE}}{2} = m_{TN} = m_{TS} \quad (14)$

[0172] $m_{Tind} = \frac{m_{TO} - m_{TE}}{2} \quad (15)$

[0173] $m_V = m_{VN} = m_{VS} = m_{VO} = m_{VE} \quad (16)$

[0174] Champs magnétiques mesurés pour les passes aux quatre caps magnétiques particuliers précités (cap magnétique nord, cap magnétique sud, cap magnétique est et cap magnétique ouest)

[0175] La mesure donnant le champ magnétique, on peut donc écrire que :

[0176]
$$\begin{pmatrix} B_{xN} \\ B_{yN} \\ B_{zN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k1 & k2 & k3 \\ k4 & k5 & k6 \\ k7 & k8 & k9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{LN} \\ m_{TN} \\ m_{VN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k1 & k2 & k3 \\ k4 & k5 & k6 \\ k7 & k8 & k9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{Lind} + m_{Lperm} \\ m_{Tperm} \\ m_V \end{pmatrix} \quad (17)$$

[0177]

$$\begin{pmatrix} B_{xS} \\ B_{yS} \\ B_{zS} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k1 & k2 & k3 \\ k4 & k5 & k6 \\ k7 & k8 & k9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{LS} \\ m_{TS} \\ m_{VS} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k1 & k2 & k3 \\ k4 & k5 & k6 \\ k7 & k8 & k9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -m_{Lind} + m_{Lperm} \\ m_{Tperm} \\ m_V \end{pmatrix} \quad (18)$$

[0178]

$$\begin{pmatrix} B_{xO} \\ B_{yO} \\ B_{zO} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k1 & k2 & k3 \\ k4 & k5 & k6 \\ k7 & k8 & k9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{LO} \\ m_{TO} \\ m_{VO} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k1 & k2 & k3 \\ k4 & k5 & k6 \\ k7 & k8 & k9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{Lperm} \\ m_{Tind} + m_{Tperm} \\ m_V \end{pmatrix} \quad (19)$$

[0179]

$$\begin{pmatrix} B_{xE} \\ B_{yE} \\ B_{zE} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k1 & k2 & k3 \\ k4 & k5 & k6 \\ k7 & k8 & k9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{LE} \\ m_{TE} \\ m_{VE} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k1 & k2 & k3 \\ k4 & k5 & k6 \\ k7 & k8 & k9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{Lperm} \\ -m_{Tind} + m_{Tperm} \\ m_V \end{pmatrix} \quad (20)$$

[0180] On va ainsi, par modélisation, et avec les équations (12) à (16), trouver m_{Lind} , m_{Lperm} , m_{Tind} , m_{Tperm} et m_V (étape 22 de la [Fig.2]).

Effets de boucles mesurés

[0181] Chaque boucle est mesurée à un cap magnétique quelconque avec un courant connu (ici I_{ref}) puisque le moment magnétique, et donc le champ magnétique, créé par une boucle à courant constant ne dépend pas du cap magnétique.

[0182] Là où les méthodes antérieures tiraient à la mesure le champ magnétique créé par le navire seul au même cap magnétique pour obtenir le champ magnétique créé par une boucle selon les équations suivantes :

$$[0183] \quad \begin{pmatrix} B_{xLn} \\ B_{yLn} \\ B_{zLn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k1 \\ k4 \\ k7 \end{pmatrix} m_{Ln} \quad , \quad \begin{pmatrix} B_{xAn} \\ B_{yAn} \\ B_{zAn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k2 \\ k5 \\ k8 \end{pmatrix} m_{An} \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} B_{xMn} \\ B_{yMn} \\ B_{zMn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k3 \\ k6 \\ k9 \end{pmatrix} m_{Mn} \quad , \quad \text{la méthode}$$

proposée va elle directement déterminer le modèle en moments magnétiques pour chacune des mesures et déterminer les moments magnétiques créés par les boucles par différence entre modèles en moments magnétiques au même cap magnétique (on soustrait au modèle issu de la mesure comprenant le navire et une boucle active, le modèle issu de la mesure du navire seul au même cap magnétique).

[0184] On va ainsi, par modélisation, trouver m_{L1} , m_{L2} , m_{L3} , m_{L4} , m_{A1} , m_{A2} , m_{A3} , m_{A4} , m_{M1} , m_{M2} , m_{M3} et m_{M4} (étape 25 de la [Fig.2]).

Réglage des courants

[0185] Nous cherchons à compenser l'effet magnétique du navire avec les boucles de degaussing. Le problème se décompose donc comme suit :

- nous cherchons la combinaison linéaire des boucles longitudinales qui compense le(s) moment(s) longitudinal(aux) induit(s) du navire :

[0186]

$$m_{Lind} = -\frac{1}{I_{ref}} (I_{L1ind}m_{L1} + I_{L2ind}m_{L2} + I_{L3ind}m_{L3} + I_{L4ind}m_{L4}) U_l \quad (21)$$

- nous cherchons la combinaison linéaire des boucles longitudinales qui compense le(s) moment(s) longitudinal(aux) permanent(s) du navire :

[0187]

$$m_{Lperm} = -\frac{1}{I_{ref}} (I_{L1perm}m_{L1} + I_{L2perm}m_{L2} + I_{L3perm}m_{L3} + I_{L4perm}m_{L4}) U_l \quad (22)$$

- nous cherchons la combinaison linéaire des boucles transversales qui compense le(s) moment(s) transversal(aux) induit(s) du navire :

[0188]

$$m_{Tind} = -\frac{1}{I_{ref}} (I_{A1ind}m_{A1} + I_{A2ind}m_{A2} + I_{A3ind}m_{A3} + I_{A4ind}m_{A4}) U_t \quad (23)$$

- nous cherchons la combinaison linéaire des boucles transversales qui compense le(s) moment(s) transversal(aux) permanent(s) du navire :

[0189]

$$m_{Tperm} = -\frac{1}{I_{ref}} (I_{A1perm}m_{A1} + I_{A2perm}m_{A2} + I_{A3perm}m_{A3} + I_{A4perm}m_{A4}) U_t \quad (24)$$

- nous cherchons la combinaison linéaire des boucles verticales qui compense le(s) moment(s) vertical(aux) du navire :

[0190]

$$m_V = -\frac{1}{I_{ref}} (I_{M1}m_{M1} + I_{M2}m_{M2} + I_{M3}m_{M3} + I_{M4}m_{M4}) U_v \quad (25)$$

- [0191] Le même type de calcul que pour les autres axes est possible si une boucle de compensation du champ terrestre est employée pour mesurer le navire. Sans cela, le réglage induit permanent vertical est réalisé par expérience.

- [0192] D'où le problème à résoudre :

[0193]

$$m_{Lind} = \frac{m_{LN} - m_{LS}}{2} = -\frac{U_l}{I_{ref}} (I_{L1ind}m_{L1} + I_{L2ind}m_{L2} + I_{L3ind}m_{L3} + I_{L4ind}m_{L4}) \quad (26)$$

[0194]

$$m_{Lperm} = \frac{m_{LN} + m_{LS}}{2} = m_{LO} = m_{LE} = -\frac{U_l}{I_{ref}} (I_{L1perm}m_{L1} + I_{L2perm}m_{L2} + I_{L3perm}m_{L3} + I_{L4perm}m_{L4}) \quad (27)$$

[0195]

$$m_{Tind} = \frac{m_{TO} - m_{TE}}{2} = -\frac{U_t}{I_{ref}} (I_{A1ind}m_{A1} + I_{A2ind}m_{A2} + I_{A3ind}m_{A3} + I_{A4ind}m_{A4}) \quad (28)$$

[0196]

$$m_{Tperm} = \frac{m_{TO} + m_{TE}}{2} = m_{TN} = m_{TS} = -\frac{U_t}{I_{ref}} (I_{A1perm}m_{A1} + I_{A2perm}m_{A2} + I_{A3perm}m_{A3} + I_{A4perm}m_{A4}) \quad (29)$$

[0197]

$$m_V = m_{VN} = m_{VS} = m_{VO} = m_{VE} = -\frac{U_v}{I_{ref}} (I_{M1}m_{M1} + I_{M2}m_{M2} + I_{M3}m_{M3} + I_{M4}m_{M4}) \quad (30)$$

- [0198] Ces équations sont une forme simplifiée considérant les boucles comme parfaites et équivalentes à un moment unique à la distance de mesure. Ces équations sont

complexifiables en fonction de la réalité des modèles obtenus (multi moments dans des directions différentes). Dans ce cas, il faut prendre en compte l'impact d'une boucle dans les autres axes (minime en principe, sauf géométrie particulière).

[0199] Plus généralement (écriture sous forme générique), nous cherchons à compenser le navire avec p+q+r boucles de degaussing (p boucle(s) de type L, q boucle(s) de type A et r boucle(s) de type M). Le problème se décompose donc comme suit :

- nous cherchons la combinaison linéaire des boucles longitudinales qui compense le(s) moment(s) longitudinal(aux) induit(s) du navire :

$$m_{Lind} = -\frac{U_l}{I_{ref}} \sum_{j=1}^p m_{Lj} I_{Ljind} \quad (21')$$

- nous cherchons la combinaison linéaire des boucles longitudinales qui compense le(s) moment(s) longitudinal(aux) permanent(s) du navire :

$$m_{Lperm} = -\frac{U_l}{I_{ref}} \sum_{j=1}^p m_{Lj} I_{Ljperm} \quad (22')$$

- nous cherchons la combinaison linéaire des boucles transversales qui compense le(s) moment(s) transversal(aux) induit(s) du navire :

$$m_{Tind} = -\frac{U_l}{I_{ref}} \sum_{j=1}^q m_{Aj} I_{Ajind} \quad (23')$$

- nous cherchons la combinaison linéaire des boucles transversales qui compense le(s) moment(s) transversal(aux) permanent(s) du navire :

$$m_{Tperm} = -\frac{U_l}{I_{ref}} \sum_{j=1}^q m_{Aj} I_{Ajperm} \quad (24')$$

- nous cherchons la combinaison linéaire des boucles verticales qui compense le(s) moment(s) vertical(aux) du navire :

$$m_V = -\frac{U_v}{I_{ref}} \sum_{j=1}^r m_{Mj} I_{Mj} \quad (25')$$

[0200] Le même type de calcul que pour les autres axes est possible si une boucle de compensation du champ terrestre est employée pour mesurer le navire. Sans cela, le réglage induit permanent vertical est réalisé par expérience.

[0201] D'où le problème à résoudre :

$$[0202] \quad m_{Lind} = \frac{m_{LN} - m_{LS}}{2} = -\frac{U_l}{I_{ref}} \sum_{j=1}^p m_{Lj} I_{Ljind} \quad (26')$$

$$[0203] \quad m_{Lperm} = \frac{m_{LN} + m_{LS}}{2} = m_{LO} = m_{LE} = -\frac{U_l}{I_{ref}} \sum_{j=1}^p m_{Lj} I_{Ljperm} \quad (27')$$

$$[0204] \quad m_{Tind} = \frac{m_{TO} - m_{TE}}{2} = -\frac{U_l}{I_{ref}} \sum_{j=1}^q m_{Aj} I_{Ajind} \quad (28')$$

$$[0205] \quad m_{Tperm} = \frac{m_{TO} + m_{TE}}{2} = m_{TN} = m_{TS} = -\frac{U_l}{I_{ref}} \sum_{j=1}^q m_{Aj} I_{Ajperm} \quad (29')$$

$$[0206] \quad m_V = m_{VN} = m_{VS} = m_{VO} = m_{VE} = -\frac{U_v}{I_{ref}} \sum_{j=1}^r m_{Mj} I_{Mj} \quad (30')$$

[0207] Ces équations sont une forme simplifiée considérant les boucles comme parfaites et équivalentes à un moment unique à la distance de mesure. Ces équations sont complexifiables en fonction de la réalité des modèles obtenus (multi moments dans des

directions différentes). Dans ce cas, il faut prendre en compte l'impact d'une boucle dans les autres axes (minime en principe).

[0208] Le problème considéré à travers les équations (26') à (30') s'écrit sous la forme matricielle suivante :

[0209] $\mathbf{M}^{Navire} = -\frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I}$ (31)

[0210] avec $\mathbf{M}^{Navire} = (m_L \ m_T \ m_V)^T$, le vecteur des moments magnétiques du navire,

[0211]

$$\mathbf{M}^{Boucles} = \begin{pmatrix} m_{L1} & \dots & m_{Lp} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ m_{L1} & \dots & m_{Lp} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & m_{A1} & \dots & m_{Aq} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & m_{A1} & \dots & m_{Aq} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & m_{M1} & \dots & m_{Mr} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & m_{M1} & \dots & m_{Mr} \end{pmatrix}, \text{ la matrice}$$

des moments des boucles de dimension $(l+t+v)*(p+q+r)$, et $\mathbf{I}$ le vecteur des courants à estimer.

[0212] Estimation des moments magnétiques du navire à partir des champs magnétiques mesurés (étape 22 de la [Fig.2])

[0213] L'estimation des moments magnétiques du navire (c'est-à-dire la détermination du modèle en moments magnétique du navire) à partir des champs magnétiques est un problème inverse bien connu en magnétisme du navire.

[0214] L'angle pris dans cette invention est de faire l'hypothèse (qui est vérifiée en pratique) que les sources d'aimantation (ou moments dipolaires) qui expliquent les champs magnétiques observés en dehors de la zone de champ proche sont en nombre restreints (la nature des sources physiques d'aimantation sont connues des marins et ce principe est en cohérence avec le design du système de degaussing avec un nombre restreint de boucles et donc de moments magnétiques équivalents). Mathématiquement, ce type de problème inverse trouve une traduction pertinente dans la manière de régulariser le problème ; régulariser revient à imposer des contraintes sur les solutions attendues.

[0215] Une régularisation du problème couramment utilisée dans l'état de l'art pour les problèmes inverses est celle de Tikhonov (aussi appelée en norme λ_2 , notée $\|\mathbf{x}\|_2$ et qui contient la somme des carrés de la variable régularisée), telle que :

[0216] $\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{B}^{Navire} - \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2 + \lambda_2 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2$

[0217] avec $\mathbf{M}^{Navire}$ le vecteur de moments magnétiques du modèle en moments magnétiques du navire,

[0218] $\mathbf{B}^{Navire}$ le vecteur des mesures de champs magnétiques du navire, et

[0219] la matrice **D** (matrice de coefficients dépendant des positions associées aux mesures de champs magnétiques) telle que
$$\mathbf{D} = \frac{\mu_0}{4\pi r^5} \begin{bmatrix} [\mathbf{K}]_{ij} \end{bmatrix}$$

[0220] avec
$$[\mathbf{K}]_{ij} = \begin{bmatrix} 3x^2 - r^2 & 3xy & 3xz \\ 3xy & 3y^2 - r^2 & 3yz \\ 3xz & 3yz & 3z^2 - r^2 \end{bmatrix}$$
, x,y,z étant les coordonnées dans le repère navire et $r = \text{racine}(x^2 + y^2 + z^2)$.

[0221] Celle-ci (et ses variantes) n'est toutefois pas pertinente au regard de la réalité physique car elle ne permet pas de prendre en compte que les sources d'aimantation sont localisées et en nombre restreint.

[0222] Comme déjà mentionné plus haut, la présente invention repose sur l'utilisation d'une méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse (utilisant un a priori favorisant la parcimonie, aussi appelé « a priori parcimonieux » ou « sparse promoting priors » en anglais) pour résoudre le problème inverse visant à déterminer les moments magnétiques du navire à partir des mesures de champs magnétiques et des informations associées.

[0223] L'usage d'une telle méthode de régularisation parcimonieuse dans l'étape 22 est justifié par la réalité physique : il est ainsi possible d'estimer automatiquement un nombre de sources limité expliquant les champs magnétiques mesurés.

[0224] Dans des modes de réalisation de l'invention de l'étape 22, la méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse s'appuie sur au moins une des normes λ_0 et λ_1 . Ainsi, le problème inverse peut s'écrire sous plusieurs formes mathématiques, comme listé ci-après.

[0225] Pour la norme λ_0 :

[0226]
$$\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{M}^{Navire}\|_0 \text{ sous la contrainte } \mathbf{B}^{Navire} = \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}$$

[0227] Pour la norme λ_1 :

[0228]
$$\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{M}^{Navire}\|_1 \text{ sous la contrainte } \mathbf{B}^{Navire} = \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}$$

[0229] Ou bien de manière équivalente :

[0230]
$$\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{B}^{Navire} - \mathbf{C}\|_2^2 + \lambda_1 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_1$$

[0231] Il est également possible de combiner les pénalités des normes λ_1 et λ_2 :

[0232]
$$\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{B}^{Navire} - \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2 + \lambda_1 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2$$

[0233] Ou encore de combiner les pénalités des normes λ_0 , λ_1 et λ_2 :

[0234]
$$\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{B}^{Navire} - \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2 + \lambda_0 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_0 + \lambda_1 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2$$

- [0235] De nombreux algorithmes existent pour résoudre ces problèmes qu'on retrouve dans de nombreux domaines scientifiques. Un compromis en pratique doit être trouvé selon la puissance de calcul disponible, la facilité d'implantation, les performances attendues, l'estimation de l'incertitude sur le vecteur $\mathbf{M}^{Navire}$. Deux grandes familles d'algorithmes peuvent être convoquées pour ces problèmes : les algorithmes d'optimisation algébrique d'un côté et les algorithmes par simulation de l'autre.
- [0236] Dans un mode de réalisation particulier, pour l'estimation des moments magnétiques du navire, une méthode bayésienne et l'algorithme associé donnent un bon compromis entre vitesse de convergence et qualité d'estimation du vecteur $\mathbf{M}^{Navire}$, tout en fournissant les incertitudes pour les moments estimés.
- [0237] Estimation des courants à partir des moments magnétiques du navire (étape 26 de la [Fig.2])
- [0238] Les moments magnétiques du navire (moments dipolaires) ayant été estimés (étape 22 de la [Fig.2]), il s'agit ensuite, dans l'étape 26 de la [Fig.2], d'estimer les courants de compensation à partir de ceux-ci.
- [0239] La même hypothèse de parcimonie de la solution du jeu d'équations (26) à (30) - ou plus généralement (26') à (30') - est adoptée et un a priori favorisant la parcimonie est choisi pour trouver cette solution. Autrement dit, certains courants peuvent être nuls dans telle ou telle situation en fonction de moments magnétiques estimés à l'étape 22.
- [0240] Dans des modes de réalisation de l'invention de l'étape 22, la méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse s'appuie sur au moins une des normes λ_0 et λ_1 . Ainsi, le problème inverse peut s'écrire sous plusieurs formes mathématiques, comme listé ci-après.
- [0241] Pour la norme λ_0 :
- [0242] $\min_{\mathbf{I}} \|\mathbf{I}\|_0$ sous la contrainte $\mathbf{M}^{Navire} = -\frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles}$
- [0243] avec $\mathbf{I}$ le vecteur des courants de compensation à estimer, $\mathbf{M}^{Boucles}$ la matrice des moments des boucles (c'est-à-dire une matrice de coefficients dépendant des modèles en moment magnétiques des boucles de courant) et I_{ref} un courant de référence (déjà discuté plus haut). Un exemple du vecteur $\mathbf{I}$ est mentionné plus haut dans l'équation (6).
- [0244] Pour la norme λ_1 :
- [0245] $\min_{\mathbf{I}} \|\mathbf{I}\|_1$ sous la contrainte $\mathbf{M}^{Navire} = -\frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I}$
- [0246] Ou bien de manière équivalente :
- [0247] $\min_{\mathbf{I}} \|\mathbf{M}^{Navire} + \frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{I}\|_1$
- [0248] Il est également possible de combiner les pénalités des normes λ_1 et λ_2 :

[0249]
$$\min_{\mathbf{I}} \quad \left\| \mathbf{M}^{Navire} + \frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I} \right\|_2^2 + \lambda_1 \|\mathbf{I}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{I}\|_2^2$$

[0250] Ou encore de combiner les pénalités des normes λ_0 , λ_1 et λ_2 :

[0251]
$$\min_{\mathbf{I}} \quad \left\| \mathbf{M}^{Navire} + \frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I} \right\|_2^2 + \lambda_0 \|\mathbf{I}\|_0 + \lambda_1 \|\mathbf{I}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{I}\|_2^2$$

[0252] Pour cette étape 26 du procédé, la méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse utilise par exemple un algorithme de type méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov. En d'autres termes, l'estimation du vecteur $\mathbf{I}$ est par exemple assurée par un algorithme de type MCMC. Mais toute autre approche est envisageable.

[0253] On présente désormais, en relation avec la [Fig.3] un exemple de structure d'un dispositif 30 de gestion d'une signature magnétique d'un navire selon un mode de réalisation de l'invention, permettant la mise en œuvre des étapes du procédé de la [Fig.2].

[0254] Le dispositif 30 comprend une mémoire vive 33 (par exemple une mémoire RAM), une unité de traitement 31 équipée par exemple d'un processeur, et pilotée par un programme d'ordinateur 320 stocké dans une mémoire morte 32 (par exemple une mémoire ROM ou un disque dur). A l'initialisation, les instructions de code du programme d'ordinateur sont par exemple chargées dans la mémoire vive 33 avant d'être exécutées par le processeur de l'unité de traitement 31.

[0255] Cette [Fig.3] illustre seulement une manière particulière, parmi plusieurs possibles, de réaliser le dispositif 30 afin qu'il effectue certaines étapes du procédé de gestion d'une signature magnétique d'un navire selon l'invention (selon l'un quelconque des modes de réalisation et/ou variantes décrit(e)s ci-dessus en relation avec la [Fig.2]).

[0256] En effet, ces étapes peuvent être réalisées indifféremment sur une machine de calcul reprogrammable (un ordinateur PC, un processeur DSP ou un microcontrôleur) exécutant un programme comprenant une séquence d'instructions, ou sur une machine de calcul dédiée (par exemple un ensemble de portes logiques comme un FPGA ou un ASIC, ou tout autre module matériel).

[0257] Dans le cas où le dispositif 30 est réalisé avec une machine de calcul reprogrammable, le programme correspondant (c'est-à-dire la séquence d'instructions) pourra être stocké dans un médium de stockage amovible (tel que par exemple un CD-ROM, un DVD-ROM, une clé USB) ou non, ce médium de stockage étant lisible partiellement ou totalement par un ordinateur ou un processeur.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de gestion d'une signature magnétique d'un navire, exécuté par une machine de calcul et comprenant une étape (20) de modélisation magnétique du navire comprenant elle-même :

- obtention (21) de mesures de champs magnétiques, les champs magnétiques mesurés étant chacun associés à des informations comprenant une position géographique, un cap magnétique du navire et une distance par rapport au navire ; et
- détermination (22) d'un modèle en moments magnétiques du navire, par résolution d'un premier problème inverse visant à déterminer des moments magnétiques du navire à partir des mesures de champs magnétiques et des informations associées ;

caractérisé en ce que la résolution du premier problème inverse est réalisée avec une première méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse utilisant un a priori favorisant la parcimonie,

le procédé comprenant une étape (24) de compensation de la signature magnétique du navire à l'aide d'un système d'immunisation comprenant des boucles de courant installées à bord du navire, l'étape de compensation de la signature magnétique du navire comprenant :

- détermination (25) d'un modèle en moment(s) magnétique(s) de chacune des boucles de courant ;
- pour chacune des boucles de courant, détermination (26) d'un courant de compensation en fonction du modèle en moments magnétiques du navire et des modèles en moments magnétiques des boucles de courant ; et
- application (27), sur les boucles de courant, des courants de compensation déterminés.

[Revendication 2]

Procédé selon la revendication 1, dans lequel la première méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse s'appuie sur au moins une des normes λ_0 et λ_1 .

[Revendication 3]

Procédé selon la revendication 2, dans lequel le premier problème inverse s'écrit sous une des formes mathématiques suivantes :

$$\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{M}^{Navire}\|_0 \text{ sous la contrainte } \mathbf{B}^{Navire} = \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}$$

$$\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{M}^{Navire}\|_1 \text{ sous la contrainte } \mathbf{B}^{Navire} = \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}$$

$$\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{B}^{Navire} - \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2 + \lambda_1 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_1$$

$$\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{B}^{Navire} - \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2 + \lambda_1 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2$$

$$\min_{\mathbf{M}^{Navire}} \|\mathbf{B}^{Navire} - \mathbf{D}\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2 + \lambda_0 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_0 + \lambda_1 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_1 + \lambda_2 \|\mathbf{M}^{Navire}\|_2^2$$

avec $\mathbf{M}^{Navire}$ un vecteur des moments magnétiques du navire à estimer, $\mathbf{B}^{Navire}$ un vecteur des mesures de champs magnétiques et $\mathbf{D}$ une matrice de coefficients dépendant des positions associées aux mesures de champs magnétiques.

[Revendication 4]

Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel la première méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse est une méthode bayésienne.

[Revendication 5]

Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, comprenant une étape (23) de prédiction de la signature magnétique du navire à une position géographique et/ou un cap magnétique du navire et/ou une distance par rapport au navire autre(s) que celle, celui ou ceux des mesures de champs magnétiques, en fonction du modèle en moments magnétiques du navire.

[Revendication 6]

Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel le calcul des courants de compensation est réalisé par résolution d'un deuxième problème inverse, visant à déterminer les courants de compensation en fonction du modèle en moments magnétiques du navire et des modèles en moments magnétiques des boucles de courant, avec une deuxième méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse utilisant un a priori favorisant la parcimonie.

[Revendication 7]

Procédé selon la revendication 6, dans lequel la deuxième méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse s'appuie sur au moins une des normes λ_0 et λ_1 .

[Revendication 8]

Procédé selon la revendication 7, dans lequel le deuxième problème inverse s'écrit sous une des formes mathématiques suivantes :

$$\min_{\mathbf{I}} \|\mathbf{I}\|_0 \text{ sous la contrainte } \mathbf{M}^{Navire} = -\frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles}$$

$$\min_{\mathbf{I}} \|\mathbf{I}\|_1 \text{ sous la contrainte } \mathbf{M}^{Navire} = -\frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I}$$

$$\min_{\mathbf{I}} \quad \left\| \mathbf{M}^{Navire} + \frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I} \right\|_2^2 + \lambda \left\| \mathbf{I} \right\|_1$$

$$\min_{\mathbf{I}} \quad \left\| \mathbf{M}^{Navire} + \frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I} \right\|_2^2 + \lambda_1 \left\| \mathbf{I} \right\|_1 + \lambda_2 \left\| \mathbf{I} \right\|_2^2$$

$$\min_{\mathbf{I}} \quad \left\| \mathbf{M}^{Navire} + \frac{1}{I_{ref}} \mathbf{M}^{Boucles} \mathbf{I} \right\|_2^2 + \lambda_0 \left\| \mathbf{I} \right\|_0 + \lambda_1 \left\| \mathbf{I} \right\|_1 + \lambda_2 \left\| \mathbf{I} \right\|_2^2$$

avec $\mathbf{I}$ un vecteur des courants de compensation à estimer, $\mathbf{M}^{Boucles}$ une matrice de coefficients dépendant des modèles en moments magnétiques des boucles de courant et I_{ref} un courant de référence.

[Revendication 9] Procédé selon l'une quelconque des revendications 6 à 8, dans lequel la deuxième méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse utilise un algorithme de type méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov.

[Revendication 10] Produit programme d'ordinateur (320), comprenant des instructions de code de programme pour la mise en œuvre du procédé selon au moins une des revendications 1 à 9, lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

[Revendication 11] Médium de stockage (32) lisible par ordinateur et non transitoire, stockant un produit programme d'ordinateur (320) selon la revendication 10.

[Revendication 12] Dispositif (30) de gestion d'une signature magnétique d'un navire, le dispositif comprenant une machine de calcul (31, 32, 33), dédiée ou reprogrammable, configurée pour effectuer une étape de modélisation magnétique du navire comprenant elle-même :

- obtention de mesures de champs magnétiques, les champs magnétiques mesurés étant chacun associés à des informations comprenant une position géographique, un cap magnétique du navire et une distance par rapport au navire ; et
- détermination d'un modèle en moments magnétiques du navire, par résolution d'un premier problème inverse visant à déterminer des moments magnétiques du navire à partir des mesures de champs magnétiques et des informations associées ;

caractérisé en ce que la résolution du premier problème inverse est réalisée avec une première méthode de résolution basée sur une régularisation parcimonieuse utilisant un a priori favorisant la parcimonie,

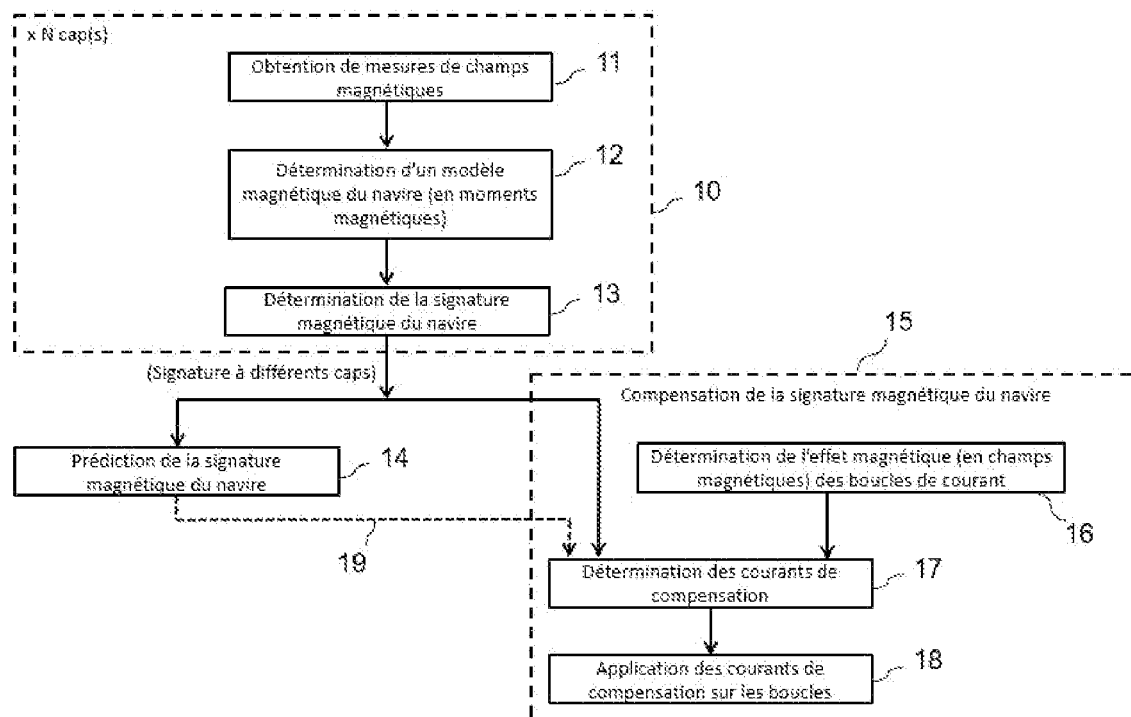
la machine de calcul étant également configurée pour effectuer une étape de compensation de la signature magnétique du navire à l'aide d'un système d'immunisation comprenant des boucles de courant installées à bord du navire, l'étape de compensation de la signature magnétique du navire comprenant :

- détermination d'un modèle en moment(s) magnétique(s) de chacune des boucles de courant ;
- pour chacune des boucles de courant, détermination d'un courant de compensation en fonction du modèle en moments magnétiques du navire et des modèles en moments magnétiques des boucles de courant ; et
- application, sur les boucles de courant, des courants de compensation déterminés.

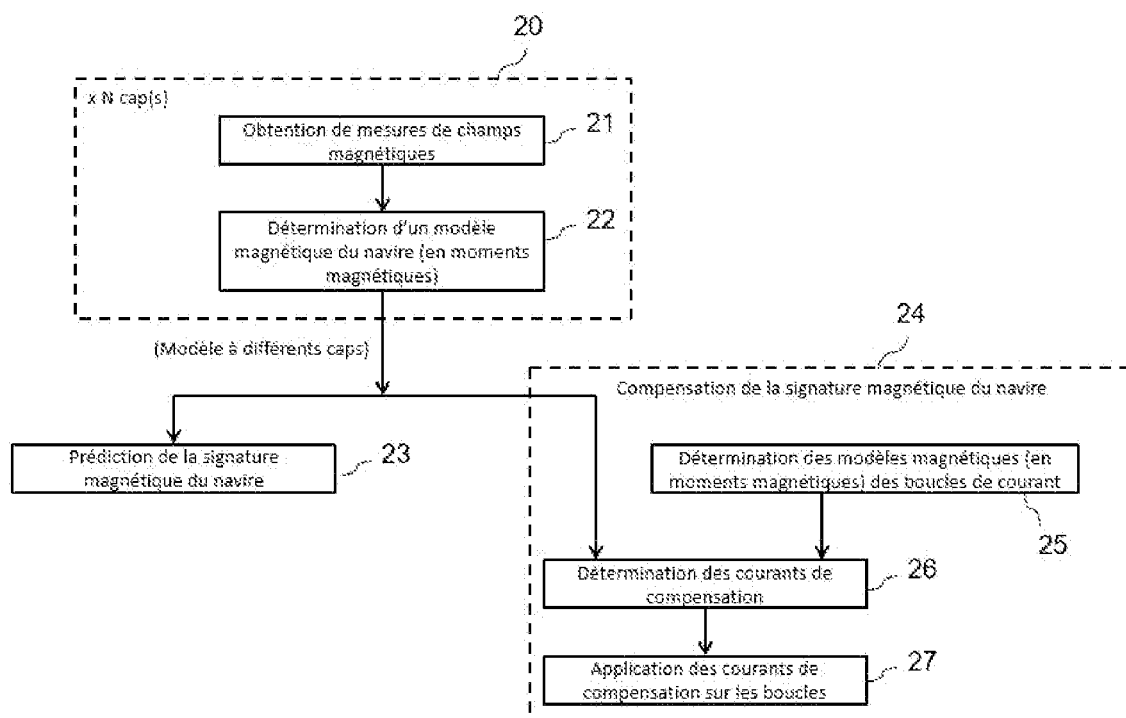
[Revendication 13]

Dispositif selon la revendication 12, dans lequel la machine de calcul est également configurée pour effectuer une étape de prédiction de la signature magnétique du navire à une position géographique et/ou un cap magnétique du navire et/ou une distance par rapport au navire autre(s) que celle, celui ou ceux des mesures de champs magnétiques, en fonction du modèle en moments magnétiques du navire.

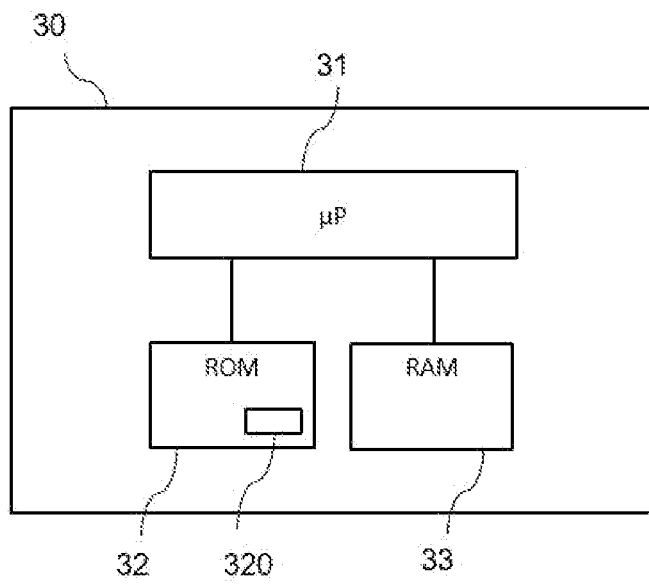
[Fig. 1]



[Fig. 2]



[Fig. 3]



RAPPORT DE RECHERCHE

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

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☒ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☐ Le demandeur a maintenu les revendications.

☒ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

☒ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

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

Lucas Carmen E ET AL: "A Novel Technique for Modelling Ship Magnetic Signatures",

, 18 juin 2015 (2015-06-18), pages 1-14,

XP093066374,

Extrait de l'Internet:

URL: https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc194/p801816_A1b.pdf

[extrait le 2023-07-21]

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

Holtham Peter: "New Approaches to Magnetic Modelling, I: Prolate Spheroids, II : One-spike-at-a-time Fitting",

, 1 janvier 1993 (1993-01-01), XP093066638,

Extrait de l'Internet:

URL: https%3A%2F%2Fbooks.google.nl%2Fbooks%2Fabout%2FNew_Approaches_to_Magnetic_Modeling_I.html%3Fid%3D5vktjwEACAAJ%26redir_esc%3Dy

[extrait le 2023-07-24]

VELIS D R: "Stochastic sparse-spike deconvolution",
GEOPHYSICS, SOCIETY OF EXPLORATION
GEOPHYSICISTS, US,
vol. 73, no. 1,

1 janvier 2008 (2008-01-01), pages R1-R9,

XP001509689,

ISSN: 0016-8033, DOI: 10.1190/1.2790584

SHEINKER A ET AL: "Estimation of Ship's Magnetic Signature Using Multi-Dipole Modeling Method",
IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, IEEE, USA,
vol. 57, no. 5, 1 mars 2021 (2021-03-01),
pages 1-8, XP011850325,
ISSN: 0018-9464, DOI:
10.1109/TMAG.2021.3062998
[extrait le 2021-04-16]

Wipf David Paul ET AL: "Bayesian methods for finding sparse representations",

, 1 janvier 2006 (2006-01-01), XP093066557,

ISBN: 978-0-542-90895-8

Extrait de l'Internet:

URL: https://escholarship.org/content/qt1kh6989n/qt1kh6989n_noSplash_ca784f010d362ed02dd9f165dfaa5982.pdf

[extrait le 2023-07-24]

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