

ACI : Contribution à la séparation de fluctuations dues à la température dans la réponse d'un capteur de proximité à Courants de Foucault

Michel HARITOPOULOS, Yannick NAUDET, Pascal VASSEUR, Alain BILLAT

Laboratoire d'Automatique et de Microélectronique
Moulin de la Housse, BP 1039-51687, Reims Cedex 2, France
michel.haritopoulos@univ-reims.fr, yannick.naudet@univ-reims.fr
pascal.vasseur@univ-reims.fr, alain.billat@univ-reims.fr

Résumé – Son bon rapport coût de fabrication/performances fait du Capteur à Courants de Foucault (CCF) un des dispositifs de mesure de proximité les plus utilisés dans l'industrie. Cependant, sa réponse reste sensible aux changements de l'environnement et plus particulièrement à ceux de la température. En se restreignant, dans une première approche, à l'étude des variations de température d'une cible métallique mobile placée en face du capteur, on montre ici que l'ACI (Analyse en Composantes Indépendantes) permet d'extraire ces variations de la mesure de distance capteur-cible fournie par un CCF de proximité multi-fréquences.

Abstract – Eddy Current sensors are widely used for noncontact displacement, position and proximity measurement thanks to their low cost and their good performances. However, their response depends on a complex set of factors ; in particular, temperature drift proves to be the critical source of error in eddy current displacement sensors. First, we focus our study on the effects of a metallic target temperature variations to the sensor's response. We show in this paper that ICA (Independent Component Analysis) applied to our problem permits to extract these variations from the displacement measurement provided by the sensor.

1 Introduction

Le Capteur à Courants de Foucault (CCF) que nous utilisons est un capteur de proximité sans contact. Le signal issu du CCF est fonction de la distance le séparant de l'objet métallique (cible). Cette fonction dépend des propriétés physiques du milieu (champs magnétiques ou électriques) entre le capteur et l'objet.

Les CCF sont exploités dans un grand nombre de domaines industriels, mais il faut être prudent quant à leur utilisation car : i. les phénomènes électromagnétiques ont un caractère abstrait, ii. les résultats sont quelques fois délicats à interpréter et iii. les grandeurs d'influence qui sont liées à l'environnement du capteur influencent sa réponse et sont difficiles à intégrer théoriquement.

2 Cadre expérimental

L'élément sensible du capteur est une bobine plate gravée sur un circuit imprimé double face. Celle-ci est l'élément principal de p oscillateurs Clapp excités à des fréquences centrales différentes. Ainsi, la modification de l'inductance mutuelle bobine-cible due à la présence de l'objet dans le champ magnétique créé par la bobine modifie les fréquences f_1, f_2, \dots, f_p des oscillateurs. Un choix judicieux des valeurs de ces fréquences garantit des profondeurs de pénétration différentes des courants induits à l'intérieur du métal. Le même effet de

température incident sera ainsi ressenti différemment d'un oscillateur à un autre [1].

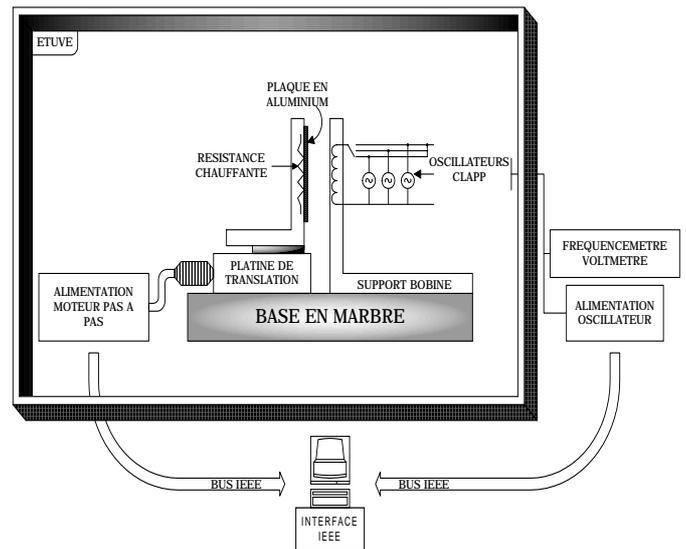


FIG. 1: montage expérimental

La cible est une plaque d'aluminium dont la conductivité électrique élevée et la perméabilité magnétique unité en font un matériau adapté à nos expériences. Son déplacement, d'une résolution de $1\mu m$, est assuré par un moteur pas à pas piloté par ordinateur. Un dispositif de contrôle nous fournit une

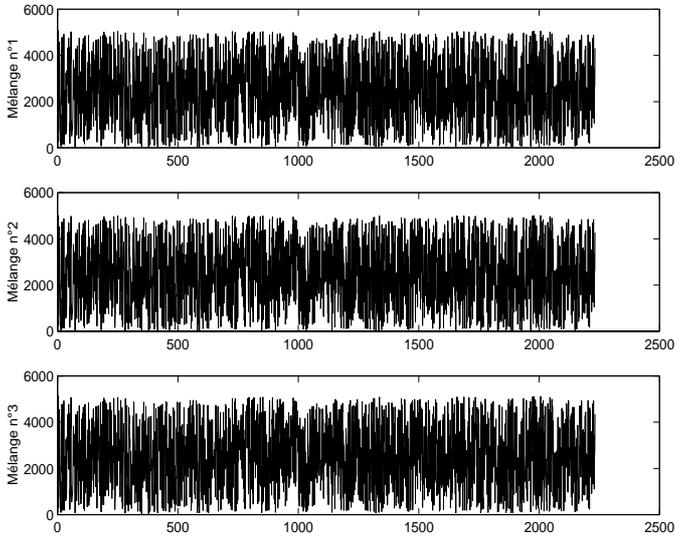


FIG. 2: signaux capteurs

mesure de distance comprise entre $0\mu m$ et $5000\mu m$. Enfin, cet ensemble est placé dans une étuve régulée en température et en humidité, ce qui permet de s'affranchir des variations de température autres que celles de la cible que l'on chauffe localement (Fig. 1).

3 Application de l'ACI

En considérant qu'une mesure de déplacement est la contribution de la distance vraie et des effets de température, supposés indépendants puisque les phénomènes physiques associés sont différents, on se trouve a priori dans des conditions propices à l'application d'un algorithme d'ACI [2]. Le modèle retenu est, dans un premier temps, un modèle instantané linéaire décrit par :

$$x(t) = A(t)s(t) + \nu(t) \quad (1)$$

où x est le vecteur $m \times 1$ des observations, s est le vecteur $n \times 1$ des sources statistiquement indépendantes, A est la matrice de mélange inversible de taille $m \times n$ et ν un vecteur de bruit additif indépendant du vecteur source s . En considérant qu'on ne connaît ni le profil de distance ni celui de température, les données du CCF multi-fréquences nous placent dans un contexte de séparation aveugle, où l'ACI est utilisée afin de restituer les sources $s(t)$ à partir des seules observations $x(t)$.

4 Traitement du Signal

Dans un premier temps, pour une température de référence $T_0 = 18^\circ C$ et pour un déplacement de la cible dans l'intervalle $[0, 5000]\mu m$, on relève la réponse fréquentielle du capteur et la mesure de distance exacte, fournie par un dispositif externe. Ainsi, on obtient des courbes de fréquence fonction de la distance, appelées Courbes de Référence (CR). L'étape de pré-traitement consiste à estimer à partir des CR et du modèle théorique de la réponse du CCF, un ensemble de paramètres optimaux en utilisant, par exemple, une méthode de descente de gradient.

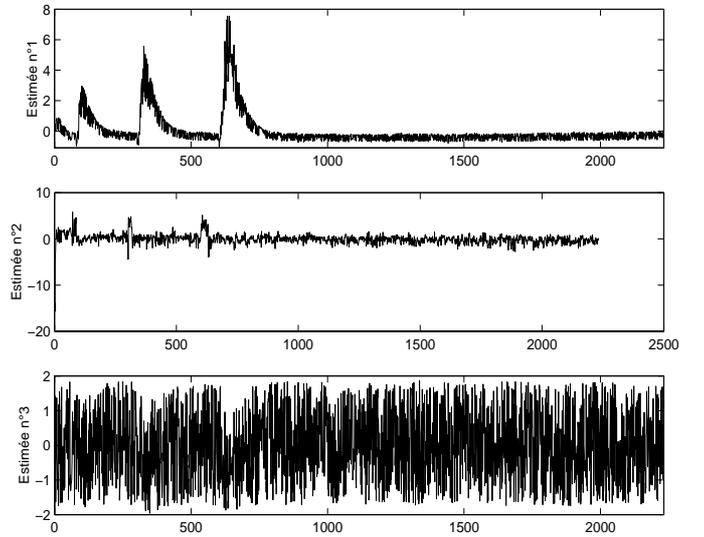


FIG. 3: signaux séparés

Ensuite, on répète le même processus d'acquisition de la réponse du capteur en déplaçant aléatoirement la cible tout en faisant varier sa température. En utilisant les paramètres optimaux calculés à l'étape de pré-traitement, on peut alors estimer la distance théorique capteur-cible perturbée par l'effet de variation de la température. Enfin, un algorithme de séparation de sources appliqué à ces signaux expérimentaux, nous permettra d'extraire l'effet de variation de la température de la mesure de la distance entre le capteur et la cible. Une étape finale de post-traitement est nécessaire pour lever les indéterminations sur l'amplitude et le signe des sources estimées, inhérent à tout problème de séparation de sources.

4.1 Etape de pré-traitement

Pour chaque fréquence centrale f_{j_0} à vide (i.e. en absence de cible), la réponse du capteur peut être décrite par le modèle mathématique suivant [3] :

$$f_j(t) \cong f_{j_0}(1 - k(t))^{-\frac{1}{2}}, \quad k(t)^2 = \beta \exp(-\alpha_1 d(t) - \alpha_2 d(t)^2) \quad (2)$$

où $d(t)$ est la distance capteur-cible correspondant à la fréquence $f_j(t)$ et $w = \{\beta, \alpha_1, \alpha_2\}$ l'ensemble de paramètres à estimer. Les CR théoriques sont calculées en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt qui est une combinaison de l'algorithme de Newton et de l'algorithme de descente du gradient. Ainsi, on obtient un ensemble de paramètres estimés \hat{w} .

4.2 Acquisition des mélanges

Nos expériences ont porté principalement sur une acquisition de distances aléatoires dans le temps, au cours duquel des pics de température pouvant aller jusqu'à $100^\circ C$ sont envoyés dans la cible. L'utilisation de 3 oscillateurs dont les fréquences à vide sont $989.3kHz$ (haute), $497.9kHz$ (moyenne) et $97.9kHz$ (basse) fournit 3 versions de la distance perturbée. Ces valeurs de distance capteur-cible sont calculées à partir de l'équation (2) et

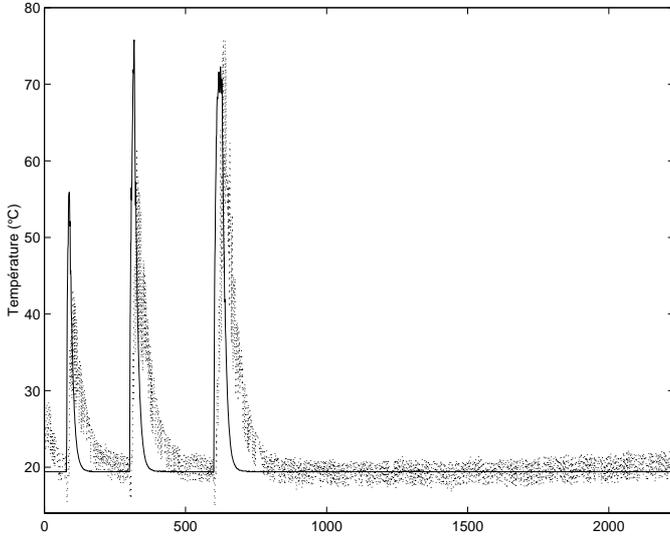


FIG. 4: température estimée (pointillés) avec retard et température incidente mesurée (trait plein)

des paramètres optimaux \hat{w} :

$$d_i(t) \cong \frac{\sqrt{\hat{\alpha}_1^2 - 4\hat{\alpha}_2\delta(t) - \hat{\alpha}_1}}{2\hat{\alpha}_2}, i = 1, 2, 3$$

$$\text{avec } \delta(t) = 2 \ln \left(1 - \frac{f_{j_0}^2(t)}{f_j(t)} \right) - \ln(\hat{\beta}). \quad (3)$$

Ainsi est constitué, à chaque instant t , le vecteur x des observations de taille 3×1 (Fig. 2), qui servira d'entrée à un algorithme de séparation de sources. Notons que le choix arbitraire des distances dans le temps permet d'obtenir des mélanges dont la distribution est pratiquement uniforme.

5 Résultats expérimentaux

L'application de l'algorithme bloc JADE [4] donne des résultats encourageants illustrés par la figure 3. Le profil de la consigne de température envoyée sur une face de la plaque est isolé (estimée n°1, Fig. 3) ainsi que la distance capteur-cible (estimée n°3, Fig. 3). Un troisième signal est restitué (estimée n°2, Fig. 3) correspondant à différentes sources de bruit (essentiellement des vibrations introduites par le fonctionnement de l'étuve et des bruits dus à l'instrumentation du capteur). Une première analyse montre toutefois, que la distance et la température estimées sont encore légèrement corrélés; le bruit quant à lui peut être considéré comme blanc à l'ordre deux, bien qu'on note également une légère corrélation.

Après identification des sources estimées correspondant à la température et à la distance, une mise à l'échelle de l'amplitude permet un calcul d'erreur entre les valeurs vraies et les composantes indépendantes fournies par JADE. Ainsi, l'erreur quadratique moyenne est de 3.7°C pour la température de la plaque et de $7.6\mu\text{m}$ pour la distance capteur-cible. Étant donné que la composante du vecteur des observations la moins perturbée par l'effet de température donne une erreur d'environ $50\mu\text{m}$, on peut considérer que les résultats sont satisfaisants.

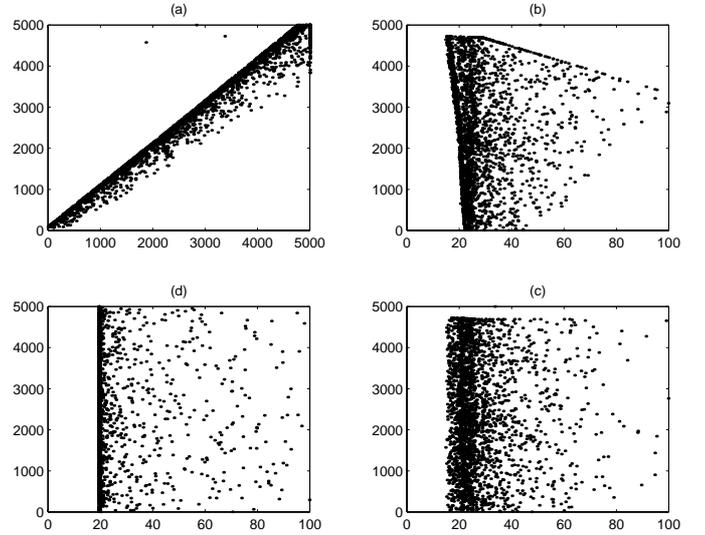


FIG. 5: distributions respectives (a) du mélange, (b) des sources estimées avec retard, (c) des sources estimées sans retard et (d) des vraies valeurs mesurées des sources

La figure 4 montre les profils de la température de la plaque et de son estimée. On peut remarquer un léger décalage entre les deux courbes. Ceci est confirmé par l'utilisation d'une méthode basée sur les cumulants croisés d'ordre trois, qui a permis d'estimer un retard à la propagation de la température de l'ordre de 9 échantillons. Pour avoir une idée de la qualité des résultats, on peut étudier les distributions de la figure 5. L'aspect de la distribution de deux composantes du vecteur x (Fig.5(a)) sous-entend la présence de non-linéarités dans le mélange. En effet, les sources estimées de température et de distance ne forment pas un ensemble linéairement indépendant au vu de la structure de leur distribution (Fig.5(b)). Cependant, en prenant en compte le retard cité précédemment, cette distribution se transforme en celle illustrée par la Fig. 5(c), qui se rapproche beaucoup plus de la distribution vraie des deux sources d'intérêt, montrée sur la Fig.5(d).

6 Conclusion

Dans ce papier nous exposons les premiers résultats obtenus par l'application de l'ACI à un problème réel complexe: le traitement aveugle de la réponse d'un capteur de proximité à Courants de Foucault. Nous montrons expérimentalement la possibilité d'extraire un effet de température parasite de la mesure de distance pour une répartition uniforme de celle-ci.

Plusieurs points remettent toutefois en cause l'application du modèle instantané linéaire: outre le fait du mauvais conditionnement de la matrice de mélange dû à la nette prépondérance de l'effet de distance sur chaque oscillateur, les non-linéarités négligées par ce modèle semblent influencer la qualité de la séparation. De plus, il semblerait que la propagation de la température dans la plaque ne soit pas négligeable, ce qui conduit à envisager l'utilisation d'un modèle d'ACI convolutif ou

d'un modèle instantané tenant compte de retards.

Des expériences menées sur des signaux de distance non-aléatoire ou des profils de température différents ont confirmé la nécessité d'une prise en compte plus précise des caractéristiques du mélange. Dans un cas très défavorable, une solution envisageable est la prise en compte de l'information a priori de la température de la plaque, ce qui permet une amélioration nette des résultats en contexte non-aveugle pour le modèle linéaire simple [5].

Des travaux sont actuellement en cours pour valider les résultats obtenus, notamment à l'aide d'un système de contrôle très précis, prenant également en compte la dilatation de la cible. Ceci nous permettra de caractériser le bruit de mesure et ainsi, d'isoler plus précisément les paramètres physiques pouvant entrer en jeu. Enfin, une étude thermique de la propagation du gradient de température dans la plaque métallique, nous aidera à estimer avec plus de précision la température exacte à un endroit précis situé à l'intérieur de la cible.

Références

- [1] P. Vasseur. *Étude de faisabilité d'un capteur intelligent de déplacement à courants de Foucault*. Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, 1991.
- [2] P. Comon. *Independent component analysis, a new concept?*. Signal Processing, Special issue on Higher-Order Statistics, vol. 36, pp. 287-314, Elsevier, Apr. 1994.
- [3] P. Vasseur et A. Billat. *Contribution to the development of a smart sensor using eddy currents for measurement of displacement*. Meas. Sci. Technol., vol. 5, pp. 889-895, 1994.
- [4] J.-F. Cardoso and A. Souloumiac. *Blind beamforming for non Gaussian signals*. IEE Proceedings-F, vol. 140, pp.362-370, Dec. 1993.
- [5] M. Haritopoulos, Y. Naudet, P. Vasseur, A. Billat. *Extraction of distance from an eddy-current sensor response by a source separation technique: blind context or a priori knowledge?*. Acceptée à 3rd IMACS International Multiconference on: Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC'99), Athens, Greece, July 4-8 1999.