



HAL
open science

Estimation de l'erreur de resynchronisation d'un réseau de capteurs via une approche statistique de l'ArgMax des fonctions de corrélation

Omar Bouchakour, Lynda Chehami, Emmanuel Moulin

► To cite this version:

Omar Bouchakour, Lynda Chehami, Emmanuel Moulin. Estimation de l'erreur de resynchronisation d'un réseau de capteurs via une approche statistique de l'ArgMax des fonctions de corrélation. Journées COFREND 2023, Jun 2023, Marseille, France. hal-04141406

HAL Id: hal-04141406

<https://uphf.hal.science/hal-04141406>

Submitted on 6 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Estimation de l'erreur de resynchronisation d'un réseau de capteurs via une approche statistique de l'ArgMax des fonctions de corrélation

Omar Bouchakour^{1*}, Lynda Chehami¹, Emmanuel Moulin^{1,2}

¹IEMN - Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie - UMR 8520, Université Polytechnique des Hauts de France, F-59313 Valenciennes, France.

²INSA Hauts-de-France, F-59313 Valenciennes, France.

*corresponding author, E-mail: omar.bouchakour@uphf.fr

Résumé

Le défi majeur du contrôle santé structurelle par un réseau de capteurs indépendants est d'assurer la resynchronisation en post-traitement de ces capteurs. Ceci nécessite l'estimation précise des décalages temporels inter-capteurs. L'utilisation des fonctions de corrélation des signaux bruités, en particulier l'ArgMax permet d'estimer relativement ces décalages temporels. Dans ce travail, on s'intéresse à quantifier théoriquement l'erreur de cette estimation en fonction des paramètres statistiques du bruit à savoir sa moyenne et son écart type. Des tests numériques préliminaires sont menés afin de valider la théorie. L'effet de l'erreur de resynchronisation sur le contraste de l'image est également étudié.

1. Introduction

L'évolution de la surveillance de l'état des structures au cours des dernières années nécessite des méthodes innovantes qui peuvent être mises en œuvre via des systèmes à faibles ressources matérielles (contrôle passif). La propagation d'ondes guidées ultrasonores dans les structures endommagées, à faible atténuation, est l'une des méthodes les plus prometteuses dans ce domaine [1], [2]. Cependant, ces techniques dites "actives" nécessitent généralement des sources et/ou récepteurs contrôlés et synchronisés entre eux. Ceci rend alors l'électronique complexe et intrusive. Pour y remédier, on propose ici de tirer profit des techniques passives basées sur la corrélation de bruits. Il s'agit, en particulier, d'étudier l'ArgMax des fonctions de corrélation afin d'estimer les décalages temporels d'un réseau de capteurs dédié au SHM. Des études similaires ont été établies en sismologie [3]–[5] et en acoustique sous-marine [4], [5].

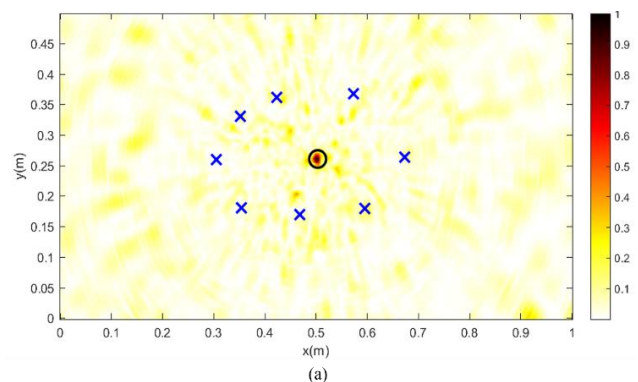
Dans ce travail, la technique d'estimation des décalages temporels inter-capteurs par l'ArgMax des fonctions de corrélation est examinée dans des cas réalistes en SHM. En effet, on s'intéresse à établir un modèle statistique permettant la quantification de l'erreur d'estimation de l'ArgMax en fonction des paramètres statistiques d'un bruit additif. Ceci permettra plus loin de bien se situer dans un intervalle de confiance pour que la resynchronisation en post traitement soit précise. Ainsi, il sera possible de faire usage des

techniques d'imagerie passive par réseaux de capteurs indépendants.

Ce papier est divisé en trois parties essentielles : dans un premier temps, un modèle statistique quantifiant l'erreur d'estimation de l'ArgMax des fonctions de corrélation est développé. Ce modèle est testé dans la deuxième partie via des essais numériques préliminaires. Finalement l'influence de l'erreur de resynchronisation est mise en évidence.

2. Contexte

Dans [6] on a prouvé que le décalage temporel introduit à un réseau de capteurs dédié au SHM dégrade significativement la qualité de localisation de défaut dans des plaques réverbérantes [1]. Comme le montre la figure 1.a, le défaut est parfaitement localisé lorsque les capteurs sont synchronisés les uns par rapport aux autres. Cependant, il est complètement perdu lorsqu'ils sont désynchronisés (Voir la figure 2.b). Une étude menée sur le contraste d'image (tel qu'il est défini dans [7]) avait permis l'obtention de l'allure représentée dans la figure 2. On constate que le contraste se dégrade progressivement en augmentant l'écart type des décalages temporels inter-récepteurs. Ainsi, c'était indispensable d'opter pour une resynchronisation en post-traitement afin d'assurer la qualité de localisation. Dans ce travail, on s'intéresse beaucoup plus à l'erreur de resynchronisation qui pourrait exister suite à la présence d'un bruit additif. Cette erreur sera quantifiée en fonction des paramètres statistiques du bruit. En plus, il est nécessaire de mettre en évidence l'effet de l'erreur de resynchronisation sur le contraste de l'image.



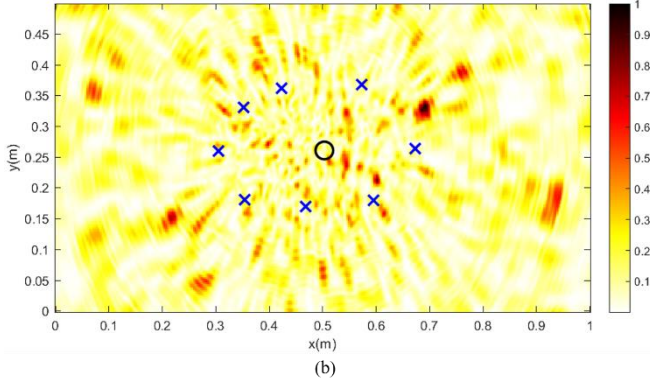


Figure 1 : Résultats de localisation de défaut dans le cas de signaux (a) synchronisés (b) désynchronisés. Les croix bleues représentent les capteurs et le cercle noir désigne la vraie position du défaut [6].

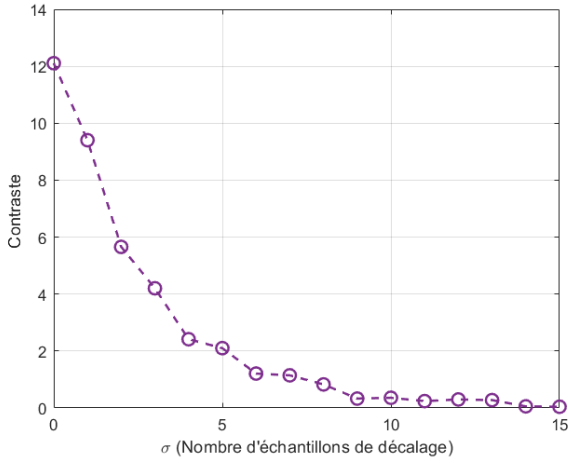


Figure 3 : Contraste de l'image en fonction de l'écart type des décalages introduits (Un échantillon = 5.2µs) [6].

3. Développements théoriques

Soient R_i et R_j deux récepteurs. On note par $C_{i,j}(t)$ l'inter-corrélation des signaux enregistrés par ces deux capteurs qui peut être exprimée comme suit :

$$C_{i,j}(t) = C_{i,j}^+(t) + C_{i,j}^-(t), \quad (1)$$

avec $C_{i,j}^+(t)$ et $C_{i,j}^-(t)$ désignent relativement la partie causale et la partie anti-causale de $C_{i,j}(t)$.

On définit $A_{i,j}(t)$ comme la fonction de corrélation entre $C_{i,j}^+(t)$ et $C_{i,j}^-(t)$, et $A_{i,j}^b(t)$ la version bruitée de celle-ci (bruit $b(t)$ de densité de probabilité f_b , d'écart type σ_b et de moyenne statistique μ_b),

$$A_{i,j}^b(t) = A_{i,j}(t) + b(t) \quad (2)$$

Soient τ et $\hat{\tau}$ l'ArgMax de $A_{i,j}(t)$ et $A_{i,j}^b(t)$ successivement :

$$\tau = \operatorname{argmax}(A_{i,j}(t)) \quad (3)$$

$$\hat{\tau} = \operatorname{argmax}(A_{i,j}^b(t)) \quad (4)$$

Pour N points autour de la position du maximum, la probabilité que $\hat{\tau}_{1 \leq k \leq N}$ soit l'ArgMax de $A_{i,j}^b(t)$ est définie dans [8], [9] par :

$$P_{\max}(\hat{\tau}_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} [\prod_{l=1, l \neq k}^N F(b_l)] f(b_k) db, \quad (5)$$

avec $F(b)$ la fonction de répartition du bruit (Ceci est valable quelle que soit la densité de probabilité du bruit [8]).

L'erreur quadratique sur $\hat{\tau}$ est définie par :

$$MSE(\hat{\tau}) = \sqrt{\mathbb{E}[(\tau - \hat{\tau})^2]}, \quad (6)$$

avec $\mathbb{E}[\cdot]$ désigne l'espérance mathématique sur un ensemble de réalisations.

Ainsi, $MSE(\hat{\tau})$ est exprimée via la formule suivante :

$$MSE(\hat{\tau}) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (\tau - \hat{\tau})^2 P_{\max}(\tau - \hat{\tau})} \quad (7)$$

En remplaçant $P_{\max}(\tau - \hat{\tau})$ par son expression, on obtient la formule suivante :

$$MSE(\hat{\tau}) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (\tau - \hat{\tau})^2 \int_{-\infty}^{+\infty} [\prod_{l=1, l \neq k}^N F(b_l)] f(b_k) db} \quad (8)$$

L'erreur quadratique sur l'ArgMax de $A_{i,j}^b(t)$ ne dépend que des paramètres statistiques du bruit additif. Pour valider la formule 8, des simulations numériques sont menées dans la section suivante.

4. Résultats et discussion

Des simulations numériques par éléments finis ont été menées en utilisant le logiciel ELMER. La configuration testée consiste en une plaque d'aluminium de dimensions 1m × 0.5m et d'épaisseur 3mm. On place deux récepteurs R_1 et R_2 (Croix bleues). Un champ acoustique est généré par une distribution de 576 sources ponctuelles uniformément réparties sur la plaque (Points rouges). Ces sources sont impulsionnelles de forme sinusoïdale (de fréquence $f = 20kHz$) pondérée par une fenêtre rectangulaire de durée $T = 50\mu s$. La simulation est effectuée de telle sorte à privilégier le mode A0. La fréquence d'échantillonnage est $F_s = 500kHz$.

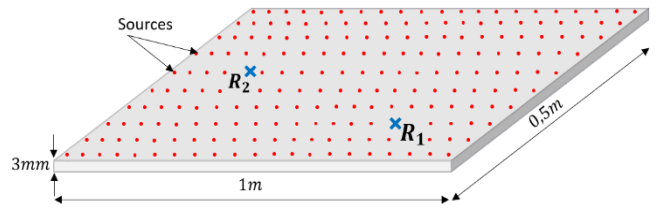


Figure 3 : Schéma de la configuration à tester.

Un décalage de $\Delta = 6\mu s$ est introduit au niveau des signaux enregistrés par R_1 par rapport à ceux enregistrés par

R_2 . L'inter-corrélation moyennée sur l'ensemble des sources est calculée. Ensuite, la corrélation entre sa partie causale et anti-causale est obtenue (Voir la figure 4). On constate qu'un pic de ressemblance correspond à $\tau = 2\Delta$. C'est la caractéristique de l'ArgMax des fonctions de corrélation qui permet d'estimer le décalage temporel inter-récepteurs.

Pour se mettre dans un cas beaucoup plus réaliste, un bruit blanc gaussien de moyenne statistique nulle et d'écart type variable est ajouté à $A_{i,j}(t)$. Sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(b) = \frac{1}{\sigma_b \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{b}{\sigma_b}\right)^2}, \quad (9)$$

où σ_b est l'écart type du bruit ajouté.

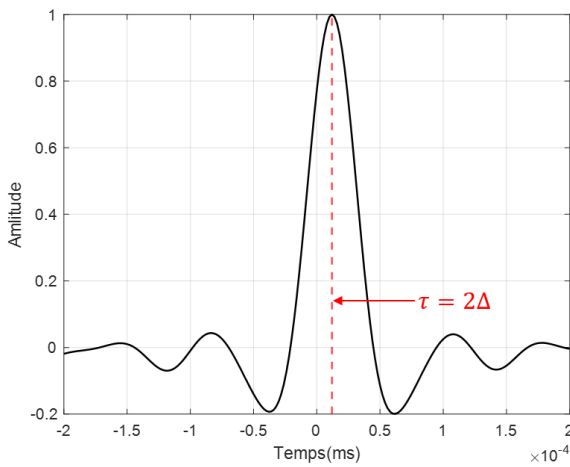


Figure 4 : Corrélation $A_{i,j}(t)$ entre la partie causale et la partie anti-causale de l'inter-corrélation moyennée entre R_1 et R_2 .

L'erreur quadratique moyenne est tirée numériquement via un nombre de tirage sur chaque valeur de σ_b . En effet, pour un σ_b donné, $\hat{\tau}$ est estimé sur une fenêtre $[-200\mu\text{s}, 200\mu\text{s}]$ pour chaque tirage. Ensuite, la moyenne statistique de $(\tau - \hat{\tau})^2$ est calculée sur l'ensemble des tirages réalisés afin de remonter à l'erreur quadratique moyenne. Cette erreur est comparée avec $MSE(\hat{\tau})$ exprimée dans la section 3. Les allures obtenues sont représentées dans la figure 5. D'une part, il est clair que le résultat numérique est en excellent accord avec la théorie. D'une autre part, on constate que l'erreur augmente en fonction de l'écart type du bruit jusqu'à sa stabilisation à $\sigma_b = 1.75$. La stabilité relative de la courbe peut être interprétée par le fait que la fonction de corrélation devient complètement noyée dans le bruit.

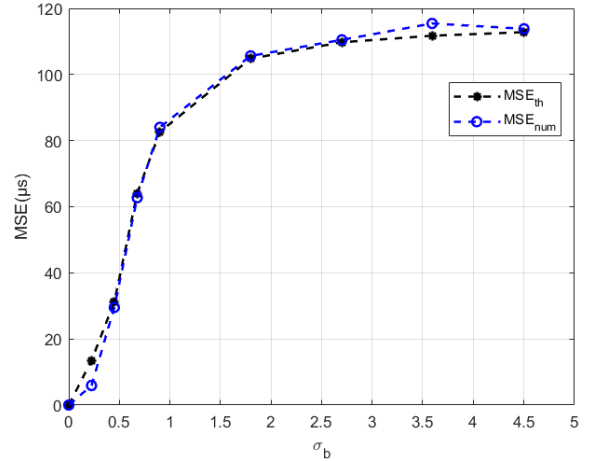


Figure 5 : Comparaison entre l'erreur quadratique moyenne numérique (Ligne pointillée bleue) et théorique (Ligne pointillée noire).

En se mettant dans les mêmes conditions expérimentales que [6], on peut remonter à la variation du contraste de l'image en fonction de l'écart type du bruit additif. Comme le montre la figure 6, le contraste se dégrade en augmentant l'écart type du bruit. Ceci est dû à l'augmentation de l'erreur commise dans la resynchronisation.

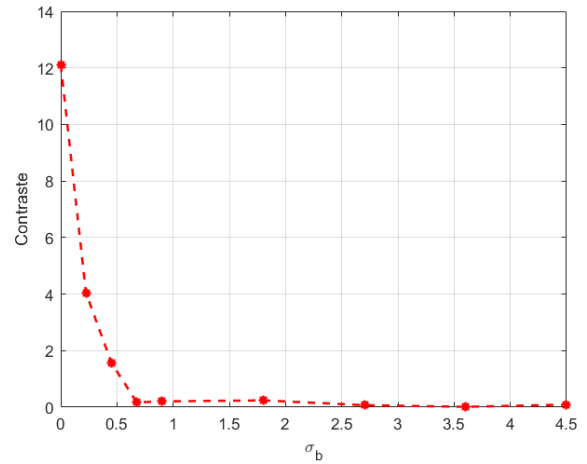


Figure 6 : Contraste de l'image en fonction de l'écart type du bruit.

5. Conclusion

Dans ce papier, un modèle statistique décrivant la variation de l'erreur quadratique d'estimation de l'ArgMax des fonctions de corrélation est développé. Il est montré que cette erreur dépend des paramètres statistiques du bruit à savoir la moyenne statistique et l'écart type. Des tests numériques sont réalisés pour valider le modèle théorique. Ceci permettra plus loin de prédire et compenser l'erreur de

resynchronisation en post-traitement d'un réseau de capteurs indépendants dédié au SHM.

Références

- [1] L. Chehami *et al.*, 'Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation', *Journal of Applied Physics*, vol. 115, no. 10, p. 104901, Mar. 2014.
- [2] L. Chehami, J. De Rosny, C. Prada, E. Moulin, and J. Assaad, 'Experimental study of passive defect localization in plates using ambient noise', *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 62, no. 8, pp. 1544–1553, Aug. 2015.
- [3] C. Sens-Schönfelder, 'Synchronizing seismic networks with ambient noise', *Geophysical Journal International*, vol. 174, no. 3, pp. 966–970, Sep. 2008.
- [4] L. Stehly, M. Campillo, and N. M. Shapiro, 'Traveltime measurements from noise correlation: stability and detection of instrumental time-shifts', *Geophysical Journal International*, vol. 171, no. 1, pp. 223–230, Oct. 2007.
- [5] K. G. Sabra, P. Roux, A. M. Thode, G. L. D'Spain, W. S. Hodgkiss, and W. A. Kuperman, 'Using Ocean Ambient Noise for Array Self-Localization and Self-Synchronization', *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 30, no. 2, pp. 338–347, Apr. 2005.
- [6] O. Bouchakour, L. Chehami, and E. Moulin, Emmanuel, 'Passive resynchronization of a sensor network dedicated to the structural health monitoring of reverberant plates'. submitted to *Forum Acusticum*, Sep. 11, 2023.
- [7] M. Terzi *et al.*, 'Pump-probe localization technique of varying solid contacts', *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 149, no. 5, pp. 2943–2949, May 2021.
- [8] S. Soltani and M. W. Mutka, 'ArgMax and ArgMin: transitional probabilistic models in cognitive radio mesh networks: TPM in CRN', *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 15, no. 9, pp. 1355–1367, Jun. 2015.
- [9] J. Ianniello, 'Time delay estimation via cross-correlation in the presence of large estimation errors', *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. 30, no. 6, pp. 998–1003, Dec. 1982.