

Détection de défauts sous l'interface en échographie ultrasonore

P.Simard-M.Bulo

ura cnrs n°817 HEUDIASYC
Université de Technologie de Compiègne
BP 649
60206 Compiègne cedex

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous nous attachons à résoudre le problème de la détection d'un petit défaut proche de l'interface par échographie ultrasonore. Pour atteindre notre objectif, nous comparerons les techniques spectrales définies il y a une dizaine d'années avec les techniques plus récentes de déconvolution.

1. Introduction :

L'utilisation des ultrasons dans les techniques de contrôle non destructif est désormais bien connue: Une ondelette w émise par une céramique résonnante se propage au sein du matériau contrôlé et une partie de son énergie est renvoyée sous forme d'onde réfléchi à chaque rupture d'impédance acoustique rencontrée.

L'échographie ultrasonore a connu un rapide développement comme technique de contrôle non destructif. C'est une technique plutôt simple à mettre en oeuvre et relativement bon marché. De plus, de nombreuses publications ont permis aux contrôleurs de disposer d'algorithmes de traitement de ces signaux permettant d'améliorer les conditions de détection, voire d'obtenir une classification des défauts.[1]

Il n'en demeure pas moins qu'un problème majeur subsiste: C'est le problème de la détection d'un défaut sous l'interface [3], c'est à dire sous la surface du matériau. En effet, si l'on suppose un défaut de petite taille très proche de la surface du matériau à contrôler, l'écho réfléchi par celui ci d'une part présente une amplitude relative très faible, et d'autre part est noyé dans l'écho dû à la surface du matériau, ce qui le rend difficilement décelable.

Le problème peut alors être abordé de différentes manières, et nous nous sommes attachés à

ABSTRACT

Testing materials by Ultrasonic NDT present a major problem in keep with the length of the acoustic wavelet that is used. We propose to solve this problem by inverting the signal and estimating the reflexivity series .

comparer les méthodes spectrales telles qu'elles ont été définies au début des années 80 [2] avec les techniques plus récentes de déconvolution.

Nous rappelons donc rapidement les méthodes basées sur le cepstre, et la méthode de soustraction spectrale. Des résultats sur des signaux de simulation permettent de préciser les possibilités et les limites de ces approches en fonction du rapport signal à bruit.

Nous décrivons ensuite plusieurs méthodes effectuant la déconvolution de ce type de signaux. Tout d'abord des méthodes de signatures (il est en effet raisonnable ici de supposer le système connu, c'est à dire l'onde acoustique utilisée lors d'un contrôle), et ensuite les techniques de déconvolution myope.

Enfin nous présentons des essais sur signaux réels, qui montrent la puissance des techniques d'inversion bayésienne pour peu que l'on choisisse le bon détecteur

2. Modélisation

On considère habituellement que la réponse du matériau à une émission d'ultrason est une suite de copies du signal émis simplement décalées d'un temps correspondant à un aller et un retour de l'onde émise entre l'émetteur et l'interface responsable de la rupture d'impédance acoustique qui génère l'écho.



$$s(t) = \sum_i a_i \omega(t-t_i) = \sum_i a_i \omega(t) * \delta(t-t_i) \quad (1)$$

où t_i correspond au temps mis par l'ondelette pour effectuer un aller retour entre l'interface et le réflecteur i .

Dans le cas qui nous intéresse ici, nous nous limiterons au cas d'un écho unique:

$$s(t) = \omega(t) + a_0 \omega(t-t_0) \quad (2)$$

Pour tester les performances des algorithmes, nous utiliserons dans un premier temps des signaux synthétiques réalisés en convoluant un fichier contenant une ondelette réelle enregistrée lors d'une opération de contrôle non destructif sur un matériau sans défaut, avec une réponse impulsionnelle composée de 2 pics: Le premier est placé à l'indice $k=3$ et son amplitude est fixée à 1; le second a une amplitude fixée à 0.2 ou 0.5, et il est placé à un indice choisi pour faire varier le chevauchement des ondelettes lors de la convolution. L'ondelette dont nous disposons contient 100 points (non nuls); Par suite, en plaçant le second pic à l'indice 28, on obtient un chevauchement de 75% (fig 1)...etc.

3. Les méthodes spectrales

3.1 La soustraction spectrale

Considérant le signal décrit par (2), et supposant connu ω , on peut construire le signal $d(t)$ par transformée de Fourier inverse de la différence spectrale

$$|S(\xi)|^2 - |W(\xi)|^2$$

et il est assez simple d'établir que ce signal a pour expression théorique :

$$d(t) = (a_0^2 \delta(t) + a_0 \delta(t-t_0) + a_0 \delta(t+t_0)) * C_{\omega\omega}(t)$$

où $C_{\omega\omega}(t)$ représente la fonction d'autocorrélation de ω . On observe que, si $a_0 \ll 1$, alors $a_0^2 \ll a_0$, et on peut espérer retrouver le couple (a_0, t_0) . Il est clair qu'en présence de bruit, s'ajoute à cette expression un terme $\sigma_n^2 \delta(t)$.

Cette technique permet effectivement de retrouver dans le cas des signaux de simulations des échos présentant un chevauchement de 75 à 80% pour un rapport d'amplitude de 0.2 et un rapport signal à bruit supérieur à 10dB (fig 2). A partir de 80%, l'écho n'est plus détectable, même en absence de bruit. D'une façon générale, la méthode n'est plus exploitable en deçà d'un rapport signal à bruit de 5dB environ.

3.2 Méthode cepstrale :

Si on applique le cepstre de puissance au signal modélisé par (2), on peut montrer que la présence d'un écho d'amplitude a_0 à l'instant t_0 se traduit sur le cepstre par une série de pics centrés sur les instants multiples de t_0 et d'amplitudes décroissantes. Cette technique n'est utilisable qu'en absence totale de bruit, et si l'on est certain de ne rechercher qu'un seul écho. Moyennant quoi, on peut espérer détecter un écho présentant un chevauchement de 75% pour un rapport d'amplitude de 0,5. Il est donc clair que cette technique n'est pas applicable au problème qui nous concerne.

4. Méthode de déconvolution

Nous nous limiterons ici à la présentation de deux méthodes de signature. Tout d'abord, une méthode de moindres carrés selon un algorithme adapté au problème; ensuite une méthode basée sur l'estimation bayésienne de la séquence de réflectivité.

4.1 Déconvolution L2

La déconvolution au sens des moindres carrés consiste à trouver une fonction $y(k)$ minimisant la norme L2 de la différence entre l'observation et la reconstruction selon un modèle donné mettant en oeuvre cette fonction y . S.Mottelet et al. ont montré [5] que l'algorithme suivant donnait de meilleurs résultats que la méthode classique compte tenu de la structure très particulière de la fonction à reconstruire, laquelle est constituée d'une suite peu dense de pics.

Algorithme :

i) initialisation :

prendre $y^{(0)}$ = vecteur nul ;

$$\text{calculer } \rho = \frac{1}{w^T w}$$

ii) calcul du résidu :

$$r^{(k)} = z - W y^{(k)}$$

et du gradient

$$g^{(k)} = \nabla_y J(y^{(k)}) = -W^T r^{(k)}$$

iii) déterminer la direction optimale j_{opt} donnant la dérivée partielle la plus grande

$$\text{Max}_j |g_j^{(k)}|$$

iv) mettre à jour

$$y_{j_{opt}}^{(k+1)} = y_{j_{opt}}^{(k)} - \rho \cdot g_{j_{opt}}^{(k)}$$

retour en ii)

Cet algorithme demande une bonne connaissance de l'ondelette, avec cependant de bonnes qualités de robustesse. Il permet la détection d'échos présentant un chevauchement jusqu'à 85% pour un rapport d'amplitude de 0.2 et un rapport signal à bruit pouvant descendre à 2dB.

Compte tenu de sa nature itérative, cet algorithme peut le cas échéant détecter d'autres échos.[5]

4.2 Déconvolution par maximum de vraisemblance:

Il s'agit d'utiliser ici un algorithme basé sur le concept de vraisemblance généralisée défini par Mendel dans les années 80, et qui a fait l'objet d'un grand nombre de publication.

Nous utilisons ici l'algorithme en déconvolution dite de signature, c'est à dire que nous supposons connus la réponse du transducteur. La phase de détection sera réalisée à l'aide d'un détecteur à remplacement unique le plus probable SMLR défini par Kormylo et Mendel [7].

La figure (3) montre le résultat obtenu pour un chevauchement de 92%, et un rapport signal à bruit de 10dB ; le rapport d'amplitude est toujours de 0.2. D'autres essais sont en cours, et nous porte à croire qu'il ne s'agit pas là d'une limite.

5. Expérimentation sur signaux réels

Il s'agit d'échographies d'un bloc d'acier (Z2CN 18-10) dans lequel on a percé des trous parallèlement à la surface contrôlée. Ces trous d'un diamètre de $0.5 \pm 0.05\text{mm}$, sont percés à des distances de 2.75, 2.25, et 1.75mm de la surface. (fig 4a, 4b, 4c). Les enregistrements ont été effectués sur 8 bits à 100MHz et il a été nécessaire de saturer l'écho d'interface pour que la quantification laisse apparaître les échos de défauts. La partie saturée a été éliminée avant traitement, ce qui entraîne une limitation de l'application à environ 1.75mm de la surface. Cette situation correspond à un chevauchement moins sévère que ceux qui ont été réalisé sur les signaux d'essais, mais la situation réelle impose des conditions plus difficiles dans la mesure ou tout n'est pas pris en compte dans le modèle très simple que nous avons utilisé.

Dans ce qui suit, le problème de chevauchement des échos n'intervient pas avant 2.75mm, et devient vraiment sévère avec 1.75mm. Les échos des signaux enregistrés au droit de défauts situés à 3.75 et 4.25mm sont en fait visibles à l'oeil nu.

5.1 Différence spectrale :

La méthode de recherche d'échos par différence spectrale conduit à des résultats peu exploitables. La limite minimum de profondeur d'un défaut décelable semble être atteinte dans cette expérience

pour un défaut situé à 4.25mm. Encore faut-il ajouter que la détection de cet écho, et l'estimation de sa position demandera une opération de traitement supplémentaire. (fig 4)

5.2 Déconvolution L2 :

L'algorithme présenté plus haut permet de descendre la limite correctement à 2.75mm, et ne pose aucun problème lorsqu'il n'y a pas chevauchement.

5.3 Déconvolution de vraisemblance maximum :

Pour l'analyse des signaux réels, nous avons utilisé le détecteur à erreur de prédiction de Giannakis et Mendel [8]. La figure 5 résume à elle seule la puissance des méthodes bayésienne, puisqu'il apparaît clairement un pic correspondant à l'écho du défaut situé à 1.75mm.

6. Conclusion :

Dans cette étude, nous avons montré qu'il existait désormais de nombreuses possibilités pour améliorer la résolution sous l'interface. Les performances sont en quelque sorte proportionnelles à la difficulté de mise en oeuvre.

Il semble raisonnable de dire que les méthodes purement spectrales ont vécu. Les spécialistes savaient déjà les risques liés à la division spectrale. Les méthodes utilisées ici ne présentent pas les mêmes inconvénients intrinsèques, mais leurs performances sont assez médiocres.

En revanche, les techniques de déconvolution semblent offrir un éventail assez large et répondre de façon plus satisfaisante à ce type de problème. Il faut ajouter que la méthode de vraisemblance maximum se prête à un traitement en méthode "myope", auquel cas l'opérateur n'est pas obligé de spécifier l'ondelette utilisée.

Avec ce dernier algorithme, la limitation que nous avons rencontrée ne provenait pas de la méthode, mais de la quantification du signal. Il paraît probable que le problème de la détection sous l'interface en échographie sera facilement résolu par ces méthodes le jour où les contrôleurs auront à leur disposition des cartes permettant le codage sur 16 bits, peut être même 12 bits de leur signaux.

Bibliographie :

[1] P.Simard and al.

Contribution à l'automatisation de contrôle non destructif par ultrasons de plaques en fibres de verres
Proc. of the 4th European Conf. on NDT, London, 1987

[2] M.Bulo, S.Mottelet, P.Simard

Comparaison d'algorithmes de déconvolution pour l'analyse et la classification des signaux d'échographie ultrasonore
13ème colloque Grets, Juan les Pins, 1991



- [3] R.Lengelle
Amélioration de la résolution sous l'interface en échographie ultrasonore par des techniques de traitement du signal.
Thèse de doctorat, UTC, 1983
- [4] S.Mottelet
Etude de deux méthodes de déconvolution: normes Lp et minimum entropie
rapport de DEA Contrôle des Systèmes, UTC, 1991.
- [5] P.Simard & S.Mottelet
un algorithme rapide séquentiel de déconvolution L2,
Preprint ura n°817 Heudiasyc, U.T.C., juin 1993.
- [6] M.Bulo
Problème inverse en traitement du signal. Etude, mise en oeuvre et comparaison d'algorithmes de déconvolution. Application au CND par US.
Thèse de doctorat, Heudiasyc, U.T.C., 1992
- [7] J. J.Kormylo & J.M.Mendel
Maximum likelihood detection and estimation of Bernoulli Gaussian Processes
IEEE trans.on InformationTh., 482-488, may 1982
- [8] G.B.Giannakis, J.M.Mendel, X.Zhao
A fast prediction error detector for estim. sparse spike seq.
IEEE Trans.on Geosc.and Rem. Sens., 344-351, may 1989

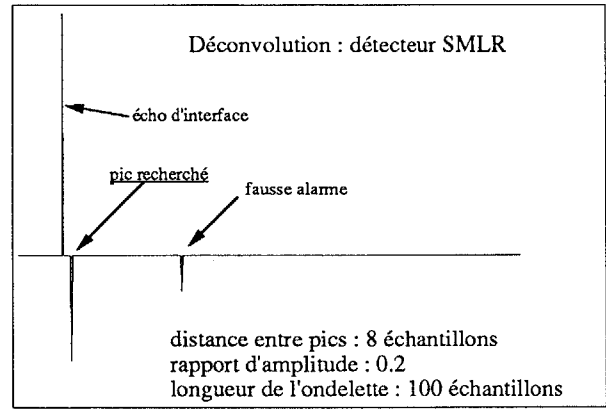


fig 3 : Déconvolution par maximum de vraisemblance

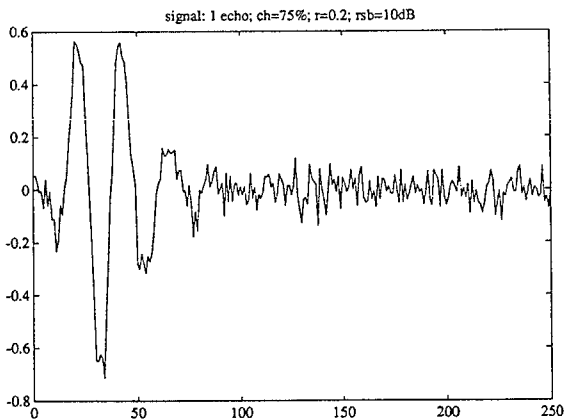


fig 1 : signal de synthèse; chevauchement de 75%

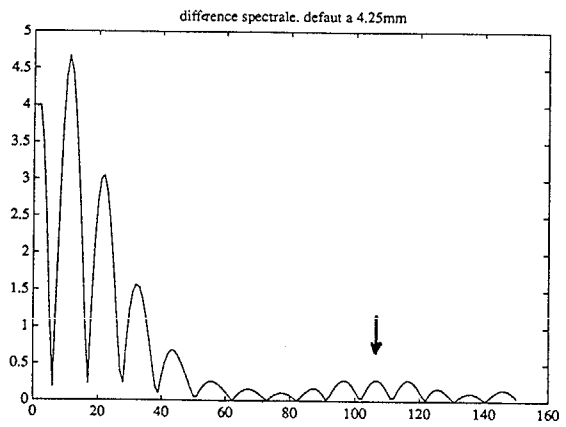


fig 4 : différence spectrale sur signal réel défaut à 4.25 mm

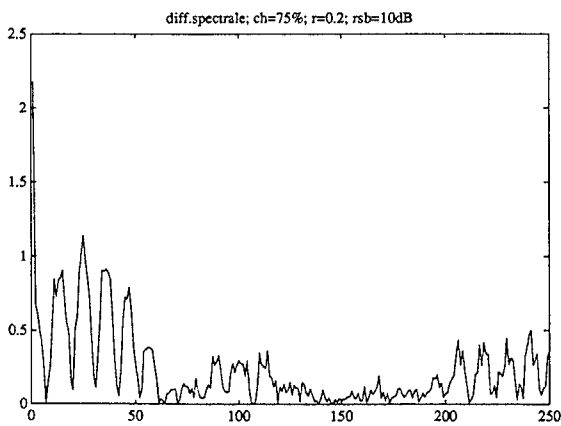


fig 2 : application du traitement de différence spectrale sur le signal de la figure 1

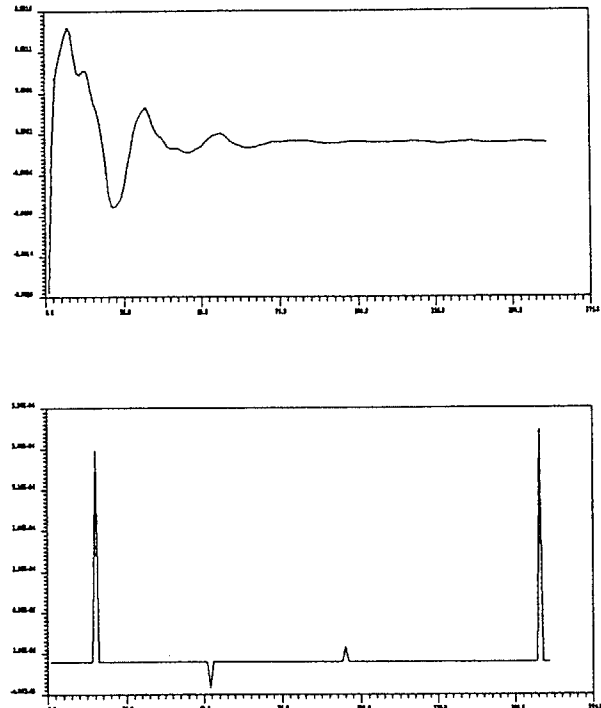


fig 5 : signal réel correspondant à un défaut situé à 1.75mm et sa déconvolution