



LECTURE D'IMAGES OU DE TRANSFORMÉES D'IMAGES AU MOYEN
DE LIGNES A RETARD ACOUSTIQUES

INTRODUCTION.

L'utilisation de lignes à retard acoustiques dans les systèmes d'imagerie acoustique offrent de nombreuses possibilités.

Le domaine d'application le plus immédiat est la formation d'images dont les deux dimensions sont fournies par la direction des échos d'une part et leur instant d'arrivée d'autre part. Ce domaine sera analysé en détail en particulier en ce qui concerne les aberrations, le comportement en bruit et la vitesse de balayage.

D'autres types d'utilisation seront analysés plus brièvement : des images frontales peuvent être formées en jouant sur les directivités des antennes d'émission et de réception. Les lignes à retard permettent également d'effectuer des transformées globales d'image (Fourier). Elles peuvent aussi réaliser la lecture point par point d'une ligne de capteurs; on montre que pour réaliser cette lecture on peut dans certains cas avoir intérêt à passer par l'intermédiaire d'une transformée. Enfin, on décrit succinctement une version totalement intégrée d'un dispositif lecteur d'image à onde de surface dont l'application peut être intéressante dans le domaine des hautes fréquences où la miniaturisation pose des problèmes technologiques.

1. - VISUALISATION DES FOND. FORMATION DE VOIES.

Dans ce cas, on forme une image à deux dimensions par la mesure de la direction θ , et de l'instant d'arrivée t des échos reçus après l'émission d'une impulsion ultrasonore (voir Fig. 1).

Un objet situé à une distance ρ dans une direction θ , par rapport à une antenne de réception constituée de M capteurs, donne lieu à un écho dont la phase est, pour le capteur m :

$$\psi_m = \Omega t - K\rho - mKa \sin \theta - m^2 \frac{Ka^2}{2\rho} \cos^2 \theta \quad (1)$$

- Ω : fréquence porteuse acoustique
- K : nombre d'onde à la fréquence Ω
- a : distance entre deux capteurs

Le procédé classique de détection consiste à former N voies en parallèle dans des directions θ_n , en sommant les signaux des capteurs après les avoir déphasés d'une quantité :

$$\phi_{m,n} = mKa \sin \theta_n + m^2 \frac{Ka^2}{2\rho} \cos^2 \theta_n \quad (2)$$

La relation (2) montre que pour détecter les objets situés dans la direction θ_n , la pondération de phase a un terme linéaire, indépendant de la distance ρ des objets et un terme quadratique qui dépend de cette distance. Généralement, pour alléger la réalisation technologique du système, on néglige cette variation, ce qui entraîne une limitation de la profondeur de champ.

Dans le cas de détection en champ lointain ($\rho \rightarrow \infty$), on peut négliger le terme de phase quadratique et définir la résolution angulaire du système à $\frac{2}{\pi}$

$$\delta(\sin \theta) = \frac{2\pi}{KL} \quad (3)$$

avec $L = Ma$ longueur de l'antenne.

On admettra donc que les différentes voies sont formées dans les directions θ_n telles que :

$$\sin \theta_n = n \delta(\sin \theta) = n \frac{2\pi}{KL} \quad (4)$$

Pour un dispositif explorant un champ angulaire $\pm\theta$ le nombre de voies sera donc :

$$N = \frac{2 \sin \theta}{\delta(\sin \theta)} = \frac{KL}{\pi} \sin \theta \quad (5)$$

La suppression des lobes images imposera un nombre de capteurs : $M \geq N$.

1.1 Dispositif à ligne à retard mettant en jeu une onde de surface.

Le système est schématiquement représenté Fig. 1. Il comporte une antenne de M capteurs indépendants disposés en lignes, et une ligne à retard à M prises de sortie. τ est la différence de retard entre prises. Les signaux de réception, après préamplification et filtrage, sont mélangés respectivement avec les signaux de la ligne à retard et les sorties des mélangeurs sont sommées. Ce type de dispositif a été proposé pour la première fois par Havlice et Reeder [1].

La phase du signal à la prise m de la ligne à retard est :

$$\phi_m = \phi(t + m\tau)$$

τ : retard entre prises

$\phi(t)$ étant la phase du signal de la prise 0.



LECTURE D'IMAGES OU DE TRANSFORMEES D'IMAGES AU MOYEN
DE LIGNES A RETARD ACOUSTIQUES

La phase de la fréquence somme à la sortie des mélangeurs est :

$$\psi_m = \phi_m + \varphi_m \quad (6)$$

$$= \phi(t+m\tau) + \Omega t - K\rho - m Ka \sin\theta - m^2 \frac{Ka^2}{2\rho} \cos^2\theta \quad (7)$$

En développant cette expression autour de $m = 0$, on obtient :

$$\begin{aligned} \psi_m = & \phi(t) + \Omega t - K\rho + m(\phi^{(1)}(t)\tau - Ka \sin\theta) + \dots \\ & + \frac{m^2}{2} [\phi^{(2)}(t)\tau^2 - \frac{Ka^2}{\rho} \cos^2\theta] + \sum_3^{\infty} \phi^{(q)}(t)\tau^q \frac{m^q}{q!} \end{aligned} \quad (8)$$

$\phi^{(q)}$ étant la dérivée q ième de $\phi(t)$

Ces m signaux se somment en phase, en négligeant les termes en m de degrés supérieurs à 2, pour

$$\left. \begin{aligned} \phi^{(1)}(t) \times \tau - Ka \sin\theta &= 2p\pi \\ \phi^{(2)}(t) \times \tau^2 - \frac{Ka^2}{\rho} \cos^2\theta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

La résolution de ce système d'équations différentielles donne :

$$\sin\theta = \text{th} \frac{a\tau}{\rho\tau} \quad (10)$$

$$\phi^{(1)}(t) = \omega(t) = Ka \text{th} \frac{a\tau}{\rho\tau} + p \frac{2\pi}{\tau} \quad (11)$$

La durée de balayage d'un champ angulaire $\pm \theta$ est :

$$T_B = 2 \frac{\rho\tau}{a} \text{arc th}(\sin\theta) \quad (12)$$

ce qui, compte-tenu du trajet aller-retour des échos, et pour une vitesse $V = \frac{\Omega}{K}$ des ondes ultrasonores, correspond à une résolution en distance :

$$\Delta_D = \frac{\Omega\rho\delta}{Ka} \text{arc th}(\sin\theta) \quad (13)$$

La résolution frontale du système pour le milieu du champ et pour une résolution angulaire petite ($\text{tg}(\delta\theta) \approx \delta(\sin\theta)$), est d'après (3) :

$$\Delta_F = \frac{2\pi}{KL} \rho \quad (14)$$

On obtiendra une résolution en distance comparable à la résolution frontale si d'après (13) et (14)

$$\tau = \frac{2\pi}{\Omega} \frac{1}{M} \frac{1}{\text{arc th} \sin\theta} \quad (15)$$

On ne peut pas choisir τ aussi petit que l'on veut car le nombre de prises ne peut excéder quelques unités par mm. Si l'on admet que 3 prises par mm sont une limite technologique, et pour des vitesses d'ondes de surface acoustiques de 3000 m/s, τ doit être supérieur à 100 ns, ce qui limite l'utilisation de ce

procédé à des systèmes tels que :

$$\frac{2\pi}{\Omega} \times \frac{1}{M} \times \frac{1}{\text{arc th} \sin\theta} > 0,1 \mu\text{s} \quad (15)$$

Cette limitation provient du fait que la vitesse de balayage angulaire (la pente de la rampe de fréquence) ne peut être choisie librement car elle gouverne par ailleurs la distance de focalisation de la réception.

1.2. Dispositif à ligne à retard mettant en jeu deux ondes de surface.

Ce procédé évite la limitation mise en évidence précédemment. On utilise ici les deux entrées de la ligne à retard de la Fig. 1 pour émettre deux ondes de surface se propageant en sens contraire. La prise m détecte deux signaux dont les phases respectives sont

$$\phi_{1,m} = \phi_1(t + m\tau)$$

$$\phi_{2,m} = \phi_2(t - m\tau)$$

Après mélange avec la sortie du capteur m, on obtient un signal de phase :

$$\psi_m = \phi_{1,m} + \phi_{2,m} + \varphi_m$$

De manière analogue à l'analyse précédente, on développe ψ_m autour de $m = 0$:

$$\begin{aligned} \psi_m = & \phi_1(t) + \phi_2(t) + \Omega t - K\rho + m[\phi_1^{(1)}(t)\tau - \phi_2^{(1)}(t)\tau - Ka \sin\theta] \dots \\ & + \frac{m^2}{2} [\phi_1^{(2)}(t)\tau^2 + \phi_2^{(2)}(t)\tau^2 - \frac{Ka^2 \cos^2\theta}{\rho}] + \sum_3^{\infty} [\phi_1^{(q)}(t) + (-1)^q \phi_2^{(q)}(t)] \tau^q \frac{m^q}{q!} \end{aligned} \quad (16)$$

La présence d'une nouvelle fonction indépendante permet de prendre en compte le terme en m^3 et de repousser l'approximation au 4^e ordre. On obtient ainsi un système de 3 équations différentielles en $\phi_1(t)$, $\phi_2(t) \sin\theta(t)$ dont la résolution fournit en particulier la loi temporelle de balayage angulaire qui est de la forme :

$$\sin\theta = 2 \sin\theta \frac{t}{T_B} \quad (17)$$

expression où T_B , durée de balayage du champ angulaire est une constante d'intégration choisie arbitrairement indépendamment du retard τ entre prises. Le choix de T_B n'a de conséquence que sur la forme des signaux à propager dans la ligne à retard.

Ce procédé permet ainsi d'étendre le domaine d'application de la ligne à retard à des fréquences ultrasonores élevées à de grands champs angulaires sans impliquer de retard entre prises τ trop petit.



LECTURE D'IMAGES OU DE TRANSFORMÉES D'IMAGES AU MOYEN
DE LIGNES A RETARD ACOUSTIQUES

Il faut noter par ailleurs que les systèmes utilisant des lignes à retard offrent de meilleures performances, en ce qui concerne la profondeur de champ, que la formation de voies en parallèle par cellules à déphasage, car il est possible de modifier à chaque balayage angulaire, les paramètres de la (ou des) rampe (s) de fréquence de manière à toujours rester focalisé à la distance des objets détectés. Les aberrations sont du 4^{ième} degré en m pour le système à deux rampes, du 3^{ième} degré pour les systèmes à une rampe, et du 2^{ième} degré pour la formation de voies parallèle à terme quadratique fixe.

1.3. Comportement en bruit.

Deux cas sont à considérer :

- Si, avant d'être appliqués aux mélangeurs, les signaux délivrés par les transducteurs sont filtrés et amplifiés suffisamment pour que la puissance de bruit d'entrée (bruit de mer ou bruit d'entrée des préamplificateurs) reste toujours prépondérante à celle des diverses sources de bruit situées en aval dans la chaîne de détection, le comportement en bruit est identique à celui obtenu par formation de voies en parallèle.
- Si dans un souci de simplification technologique, on applique directement les signaux des capteurs aux mélangeurs, les bruits d'origines diverses ne pourront être ensuite filtrés que dans une bande $\frac{N}{T_B}$ pour N voies balayées en une durée T_B . Cette bande de filtrage est N fois plus grande que la bande $\frac{1}{T_B}$ qui aurait été adoptée pour un filtrage préalable au mélange. Par ailleurs, le mélange s'accompagne inévitablement d'une atténuation A de la puissance de signal. Les pertes en signal à bruit sont alors :

$$P(\text{dB}) = 10 \text{ Log } N + A(\text{dB}) \quad (18)$$

2. - FORMATION D'IMAGES FRONTALES.

Nous allons maintenant brièvement décrire une autre possibilité d'application des lignes à retard acoustiques dans le domaine de l'imagerie. On forme dans ce cas une image frontale dans un plan $z = \text{Cte}$ (Fig. 2).

On utilise pour cela une antenne d'émission constituée d'une ligne de transducteurs disposés selon la direction y , dont le lobe d'émission présente une ouverture 2α dans le plan xz . Une pondération en phase réalisée au moyen d'une ligne à retard, de manière

analogue à ce qui a été décrit précédemment, permet de focaliser l'énergie d'émission dans le plan image, selon une ligne $y = \text{Cte}$.

Une antenne de réception, disposée en croix par rapport à l'antenne d'émission (selon l'axe x) utilisée dans les mêmes conditions que précédemment permet de balayer cette ligne.

Les paramètres de pondération de phase sont modifiés à chaque émission de manière à faire évoluer la position y de la ligne de focalisation de l'énergie émise dans le plan d'image. Ce système a été proposé par J. Frazer et al [2].

3. - TRANSFORMÉES D'IMAGE.

L'usage de lignes à retard à onde acoustique de surface peut être envisagé dans le cadre plus général de transformées d'image, les utilisations précédemment décrites ne constituant en fait que des cas particuliers de transformées. Nous développerons deux exemples simples : l'échantillonnage et la transformée de Fourier. Les dispositifs restent matériellement identiques à ce qui est représenté Fig. 1, seule change la nature des signaux appliqués aux entrées de la ligne à retard.

3.1. Transformée de Fourier.

On applique à chaque entrée de la ligne à retard un signal dont la forme est respectivement :

$$F_1(t) = e^{j(\omega_0 t + \mu \frac{t^2}{2})} \quad (18)$$

$$F_2(t) = e^{j(\omega_0 t - \mu \frac{t^2}{2})}$$

On obtient à la prise m des signaux :

$$F_{1,m}(t) = e^{j[\omega_0(t+m\tau) + \mu \frac{(t+m\tau)^2}{2}]} \quad (19)$$

$$F_{2,m}(t) = e^{j[\omega_0(t-m\tau) - \mu \frac{(t-m\tau)^2}{2}]}$$

et en sortie de sommateur :

$$A(t) = \sum_1^m S_m(t) e^{j\Omega t} \times F_{1,m}(t) \times F_{2,m}(t) \quad (20)$$

$S_m(t) e^{j\Omega t}$ étant le signal détecté par le transducteur m . En posant $y = ma$, et en transformant la sommation (20) en intégrale, on obtient à l'aide des relations (19) :

$$A(t) = \frac{e^{j(2\omega_0 + \Omega)t}}{a} \int_{-L/2}^{L/2} S(y,t) e^{j \frac{\mu \tau t}{a} y} dy$$



LECTURE D'IMAGES OU DE TRANSFORMEES D'IMAGES AU MOYEN
DE LIGNES A RETARD ACOUSTIQUES

On mesure donc à l'instant t , la composante spectrale du signal $S(y,t)$ relative à la fréquence spatiale :

$$k = \frac{\mu \tau}{a} t \quad (21)$$

3.2. Lecture point à point.

Une seule entrée de la ligne à retard est utilisée ; on lui applique un signal en forme d'impulsion de durée inférieure au retard τ entre prises et de fréquence porteuse ω . On recueille à la sortie du sommateur, à la fréquence $\omega + \Omega$, un signal, qui à l'instant t , fournit une information de phase et d'amplitude sur le signal du même capteur associé à la prise m sous laquelle l'impulsion émise en onde de surface est en train de se propager.

Ce type de dispositif est à rapprocher du système de formation de voies à une rampe (voir § 1.1) du fait que :

- a) une seule entrée de la ligne à retard est utilisée
- b) la vitesse de balayage est imposée par la ligne à retard, ou, réciproquement, le temps de retard total de la ligne à retard doit être égal à la durée de balayage désirée.

Un autre procédé de lecture point à point d'une ligne d'images, qui utilise les deux entrées de la ligne à retard, peut être envisagé. Il consiste à procéder tout d'abord à une transformée d'image, par exemple la transformée de Fourier, conformément à ce qui a été décrit précédemment. Le temps consacré à analyser l'information portée par une ligne d'images peut être alors arbitrairement choisi (voir § 3.1, relation 21). Il suffit ensuite de réaliser la transformation inverse pour obtenir la lecture point à point de la ligne d'image. Dans le cas envisagé ici de la transformée de Fourier, la transformée inverse est une nouvelle transformée de Fourier qui peut également être réalisée au moyen de composants acoustiques (lignes à retard dispersives) [3].

Outre l'avantage d'une vitesse de balayage arbitraire, ce procédé peut être également intéressant dans les systèmes où l'on doit effectuer la transmission de l'information image. Une transformée d'image peut présenter une moins grande sensibilité aux parasites de transmission que l'image elle-même. Par ailleurs, elle peut aussi supprimer des redondances, limitant ainsi la quantité d'informations à transmettre.

4. - SYSTEME INTEGRE.

Le dispositif, tel qu'il a été décrit, comporte 3 fonctions fondamentales qui sont :

- la fonction senseur réalisée par l'antenne
- la fonction retard réalisée par la ligne
- la fonction mélange réalisée par un composant électronique non-linéaire (diode ou pont de diodes).

On peut envisager d'intégrer ces trois fonctions [4]. La configuration d'un dispositif intégré est représentée Fig. 3. Il est constitué d'un substrat piézoélectrique non-linéaire dans lequel interagissent l'onde de volume incidente et une ou deux ondes de surface. L'intégration est obtenue au moyen d'une électrode disposée tout le long de la zone d'interaction.

Dans le cas d'un système à deux rampes, l'électrode peut être une plaque continue. Les interactions mettent en jeu des non-linéarités du troisième ordre.

Dans le cas d'un système à une rampe, les interactions sont du deuxième ordre, mais elles présentent une fréquence spatiale non nulle qui nécessite une électrode d'intégration en peignes interdigités.

Il faut noter qu'un système intégré ne permet pas un filtrage et une amplification préalable au mélange. Par ailleurs, le mélange par non-linéarités acoustiques s'accompagne de pertes importantes sur la puissance de signal. Le comportement en bruit du système intégré ne sera donc jamais comparable à celui du système discrêt (voir relation 18).

Son utilisation reste donc réservée aux domaines des hautes fréquences où interviennent des difficultés technologiques (prises de connexions), compte tenu de la réduction des dimensions des capteurs et de la distance entre prises de la ligne à retard.



LECTURE D'IMAGES OU DE TRANSFORMES D'IMAGES AU MOYEN
DE LIGNES A RETARD ACOUSTIQUES

CONCLUSION.

Nous avons tenté dans ce papier de donner un aperçu des possibilités qu'offre l'utilisation de lignes à retard acoustiques dans le domaine de l'imagerie. Un des aspects les plus intéressants des procédés mettant en jeu ce type d'élément est, à notre sens leur grande souplesse d'utilisation : on a pu constater que, quelle que soit la fonction à réaliser, le dispositif reste matériellement le même, seule change la nature des signaux appliqués à la ligne à retard.

L'application la plus immédiate est sans doute la formation de voies appliquée à la visualisation des fonds marins. A complexité technologique comparable, les performances en bruit sont analogues à celles de la formation de voies parallèle. Le comportement est meilleur du point de vue des aberrations.

Les possibilités dans le domaine des transformées d'images auront sans doute à être examinées et développées, essentiellement pour les systèmes dans lesquels la réception n'est pas à proximité de la visualisation et où l'on doit procéder à une transmission de l'information image. Une transformée d'image peut se prêter mieux à la transmission que l'image elle-même.

- REFERENCES -

- [1] J.F. Havlice and T.M. Reeder "Scanning of acoustic arrays". Ultrasonics Symposium Proceedings p. 463 (1972)
- [2] J. Frazer, J. Havlice, G.S. Kion, W. Leung, H.J. Shaw, K. Toda, T. Waugh, D.K. Winslow and L.T. Zitelli "A two dimensional electronically focused imaging system" Ultrasonics Symposium Proceedings (1974)

- [3] J. Bertheas, J. Guyot, P. Tournois "Analyse spectrale analogique au moyen de filtres dispersifs" Colloque GRETSI (tome 2) Nice (Juin 1971)
- [4] J. Desbois and P. Tournois "Bulk and surface waves second order interactions for acoustical imaging" Ultrasonics Symposium Proceedings (1973)

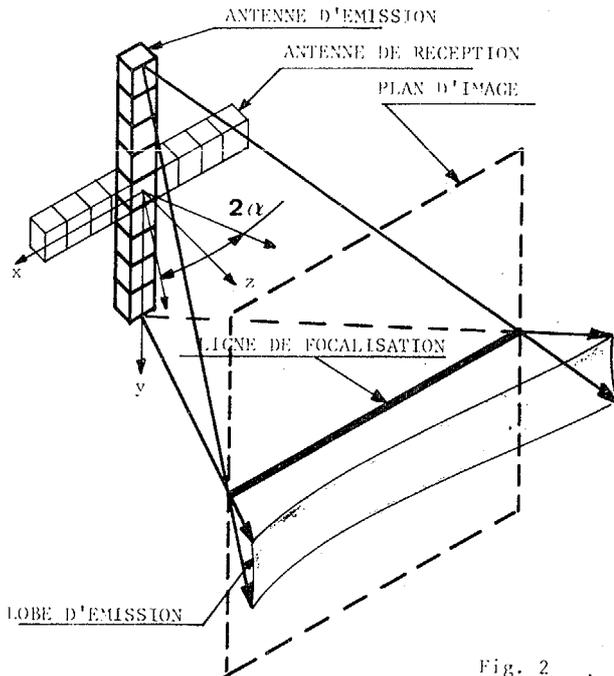


Fig. 2

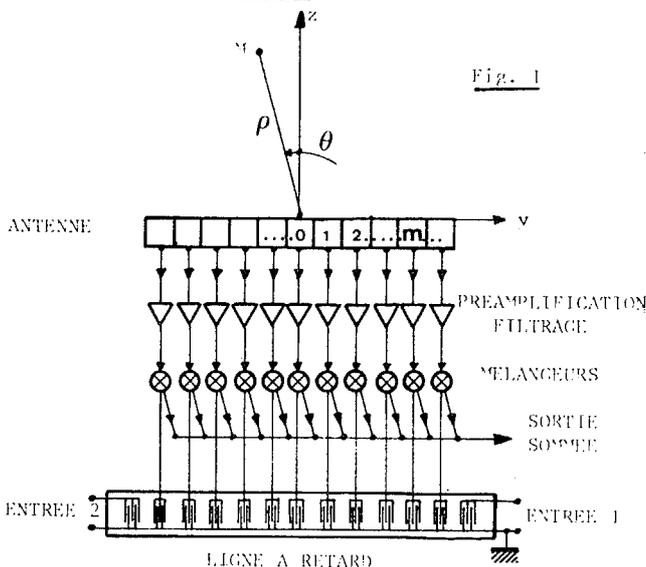


Fig. 1

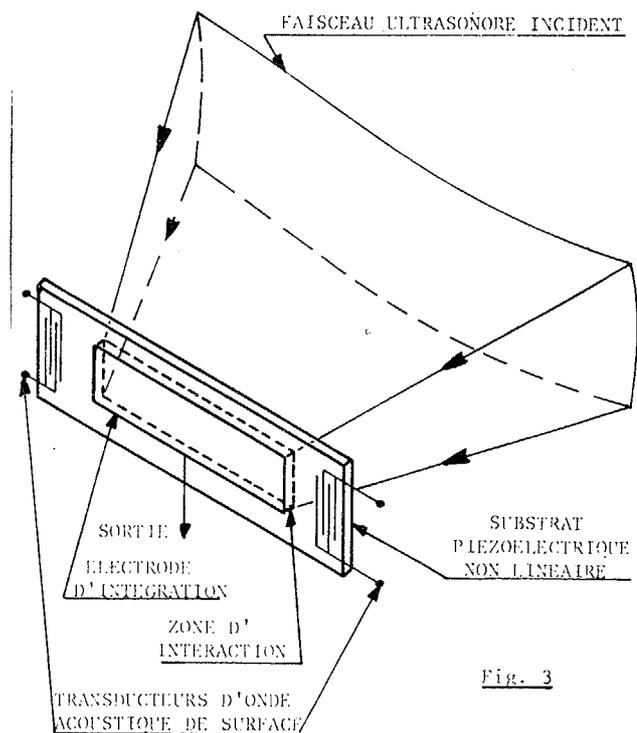


Fig. 3