

HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

1025



NICE du 1^{er} au 5 JUIN 1981

PROCESSEURS ULTRARAPIDES EMPLOYANT LES TECHNOLOGIES
A ONDES ACOUSTIQUES DE SURFACE ET NUMERIQUES

H. GAUTIER et P. TOURNOIS

THOMSON-CSF - Chemin des Travaux - BP 53 - 06802 CAGNES/MER - France

RESUME

Les technologies numériques et celles employant des ondes acoustiques de surface (O.A.S.) ont fait des progrès qui les rendent compatibles ; et il est maintenant possible de concevoir des modules de traitement du signal qui bénéficient de la souplesse des techniques numériques et de la très grande vitesse de calcul des techniques à O.A.S. On peut maintenant construire des processeurs ultrarapides capables de traiter plusieurs dizaines de méga-échantillons par seconde dans un volume et pour une consommation limités. Nous montrerons dans cet article la compatibilité de ces technologies et les avantages que l'on retire à les utiliser ensemble. On décrira plusieurs exemples de réalisations de processeurs de Fourier ou de Corrélation mono ou bidimensionnels.

SUMMARY

The recent progress of the digital and the surface acoustic wave (SAW) technologies have made them compatible ; and it is now possible to design signal-processing modules which benefit from the flexibility of the digital techniques and the very high computation speed of the SAW techniques. Very fast signal processors can now be built which are able to process several tens of megasamples per second and whose volume and power consumption are limited. This paper shows the compatibility of these technologies and the advantages yielded by their joint use. Several examples are described which relate to one and two-dimensional Fourier and correlation processors.



PROCESSEURS ULTRARAPIDES EMPLOYANT LES TECHNOLOGIES
A ONDES ACOUSTIQUES DE SURFACE ET NUMERIQUES

1.- INTRODUCTION

Les systèmes modernes de traitement du signal demandent des vitesses de traitement de plus en plus élevées : des valeurs de 10 à 100 Méga-échantillons par seconde sont nécessaires dans les contre-mesures électroniques, les télécommunications à spectre élargi, mais aussi dans les équipements basse fréquence multi-canaux tels les sonars, et dans les analyseurs bidimensionnels. On devait pour construire de tels processeurs employer une technologie numérique multiplexée ce qui entraînait souvent un volume et une consommation prohibitifs.

L'existence de modules de calcul à ondes acoustiques de surface (O.A.S.) permet maintenant de réaliser des calculs complexes en temps réels à des débits correspondant à 10 à 500 MHz de bande. Ainsi la vitesse d'un module acoustique de Transformation de Fourier est équivalente à celle d'un circuit FFT numérique à un papillon de temps élémentaire 2 ns ; les convoluteurs acoustiques pour leur part, réalisent plus de 10^{10} multiplications analogiques par seconde. Et dans ces deux exemples, la dynamique équivaut à 10-12 bits et la précision à 6-8 bits.

Il y a plusieurs années que des systèmes analogiques, comme les radars, emploient ces composants. Mais leur domaine d'application était resté limité car (1) un post-traitement numérique suit généralement et il ne savait pas extraire l'information à ces vitesses, (2) le multiplexage série n'était pas assez puissant et on ne pouvait traiter que des informations monodimensionnelles, dont le haut débit et la durée limitée étaient directement compatibles avec ceux des composants à O.A.S. (3) enfin, l'absence de mémoire imposait la quasi-simultanéité des signaux à comparer et seul un traitement instantané était possible.

Les performances des composants numériques tels que les échantillonneurs/codeurs, les multiplexeurs, les modulateurs numériques et les mémoires, deviennent maintenant compatibles avec celles des composants à O.A.S. La vitesse des modules numériques de calcul, comme les multiplicateurs, corrélateurs, FFT, n'est pas comparable. Aussi sera-t-il préférable d'utiliser des composants acoustiques pour réaliser ces fonctions complexes, et de les coupler à des mémoires et circuits d'E/S numériques rapides. Il en résultera une réduction du volume, du coût et de la consommation, d'où une amélioration de la fiabilité. On aura ainsi trouvé une réponse simple à la question posée plus haut des processeurs rapides.

Nous allons montrer la compatibilité des techniques en présence et les avantages fournis par leur utilisation conjointe. Plusieurs exemples seront ensuite décrits qui se rapportent à des systèmes réels mono et bidimensionnels.

2.- BASES DU COUPLAGE NUMERIQUE-ACOUSTIQUE

Il existe une grande variété de composants et de sous-ensembles qui peuvent être construits utilisant ces deux technologies. On se limitera ici à certains d'entre eux seulement. Les principaux composants acoustiques qui nous intéressent sont les lignes à retard dispersif utilisant la technologie des réseaux réfléchissants [1] ou celle des pondérations de transducteurs interdigités [2], et les convoluteurs qui sont du type piézoélectrique [3] ou à semiconducteur [4]. Ces composants sont la base des modules de transformation de Fourier [5] et des modules de convolution-corrélation [4].

Les composants et interfaces numériques auxquels nous ferons référence sont les échantillonneurs-codeurs (CAN) les modulateurs à commande numériques (CNA) et les mémoires. Cette liste devrait aussi inclure les multiplexeurs de voies ; ceux-ci sont en fait des commutateurs à commande numérique. Les circuits de calculs tels que multiplicateurs et analyseurs sont délibérément mis de côté car leur vitesse est relativement plus faible.

2.1.- Compatibilité des deux technologies

Il faut pour pouvoir employer ces deux familles de composants que leurs domaines de performance se recouvrent. En termes analogiques, ces performances peuvent être largeur de bande et durée des signaux d'une part, précision et dynamique d'autre part. Les traductions dans le langage numérique sont vitesse d'échantillonnage ou d'accès et nombre de bits. La comparaison des divers domaines de performances est conduite au moyen des figures 1(a) et 1(b).

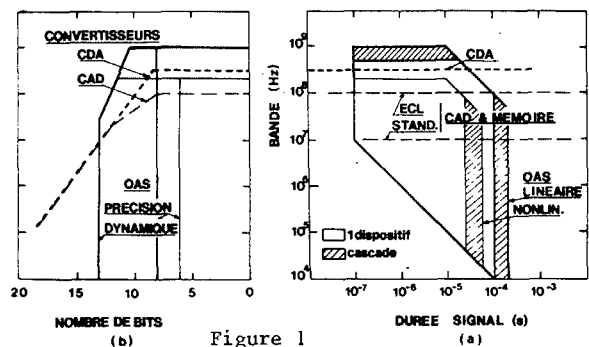


Figure 1
Domaines des performances des composants
à O.A.S. et numériques

Dans le plan durée x bande, le domaine des dispositifs acoustiques linéaires est assez bien connu [6,7]. Ses limites supérieures sont des durées de 200 μ s et des bandes de 1 GHz ; valeurs atteintes par cascade de composants ou doublage de fréquence. Le produit bande x durée maximum est actuellement de 10^4 . Les composants non linéaires, tels les convoluteurs, ont des performances plus limitées quoique les limites technologiques ne soient pas aussi bien connues.

La notion de durée de signal est sans objet quand on spécifie les composants numériques énumérés plus haut, car on peut en principe, supposer une taille mémoire illimitée. La fréquence horloge et le temps d'accès sont les seuls facteurs importants pour définir les limites de bande.

Les mémoires et les CAN les plus rapides sont actuellement de technologie ECL (les technologies AsCa et I₂L sont en cours de développement [8]). Elle permet des temps de propagation de moins de 1 ns par porte et des temps d'accès mémoire de 10 à 20 ns. La bande passante opérationnelle max. est donc d'environ 100 MHz. Les technologies plus standard et à plus faible consommation (CMOS, Schottky LS) limitent cette bande à quelques 10 MHz. Les CNA ont toujours de meilleures performances car ils requièrent de simples portes logiques et on peut moduler directement la porteuse [9].

Le domaine de recouvrement des performances correspond ainsi à des bandes allant jusqu'à 100 MHz et de durée jusqu'à 100-200 μ s.

Le nombre de bits du codage d'un composant numérique fixe sa dynamique et sa précision absolue. En outre, le nombre max. de bits des CAN est une fonction inverse de

PROCESSEURS ULTRARAPIDES EMPLOYANT LES TECHNOLOGIES
A ONDES ACOUSTIQUES DE SURFACE ET NUMERIQUES

sa vitesse : ainsi un convertisseur flash en technologie ECL peut fonctionner sur 7 bits à 200 MHz ; un convertisseur 12 bits-20 MHz emploiera par exemple la technique "à approximation successive" [9]. Quant aux CNA, il est possible d'atteindre 60 à 80 dB d'isolation (à 500 MHz), donc de dynamique, au moyen de portes ECL et de modulateurs à diodes Schottky commandés par l'information binaire.

Par opposition aux composants numériques, la précision relative des composants acoustiques est indépendante de leur dynamique. On peut donc définir deux nombres de bits distincts. La dynamique des composants à O.A.S. variant entre 60 et 80 dB selon la fréquence, leur nombre de "bits de dynamique" varie entre 10 et 13. La précision de calcul, elle, dépend de l'uniformité de la réponse en fréquence, de celle spatiale et de la suppression des parasites. Les erreurs d'amplitude et de phase (2 rms) des dispositifs linéaires, comme les filtres dispersifs, peuvent être limitées à quelque 0,2 dB et 1° respectivement ; ceci permet de réduire le niveau des lobes secondaires de 35 à 45 dB au moyen de techniques de pondération. Tout ceci signifie que le nombre de bits de précision est de l'ordre de 8. Les performances des dispositifs non linéaires étant légèrement plus mauvaises, le nombre de bit minimum est d'environ 6.

Le couplage des technologies à O.A.S. et numériques apparaît donc possible sans pour autant dégrader les performances de chacune des technologies en présence.

2.2.- Avantages apportées par ce couplage de technologies

La souplesse d'emploi est le principal intérêt des techniques numériques. Il provient de l'existence de mémoires et d'horloges variables, qui permettent de stocker, d'étendre ou de comprimer les signaux, ce qui simplifie énormément le traitement des données [9,11]. En outre la précision de calcul peut être arbitrairement élevée. Mais des difficultés surgissent quand on demande une grande vitesse de calcul, ou une grande capacité : dans les deux cas, le volume, la consommation et le coût augmentent très rapidement ce qui interdit très souvent l'implantation de telles solutions. Il y a alors tout intérêt à faire réaliser les fonctions complexes de calcul et de traitement par des dispositifs à O.A.S. et à incorporer les circuits d'interface appropriés. Il en résultera un gain en volume, consommation et simplicité ; et dans certains cas, une amélioration nette de la vitesse par rapport à des solutions "tout numérique". Les cas des transformateurs de Fourier et des corrélateurs acoustiques sont à cet égard très significatifs.

Les transformateurs de Fourier acoustiques fonctionnent sur le principe de la transformée par rampe FM [5] (voir figure 2). Le signal est analysé par tranches de durée T_s , bande B_s . Chaque tranche est pré-multipliée par une rampe de durée $T_p = T_s$ et d'excursion de fréquence B_p ; puis le résultat est analysé dans un filtre de dispersion linéaire T_f , B_f , $= B_p + B_s$; adapté à la rampe de pré-multiplication (donc $B_f/T_f = B_p/T_p$). Une post-multiplication est nécessaire pour recueillir l'information de phase. Un tel module peut ainsi analyser $N = B_s T_s$ points dans un temps $T_c = T_f - T_s$.

Les relations précédentes permettent aussi d'écrire $T_f = T_s / (1 - B_s/B_f)$. L'analyseur le plus rapide est obtenu en choisissant B_f tel que T_f soit minimum.

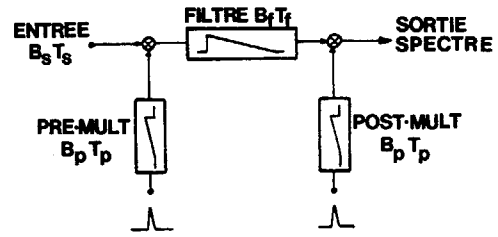


Figure 2

Schéma d'un analyseur de spectre à O.A.S.

Compte tenu des limitations actuelles sur les filtres ($T_f < 200 \mu s$; $B_f < 1 \text{ GHz}$ et $B_f T_f < 10^4$), on a tracé sur la figure 3 la variation des temps de calcul minimum en fonction du nombre de points d'analyse N , et de la durée des tranches analysées, T_s .

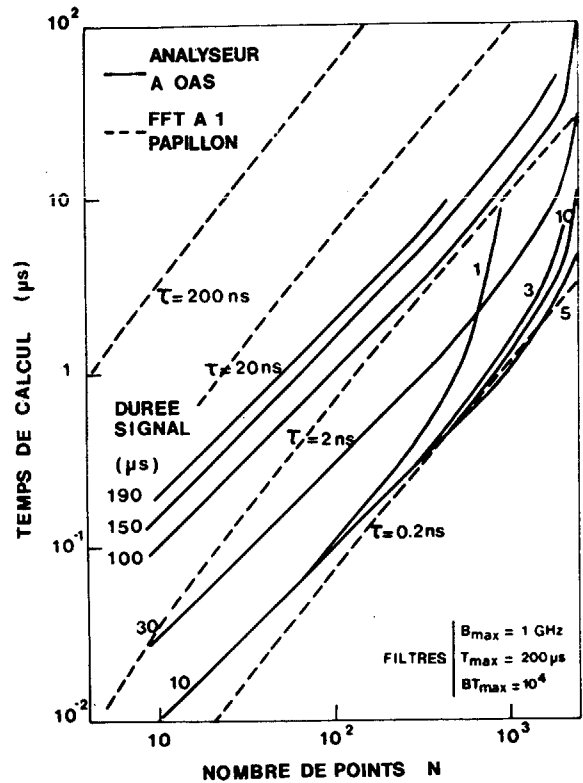


Figure 3

Comparaison des vitesses de calcul des analyseurs de Fourier à O.A.S. et numériques

Le temps de calcul d'un analyseur numérique par FFT employant un papillon de temps de traitement élémentaire τ , est $N(\tau/2) \log_2 N$. Le temps d'un papillon numérique est au minimum de 200 ns et une valeur plus courante est 1 μs . Par comparaison, la figure 3 montre que le temps de papillon équivalent d'un analyseur à O.A.S. varie entre 0.2 et 2 ns pour des tranches d'analyse de 1 à 50 μs . D'où un gain de 10^2 à 10^3 sur les circuits numériques.

Le volume et la consommation d'un analyseur à O.A.S. dépendent de la technologie électronique employée et des performances souhaitées. Pour fixer les idées, on peut citer l'exemple d'un module capable d'analyser 450 pts ou 15 μs . Il remplit un volume de 0,2 l et consomme environ 1 W.



PROCESSEURS ULTRARAPIDES EMPLOYANT LES TECHNOLOGIES
A ONDES ACOUSTIQUES DE SURFACE ET NUMERIQUES

Un analyseur numérique construit autour d'un papillon de 200 ns (donc 100 fois plus lent) remplirait un volume de 0,3 l et dissiperait 20 W.

Un second cas intéressant est celui des convoluteurs acoustiques. Les dispositifs les plus simples sont composés de deux transducteurs identiques et d'une électrode de sortie uniforme [3] (voir figure 4). Si T est le temps de propagation sous l'électrode, on obtient le fonctionnement optimum en "convoluant" deux signaux simultanés de durée T. Le temps de calcul est alors de T/2.

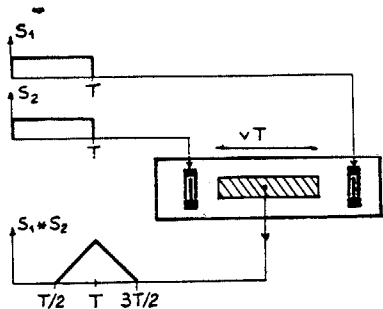


Figure 4

Schéma d'un convoluteur piézoélectrique à O.A.S.

Les variations du temps de traitement en fonction du nombre de points et de la bande des signaux d'entrée sont tracées sur la figure 5 et comparées à celles de corrélateurs numériques réalisés au moyen de multiplicateurs ou mieux de circuits FFT à un papillon de 200 ns. A nouveau il s'avère que les dispositifs acoustiques sont 10^2 à 10^3 plus rapides.

Des modules existants (amplificateurs d'E/S compris) capables de calculer 500 pts de convolution en 5 μ s, occupent un volume de 0,15 l et dissipent quelques Watts. Un corrélateur numérique 100 fois plus lent (512 pts en 1 ms) nécessiterait 1 l et dissiperait 100 W.

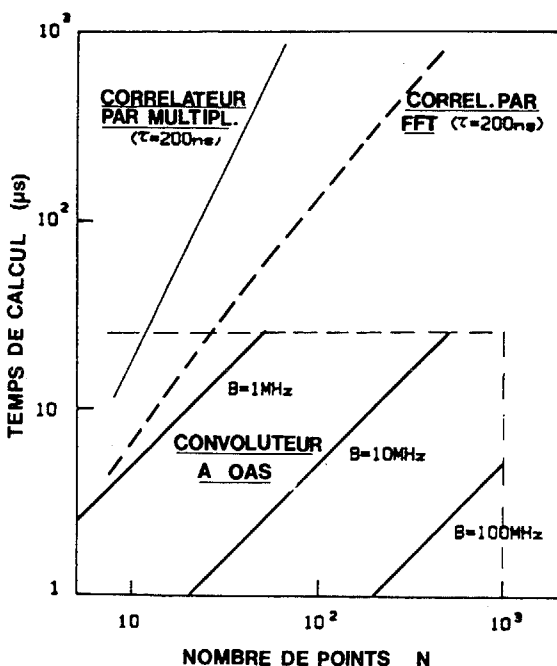


Figure 5

Comparaison des vitesses de calcul des corrélateurs à O.A.S. et numériques

Le gain en consommation outre l'économie qu'il procure, améliore aussi la fiabilité du système qui est une fonction inverse de la puissance dissipée.

3.- APPLICATION DE L'ANALYSE DE FOURIER RAPIDE AUX SONARS D'IMAGERIE DES FONDS MARINS

Les antennes des sonars d'imagerie des fonds, sont généralement des réseaux périodiques de transducteurs. La bande relative de ces sonars actifs étant assez étroite, la formation de voies peut être obtenue par transformation de Fourier [12] du signal résultant de l'échantillonnage complexe et du multiplexage temporel des signaux de tous les transducteurs. La fréquence d'échantillonnage doit être choisie grande devant la largeur de bande, d'où le besoin de commutateurs rapides. Il est ensuite intéressant de réaliser la Transformation de Fourier au moyen d'un module acoustique du type décrit plus haut.

La figure 6 représente schématiquement l'exemple d'un sonar à 96 hydrophones et un illuminateur émettant des impulsions FM de durée 22,4 ms de bande 6 kHz. Chaque signal reçu est filtré (au moyen de CCD par ex. [13]) puis démodulé. Les signaux réels et imaginaires de chaque hydrophone sont ensuite échantillonnés et multiplexés à la fréquence de 4 MHz. Après modulation complexe d'une porteuse, on dispose de tranches de signaux de durée 25 μ s, bande 4 MHz, qui sont aisément analysées par un module à O.A.S.

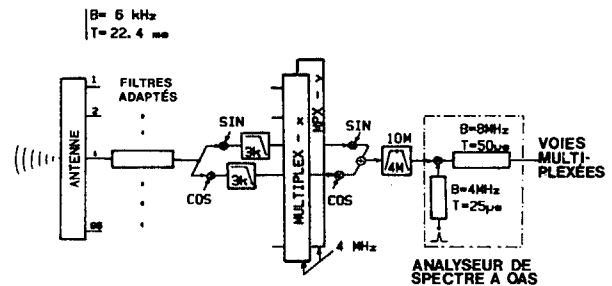


Figure 6

Formation de voies dans un sonar d'imagerie des fonds par multiplexage et Transformation de Fourier

Le signal de sortie est alors la formation de voie d'une case distance. L'échantillonnage suivant des hydrophones, 50-100 μ s plus tard, fournira l'information de voies de la case distance suivante. Il est à remarquer que dans cet exemple, il n'est pas besoin de stocker ou compresser les signaux sonar avant le traitement par O.A.S. C'est l'échantillonnage rapide des diverses entrées parallèles qui assure l'interface.

4.- TRANSFORMATEUR DE FOURIER BIDIMENSIONNEL

Un domaine d'application où le couplage acoustique numérique est nécessaire pour obtenir vitesse, simplicité et performances est celui des Transformées bidimensionnelles. Parmi celles-ci la Transformée de Fourier est particulièrement utile et simple à réaliser. Il suffit de disposer de deux transformateurs de Fourier monodimensionnels et d'une mémoire intermédiaire où l'information est inscrite selon les lignes et relue selon les colonnes. La capacité et la dynamique des mémoires analogiques étant trop faibles il faut opter pour des mémoires numériques et il faut donc à nouveau coupler les technologies numériques et à O.A.S.

Le schéma d'un transformateur de 512 x 512 points à E/S numérique est représenté sur la figure 7. Cet analyseur peut traiter en temps réel des signaux en bande de base de 4 MHz (standard TV).

L'information numérique d'entrée, codée sur 8 bits complexes est convertie en un signal réel de 8 MHz de bande et 64 μ s de durée de ligne. Il est traité dans deux analyseurs à O.A.S., composés de filtres dont les dispersions sont 64 μ s x 8 MHz et 128 μ s x 16 MHz. Le premier analyseur procurant un gain de traitement de 27 dB, un amplificateur logarithmique est nécessaire pour comprimer la dynamique et conserver un codage sur 8 bits. La mémoire intermédiaire comprend 80 boîtiers RAM de 64 kbits chacun. Enfin le convertisseur doit fonctionner à 10 MHz et le temps d'accès effectif de la mémoire doit être 100 ns.

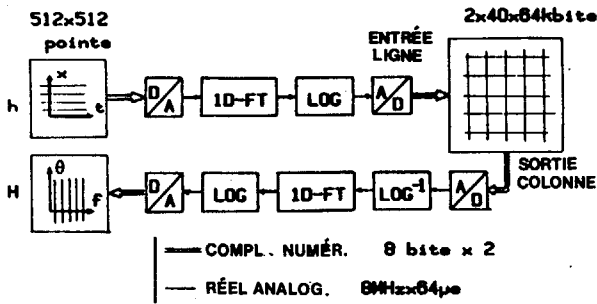


Figure 7
Exemple de réalisation d'un Transformateur de Fourier bidimensionnel hybride capable de traiter 512 x 512 pts codés sur 8 bits complexes

On peut insérer directement un tel sous-ensemble dans un système de calcul ou de traitement numérique existant ; il pourra y remplacer des circuits FFT. Des ensembles complets bidimensionnels n'ont pas encore été construits mais des groupes de recherche étudient des analyseurs mono-dimensionnels entièrement compatibles numériques [14,15] .

Il existe des applications directes de ces modules au domaine de l'imagerie frontale [16] . L'antenne est alors une matrice carrée d'hydrophones à bande étroite, munie d'un illuminateur. La formation de voies bidimensionnelles doit être réalisée en un temps correspondant à la profondeur de champ du système pour limiter la réverbération. Un sonar à haute résolution, muni d'une antenne de 100 x 100 éléments peut par exemple présenter une profondeur de champ de 5 à 8 m, le temps d'intégration doit donc être limité à 5 ms. La fréquence max. de balayage serait alors de 200 images par seconde.

La formation de voies peut à nouveau être obtenue par échantillonnage rapide des signaux d'hydrophone et Transformation de Fourier (voir figure 8). On dispose pour cela 100 commutateurs lents (à 100 positions) en parallèle qui relient les hydrophones d'une ligne à des démodulateurs complexes. Les signaux ainsi démodulés sont alors multiplexés à 4 MHz et envoyés sur une porteuse de manière à disposer de signaux de lignes de durée 25 μ s, bande 4 MHz qui sont alors analysés au moyen d'un transformateur de Fourier bi-dimensionnel à O.A.S.

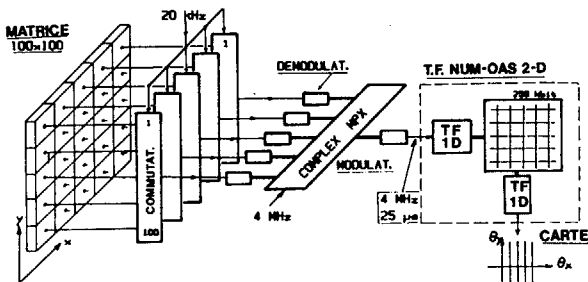


Figure 8
Application de la Transformée de Fourier bidimensionnelle à la formation de voie de sonars d'imagerie frontale

Celui-ci comporte une mémoire de 256 Kbit à temps d'accès de 200 ns et des convertisseurs fonctionnant avec une fréquence horloge de 5 MHz.

5.- TRAITEMENT PAR CORRELATION

Nous regroupons sous cette appellation les techniques qui cherchent à engendrer le produit de convolution ou de corrélation de deux signaux quelconques. Bien que la fonction de base soit toujours la même, il existe un grand nombre d'applications à ce type de traitement. Les radars à antenne latérale synthétique [17] nécessitent les filtrages adaptés aux différentes cases distance. Dans les télécommunications à spectre élargi [18] on parle de démodulation rapide large bande. D'autres types de récepteurs comparent les signaux reçus à une bibliothèque de signaux mémorisés, dans le but d'identification et de tri [19] . Enfin les systèmes d'imagerie ont besoin de processeurs bidimensionnels capables de corréler des cartes ou des images afin de recadrer ou d'identifier des cartes. Et il y a bien d'autres applications encore. Quand on recherche une grande vitesse de traitement, on peut faire appel aux convoluteurs à O.A.S. , mais ils auront souvent besoin de circuits numériques comme le démontrent les exemples qui suivent.

5.1.- Récepteur par corrélation à une dimension

Pour employer efficacement un convoluteur acoustique, il faut pouvoir traiter des signaux qui soient large bande et dont les temps d'apparition ne diffèrent que de quelques microsecondes. C'est pourquoi il faut généralement disposer de mémoire d'entrée qui font office de tampons et/ou de transformateur durée-bande (compresseur-expandeur).

L'architecture la plus générale de ce type de récepteur est celle représentée sur la figure 9. Les signaux reçus sont stockés dans des mémoires numériques puis les tranches successives de signal sont relues et comparées à une bibliothèque de signaux. Pour cela, les contenus des mémoires modulent une même porteuse et les signaux engendrés sont combinés dans un convoluteur. Le résultat est stocké et/ou post-traité.

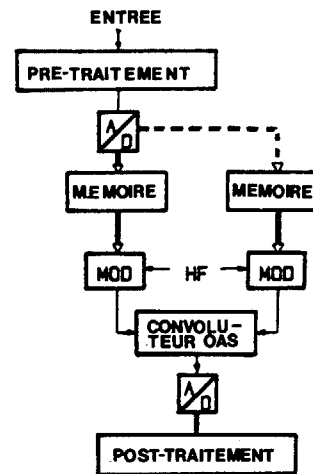


Figure 9

Schéma général d'un récepteur par corrélation

Diverses organisations existent selon l'application particulière visée (acquisition, tri, filtrage...). Les signaux peuvent être envoyés directement dans le dispositif acoustique (ex. IFF radar). Par ailleurs, la mémoire d'entrée peut comprimer les signaux [10,11] pour adapter leurs caractéristiques à celles du convoluteur et pouvoir ainsi réaliser un grand nombre de corrélations dans une période de récurrence



PROCESSEURS ULTRARAPIDES EMPLOYANT LES TECHNOLOGIES
A ONDES ACOUSTIQUES DE SURFACE ET NUMERIQUES

Dans un radar à antenne latérale synthétique, le signal reçu est stocké durant l'avancement de l'avion et sa durée correspond au temps que met un point cible à traverser le faisceau d'antenne (c'est-à-dire environ 1 s). Pour pouvoir utiliser un convoluteur de 10 μ s, la mémoire d'entrée doit ainsi réaliser une compression d'échelle dans le rapport $10^5:1$ (la fréquence horloge de lecture est alors de l'ordre de 10 MHz si le nombre maximum d'échantillons stockés par case distance est de 100). Ainsi jusqu'à 10^5 cases distance peuvent être traitées au moyen d'un seul dispositif ! Tous les circuits de calcul rempliraient alors un volume de 0,3 l et dissiperait 5 W [9], non comprise la mémoire qui est présente quelle que soit la configuration choisie.

5.2.- Schéma de corrélateur bidimensionnel

La corrélation bidimensionnelle n'est pas une fonction séparable, aussi n'est-il pas possible de réaliser cette fonction au moyen de 2 processeurs mono-dimensionnels mis en cascade. Il existe néanmoins des solutions intéressantes qui mettent en oeuvre un convoluteur et un accumulateur numérique. L'une d'elle, schématisée sur la figure 10, s'applique au cas de recadrage de carte.

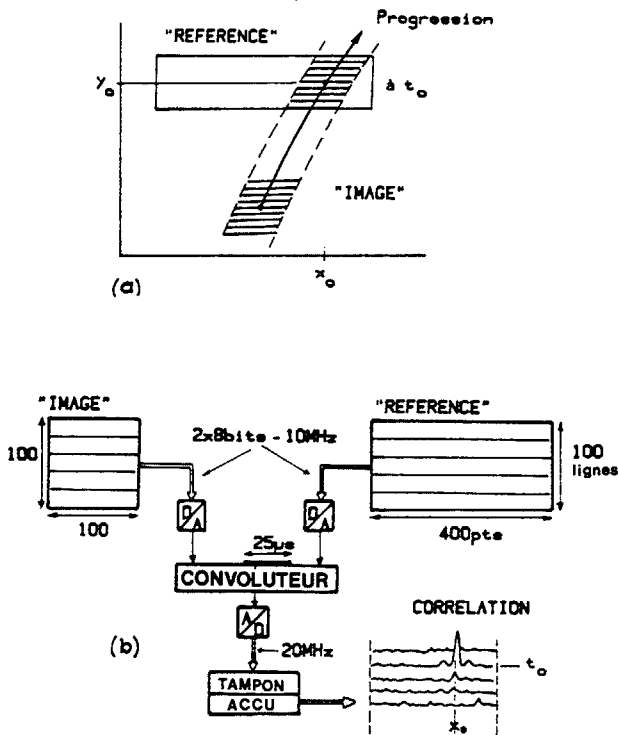


Figure 10

Principe et exemple de réalisation d'un système de corrélation de cartes bi-dimensionnelles

Un engin relève la portion de terrain qu'il survole et garde en mémoire les N dernières lignes balayées (voir figure 10(a)). Il a aussi en mémoire la carte de la bande de terrain située autour de l'ordonnée y_0 . Le processeur de bord doit corrélérer cette carte "référence" avec la carte "image" de façon à déterminer la date t_0 et l'abscisse x_0 de survol de l'ordonnée y_0 . Une solution utilise un convoluteur à O.A.S. et deux mémoires numériques (voir figure 10(b)).

Pour avoir un nombre non nul de points significatifs de corrélation, le nombre P de points par ligne de la référence doit être supérieur à celui M de la carte image.

Si $P = 400$ et $M = N = 100$ par exemple, et si la fréquence horloge est de 10 MHz, chaque corrélation ligne prend 25 μ s. Les cent signaux résultant sont additionnés au moyen d'un accumulateur numérique et une ligne de la corrélation bidimensionnelle est obtenue après 100 corrélations ligne, c'est-à-dire en un temps minimum de 5 ms. Le calcul en temps réel est donc possible à condition que le temps de balayage d'une ligne soit supérieur à 5 ms ce qui correspond à une avance de 3 m à Mach 2.

6.- CONCLUSION

Il y a quinze ans que les technologies numériques et acoustique à O.A.S. progressent indépendamment et on les a longtemps supposé incompatibles. Ceci tend à disparaître, et coupler ces deux techniques n'est plus un exercice de laboratoire. Cela ouvre de nouvelles perspectives au traitement du signal en temps réel ou ultrarapide. Et cette présentation a tenté de démontrer la faisabilité et les avantages de tels processeurs hybrides.

REFERENCES

- [1] R.C. WILLIAMSON - "Properties and applications of reflective array devices" - Proc. IEEE, vol. 64 pp 702-710 - 1976
- [2] M.B.N. BUTLER - "SAW Devices for Signal Processing" IEE Pub. n° 180 pp 21-33 - 1979
- [3] Ph. DEFRANOULD and C. MAERFELD - "A SAW planar piezoelectric convolver" - Proc. IEEE, vol 64 n° 5 pp 748-751 - 1976
- [4] S.A. REIBLE, J.H. CAFARELLA, R.W. RALSTON and E. STERN - "Convolver for DPSK demodulation of spread spectrum signals" - Proc. 1976 IEEE Ultrasonics Symp. pp 451-455 - 1976
- [5] T.W. BRISTOL - "Review of Spectrum Analysis with SAW Chirp Transforms and Filterbanks" - IEE Conf. Pub. n° 180 pp 26-231 - 1979
- [6] M.G. HOLLAND and L.T. CLAIRBORNE - "Practical surface acoustic wave devices" - Proc. IEEE, vol 62 - pp 582-611 - 1974
- [7] J.D. MAINES and E.G.S. PAIGE - "Surface acoustic wave devices for signal processing applications" - Proc. IEEE, vol 64 pp 639-652 - 1976
- [8] Proc. 1979 MTT-S International Microwave Symp. (1st Specialist Conf. on Gigabit Logic for Microwave Systems, Orlando, FL, May 3-4 - 1979)
- [9] T. BEAUVAIS, R. CARRE and H. GAUTIER - "Interfacing and Comparison of Surface Acoustic Wave and Digital Technologies" - IEE Conf. Pub. no 144 - 1976
- [10] P. TOURNOIS and J. BERTHEAS - "Use of dispersive delay lines for signal processing in underwater acoustics" - J.Ac.Soc.Amer. vol 46 pp 517-531 - 1969
- [11] J. BERTHEAS and P. TOURNOIS - "Applications of Microwave Acoustic Components to Sonar Signal Processing" IEE Conf. Pub n° 109 pp 287-298 - 1973
- [12] J.R. WILLIAMS - "Fast beamforming algorithm" - J. Ac.Soc.Amer. vol 44 pp 1454-1455 - 1968
- [13] H. GAUTIER and P. TOURNOIS - "Signal processing using SAW and digital components" - Proc. Inst.Elec.Eng. vol 127 - pt F, pp 92-98 - 1980



PROCESSEURS ULTRARAPIDES EMPLOYANT LES TECHNOLOGIES
A ONDES ACOUSTIQUES DE SURFACE ET NUMERIQUES

- [14] V.S. DONAT, M.B. SCHULZ, L.A. VEILLEUX, G.R. Mc CULLY and R.C. WILLIAMSON - "High performance hybrid SAW chirp-Fourier transform system" Proc. 1978 IEEE Ultrasonics Symp. pp 527-532 -
- [15] C. LARDAT, private communication
- [16] P. RUDNIK - "Digital beamforming in the frequency domain" - J.Ac.Soc.Amer vol 46 (pt I) pp 1089-1090 - 1969
- [17] A.W. RIHACZEK - "Principles of High Resolution Radar" - New-York Mc Graw-Hill - 1969 ch.13
- [18] R.C. DIXON - "Spread Spectrum System" - New-York Wiley 1976
- [19] P. ANTHOUARD and T. BEAUVAIS - "Application d'un convoluteur piézoélectrique au traitement du signal radar" - AGARD Conf. Proc. n° 230, paper 54 - 1977.

