

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75



CALCULATEURS ANALOGIQUES INTEGRES POUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL

Luc AUDAIRE - Joseph BOREL - Robert POUJOIS -

C.E.N.G. BP 85 CENTRE DE TRI 38041
GRENOBLE - CEDEX

RESUME

Nous avons intégré des structures de filtres transversaux analogiques utilisant le registre à décalage connu sous le nom de Bucket Brigade Device (BBD).

Nous présentons les premiers résultats obtenus et nous analysons les erreurs de calcul liées à la technologie, à la topologie du circuit dans ces calculateurs analogiques. Correlateurs, transformateurs de Fourier, filtres adaptés font partie de la même famille de structures où est calculé le produit scalaire entre les échantillons de deux fonctions.

En associant un affichage à cristaux liquides à ces dispositifs de calcul on conçoit qu'il est possible de réaliser des "Contrôleurs temps réel du signal BF" se présentant comme les "contrôleurs universels" bien connus des électroniciens.

Par ailleurs, l'association de ces circuits analogiques de traitement du signal, gérés par une unité centrale digitale, devrait conduire à des systèmes adaptatifs très puissants et par ailleurs portables.

SUMMARY

We have integrated analog transversal filters using Bucket Brigade Device (BBD) structures.

We present results on two kinds of devices and we analyse the first order influence of the technology, circuitry, and computation parameters in these analog computers : Sampling frequency, distortions noises...

Correlators, DFT processors, matched filters have a very similar physical structure : they compute a scalar product between to sampled signals.

Using these devices and a liquid crystal display we can expect to build up "real time controleurs" as versatile as "Universal controleurs".

We can also expect to build complex portable analog systems for the adaptive signal processing. In these structures signal processing functions should be associated and controlled by a digital central unit clocking the BBD phases.



INTRODUCTION

Le produit scalaire, fonction ou non d'un paramètre, intervient en temps qu'opération fondamentale dans les algorithmes du traitement du signal : distance quadratique moyenne, corrélation, convolution, analyse spectrale.

L'association de ces algorithmes au sein d'une même structure de calcul conduit à des opérateurs extrêmement puissants en filtrage et détection. /1/.

Les circuits intégrés que nous avons réalisés et testés ont montré qu'il était possible de calculer analogiquement et en parallèle le produit scalaire de deux signaux connus par un certain nombre de leurs échantillons.

Jusqu'à présent, la seule manière de réaliser ces opérateurs était la programmation sur calculateurs digitaux. La génération de circuits intégrés que nous développons permettra de réaliser des appareils compacts légers et fiables.

Nous présentons les circuits que nous avons testés en filtrage non récursif. Les résultats acquis /2/ mettent en évidence un certain nombre d'erreurs sur le produit scalaire qui limitent la précision de calcul de l'algorithme. Ils mettent aussi en évidence l'intérêt du calcul analogique, parallèle et synchrone.

Ce texte est la continuation de celui que nous avons présenté en 1973. /5/.

I - STRUCTURE DE CALCUL. FILTRAGE TRANSVERSAL.

La figure 1 rappelle la structure de calcul d'un produit de convolution. Cette structure utilise quatre opérations élémentaires /5/ :

- * Un registre à décalage translatant les échantillons analogiques du signal à filtrer.
- * Une série de mémoires contenant les échantillons de la réponse impulsionnelle du filtre : pondérations.
- * Une série de multiplieurs arithmétiques (analogique)
- * Un sommateur du résultat de ces produits, à la sortie duquel apparaissent les échantillons du signal filtré.

Les figures 2 et 3 présentent deux réalisations que nous avons intégrées selon la technologie Métal, Oxyde, Semiconducteur (MOS) classique.

Dans ces deux circuits le registre à décalage est de type Bucket Brigade Device (BBD) : BBD1. Cette structure est une ligne à retard propageant des

échantillons de signal analogique au rythme d'une fréquence d'horloge de commande. Le signal, porté par une quantité de charges électriques, est translatée de condensateur MOS à condensateur MOS au rythme d'une horloge de transfert deux phases.

Dans le circuit de la figure 2 les pondérations sont obtenues en multipliant localement les échantillons du signal d'entrée par des transconductances affectées du poids 0, +1, 0, -1... La réponse impulsionnelle est figée lors de la fabrication du circuit intégré.

Dans le circuit de la figure 3 les échantillons de la réponse impulsionnelle sont introduits en série dans un deuxième BBD : BBD2 qui joue le rôle de mémoire dynamique circulante. L'organe de produit arithmétique est un circuit de type tétrode à transistors MOS : T1, T2, qui se comportent comme une transconductance modulée par la tension image de l'échantillon de la réponse impulsionnelle. Dans une telle structure celle-ci est modifiable en quelques milli-secondes, mais doit être régénérée car la mémorisation est dynamique.

Les figures 4 et 5 présentent le comportement fréquentiel des circuits 2 et 3 fonctionnant dans le cas simple de filtres adaptés à une sinusoïde, c'est-à-dire en analyseur de spectre.

II - RESULTATS ACQUIS. PERFORMANCES ENVISAGEABLES.

Ces circuits, très simples, ont été conçus pour montrer la faisabilité d'opérateurs entièrement intégrés et pour analyser au premier ordre les erreurs et limitations dans le calcul effectué. Une synthèse des résultats est présentée dans le tableau II ordonné selon les caractéristiques essentielles de l'algorithme calculé. Pour chacune d'elle nous avons estimé les performances limites possibles dans l'état actuel de la technologie et de la connaissance que nous avons de l'algorithme.

Les limitations qui apparaissent dans ce tableau peuvent être analysées selon quatre classes :

- * Au niveau de la bande de fréquence utile (lignes 1 et 2).
- * Au niveau de la théorie des algorithmes effectivement calculés (lignes 3, 4 et 6 du tableau). /1/
- * Au niveau de la définition des circuits réalisant les opérations élémentaires (lignes 1 et 4).
- * Au niveau de la technologie et du comportement



physique des dispositifs (lignes 2 et 5).

Ces quatre classes sont étroitement interdépendantes. La réalisation d'opérateurs performants implique un important travail d'optimisation en fonction de ces contraintes issues de domaines très différents.

III - INTERET DE CES STRUCTURES DE CALCUL

En raison de ce qui est rapporté précédemment, il est clair que ces calculateurs n'atteindront pas la précision de calcul disponible sur les systèmes logiques programmés, cependant ils s'en démarquent sur trois points importants.

- La simplicité de leur mise en oeuvre. Celle-ci s'apparente à celle des amplificateurs opérationnels. Le convolveur, le corrélateur, l'analyseur spectral apparaissent comme des "boîtes noires" avec des entrées signal, des entrées d'horloge, une sortie signal traité et les connexions de polarisation.

- Un faible coût financier d'encombrement et de consommation d'énergie. La sécurité du calcul effectué par un circuit logique est liée à la redondance électrique de leur fonctionnement. A consommation équivalente une porte logique représente l'un des deux niveaux binaires, les circuits analogiques présentés distinguent de 100 à 500 niveaux différents. Ce fait et la haute densité de points de calcul parallèle dans un même circuit conduisent à des circuits dont l'encombrement est celui d'un boîtier DIL classique consommant de l'ordre du milliwatt par point de calcul. Ainsi un transformateur de Fourier 500 points occuperait une surface de l'ordre du décimètre carré de circuit imprimé et consommerait une puissance de l'ordre de 4 watts.

- Une certaine maîtrise des variables indépendantes : temps et fréquence. Le temps vrai, interne au calculateur, est lié au sens de propagation relatif des signaux dans les différents BBD. Il est lié également à la vitesse de propagation des signaux commandée par la fréquence de transfert dans les BBD. Or selon la propriété de similitude de la transformée de Fourier une homothétie de l'échelle des temps induit une homothétie inverse sur l'échelle des fréquences. /3/. Le tableau II présente des utilisations de ces structures.

CONCLUSION

Nous estimons actuellement à deux années le temps nécessaire pour mener à bien un projet complet de circuit intégré. D'ores et déjà, cette approche nous semble suffisamment riche pour envisager

raisonnablement la conception d'unités complexes de traitement du signal /4/. Pratiquement celle-ci pourrait apparaître sous la forme d'un seul circuit imprimé comportant une centaine de boîtiers, soit $5 \cdot 10^3$ points de calcul parallèle, et consommant 2 ampères sous 20 volts. L'opérateur serait pensé au niveau des algorithmes fondamentaux du traitement du signal, l'organisation de ces algorithmes étant gérée par une unité centrale logique commandant les horloges de transfert dans les BBD. En poussant plus loin la prospective il semble possible de réaliser des structures de filtres optimaux qui, par apprentissage, prendraient en compte leur propres défauts de fonctionnement. Une application plus immédiate est sans doute des "Contrôleurs temps réel du signal" associant les circuits présentés ici à un affichage à cristaux liquides. D'une telle association résulterait un appareil portable et compact dans lequel l'erreur sur la fonction calculée serait de l'ordre de quelques pourcents. Un tel appareil pourrait vraisemblablement être utilisé pour le contrôle non destructif, in situ de pièces mécaniques.

Pour terminer,, soulignons que la bande de fréquence utilisée dans les circuits présentés reste modeste : 100 Hz, 500KHz, cependant d'une part l'utilisation des mémoires MMS permettra d'atteindre la fréquence zéro et d'autre part l'utilisation des structures CCD repousse, pour l'instant, la borne supérieure vers 5 MHz. Au delà, jusque vers 200 MHz, le relais sera pris par les dispositifs à propagation d'ondes mécaniques ultrasonores sur milieu piézo-électrique qui sont activement développés à l'heure actuelle.

BIBLIOGRAPHIE

- /1/ J.C. RADIX. "Introduction au filtrage numérique". Ed. AYROLLES 1970
- /2/ L. AUDAIRE. "Exploration des technologies avancées pour la réalisation de filtres transversaux" Thèse de Docteur ingénieur. Grenoble ; N° d'ordre A.O. 10743. 1974
- /3/ J. MAX "Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques". Ed. MASSON & CIE 1972
- /4/ P.Y. ARQUES. "Etude de systèmes de détection de signaux par traitement quadratique généralisé et de certaines de leur propriétés statistiques de sortie" Thèse de Docteur ès sciences physiques. Grenoble 1966
- /5/ L. AUDAIRE - J. BOREL - R. POUJOIS - "Nouveaux circuits intégrés MOS analogiques et traitement



du signal". Quatrième colloque sur le traitement du signal et ses applications. Nice 1973

CARACTERISTIQUES DE CALCUL	RESULTATS OBTENUS ET PARAMETRE SENSIBLE	RESULTATS POSSIBLES ET NIVEAU D'ACTION
1 - Fréquence maximum de calcul	1 MHz : le BBD a un comportement de ligne dispersive.	Autre structure de BBD, autre technologie : 5 MHz. Structure de CCD : 10 MHz.
2 - Période maximale de calcul (à température ambiante)	20 ms : courant de fuite des condensateurs mémoire du BBD.	Autre processus technologique : 200 ms. Autres substrats semiconducteurs : 1 mm. Mémoires à effet MIIS : 1000 heures et plus. /5/ Nous avons implanté de telles mémoires. Les difficultés technologiques rencontrées ne nous ont pas encore permis de les caractériser.
3 - Largeur de raie élémentaire $df/f \approx \frac{2,2}{N}$ Erreur sur la fonction de corrélation $E \approx \frac{2,2}{\sqrt{N}}$	$df/f \# 5 \%$ $E \# 30 \%$ Longueur du registre à décalage sur un seul circuit 50 points.	Circuits associatifs : 500 points $df/f \# 5/1000$ $E \# 10 \%$ Structures de calcul récursive.
4 - Erreurs de calcul fortement corrélées aux signaux. Densité spectrale moyenne.	Fig. 4 : - 40 dB Bruit de commutation du transfert de charges dans le BBD. Fig. 5 : - 20 dB Produits de convolutions parasites, signaux non centrés. Produits de convolution non linéaires non linéarité des multiplieurs arithmétiques.	Circuit de conditionnement du signal en sortie, rééchantillonnage, filtrage passe bas : gain de 20 dB. Circuit de produit bidifférentiel sur le signal et sur la réponse impulsionnelle : - 60 dB.
5 - Erreurs de calcul faiblement corrélées aux signaux	Bruits des semiconducteurs et des structures MOS. - 90 dB/df = 1Hz à 10 KHz. Bruits spatiaux sur une puce, dispersion des paramètres physiques à la surface du circuit : en moyenne - 50 dB	Circuits dont les transistors MOS sont à grandes transconductance. Nombreux points de calcul si le processus est ergodique, stationnaire. idem ligne 5
6 - Discrétion du temps	Périodisation des spectres	idem ligne 4 Interpolation en $(\sin x/x)$ par structure transversal.



CALCULATEURS ANALOGIQUES INTEGRES POUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL.

TABLEAU II : L'intérêt de l'intégration à grande échelle est de faire disparaître la notion du circuit de base au profit de celle de fonction de base.
Les fonctions présentées sont réalisables par la même famille de circuits et ne diffèrent que par leur topologie et certaines phases du processus de réalisation.

TECHNOLOGIE	IMPLANTATION	FONCTION DE BASE	
BBD	1 BBD monté en ligne à retard	Retard pur analogique Compression/extention de temps en temps différé Compression/extention de spectre en temps différé	$s(nT) = e(n-i)T$ $s(nT) = e(n-i)kT$ $S(f) = E(f/k) - k^{-1}$
BBD	1 BBD dont chacune des mémoires est "sortie"	Mémoire à accès série/parallèle Multiplexeur/Démultiplexeur analogique	
BBD/BBD	2 BBD de même sens de propagation	Autocorrélation Intercorrélation Filtrage transversal Analyse de spectre de type "Chirp transform"	$s(nT) = \sum_i e(iT) f(n-i)T$ $(nT) = \sum_i h(iT) e(i-n)T$ $S(f,t) = \sum_i e(iT) W_t(iT)$
BBD/BBD	2 BBD de sens de propagation opposé	Filtrage adapté adaptatif MF	$s(t) = \sum_i h(-iT, t) e(i-n)T$
BBD/MIIS	1 BBD ligne à retards. Mémorisation MIIS des pondérations	Filtrage transversal BF Filtrage adapté, reconnaissance de formes BF	$S(T) : \sum_i h(-iT) e(i-n)T$
MIIS/MIIS	Retards purs et pondérations obtenus par effet miis	Mêmes fonctions en TBF et UBF	

Les limitations de fonctionnement sont celle du tableau II
domaines fréquentiels d'utilisation sont définies par les lignes 1 et 2.

En particulier les



FIGURE 4 REPOSE FREQUENCIELLE DU CIRCUIT DE LA FIGURE 2. (1 Raie filtrée à 3040 Hz. 2 Frequence d'horloge : 12160 Hz. 3 Raies images. $dF/F = 5\%$)

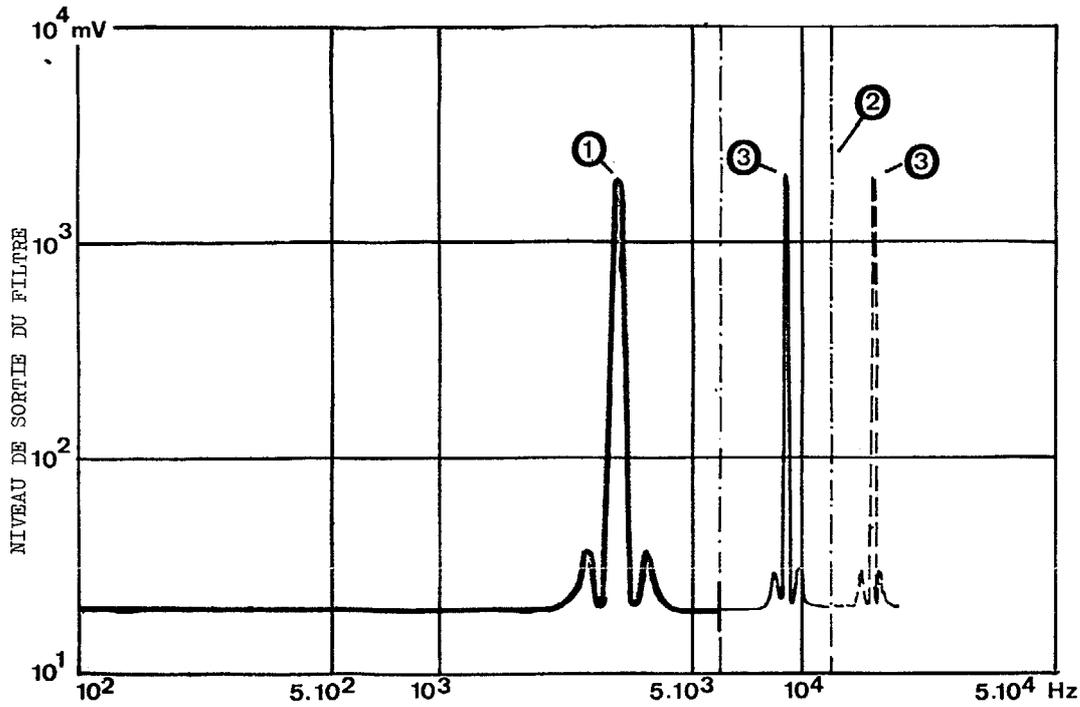
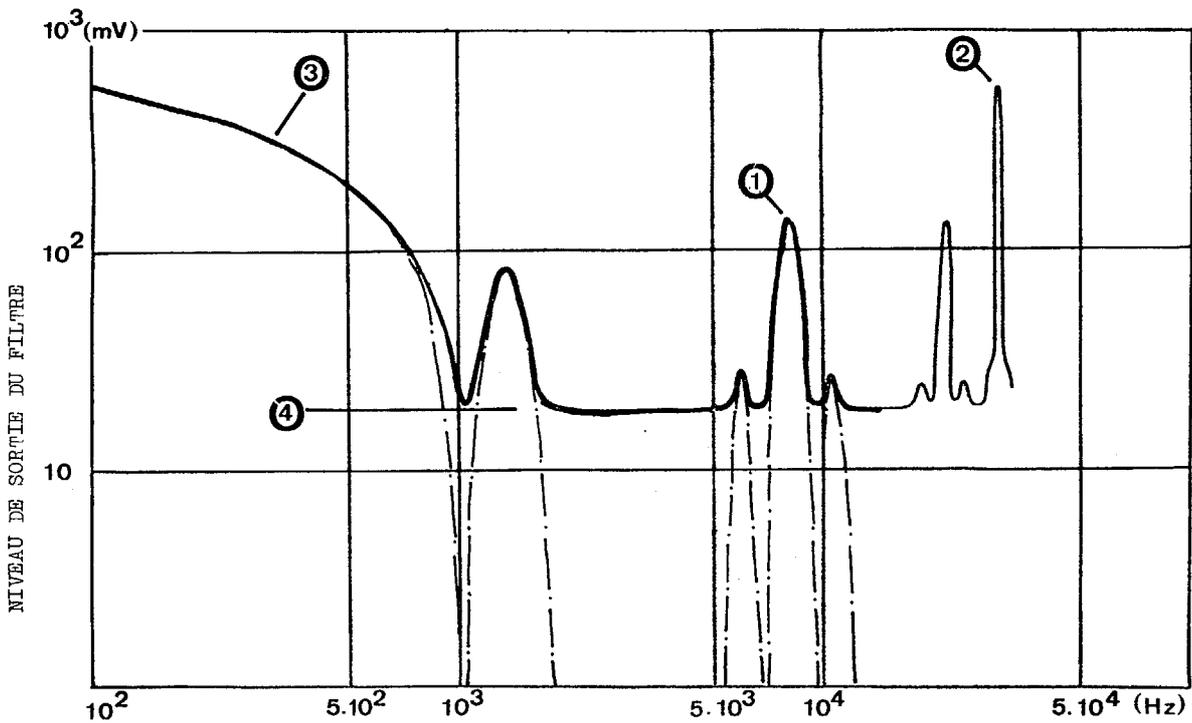


FIGURE 5 REPOSE FREQUENCIELLE DU CIRCUIT DE LA FIGURE 3 (1 Raie filtrée à 8006 Hz. 2 Fréquence d'horloge : 21004 Hz. 3 Raie centrée autour de Zéro, 4 Niveau des produits de convolution parasites : erreurs de calcul corrélées au signaux.)





CALCULATEURS ANALOGIQUES INTEGRES POUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL

FIGURE 1 FILTRE TRANSVERSAL

$$s(n) = \sum_{i=1}^N h(i) \cdot e(n-i)$$

- 1 Ligne à retards
- 2 Mémoire des pondérations
- 3 Multiplieurs arithmétiques
- 4 Sommateur

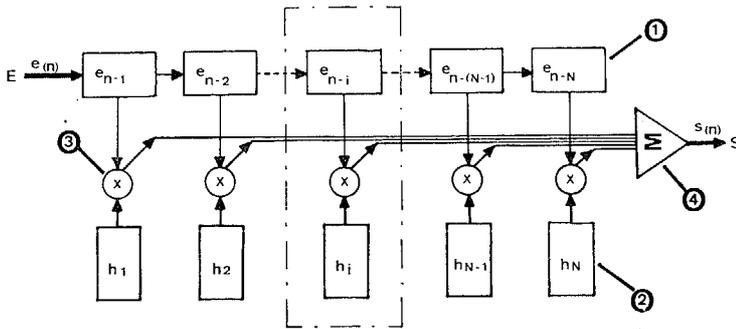


FIGURE 2 REALISATION DE FILTRE TRANSVERSAL

(Pondérations : +1,0,-1,0)

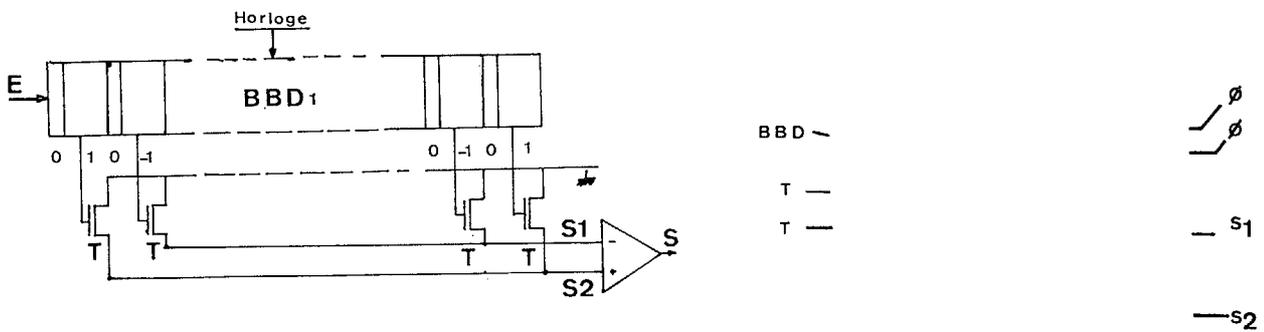


FIGURE 3 REALISATION DE FILTRE TRANSVERSAL

(E : signal à filtrer. S : signal filtré.
H : signal de réponse impulsionnelle)

