

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 26 au 30 AVRIL 1977

PERFORMANCES ET POSSIBILITES D'EMPLOI DES DISPOSITIFS
A TRANSFERT DE CHARGE DANS LE TRAITEMENT DU SIGNAL
PERFORMANCE AND POTENTIAL APPLICATIONS OF CCD IN SIGNAL PROCESSING

Jean Edgar PICQUENDAR

THOMSON - CSF

DACTEL

101, Boulevard Murat

75016 - PARIS

RESUME

La baisse spectaculaire du coût des composants nécessaires à la réalisation des calculateurs numériques a largement contribué à généraliser l'emploi de systèmes de traitement du signal utilisant dès que possible une conversion analogique numérique

Les dispositifs à transfert de charge permettent depuis peu de calculer directement en analogique des formes linéaires temporelles avec une puissance de calcul considérable.

En prenant comme exemple pratique, la réalisation de filtres téléphoniques pour transmission multiplex numérique, on discutera des performances atteintes, des possibilités d'emploi de la puissance et de la précision des calculs en examinant :

- la tenue des gabarits
- le bruit propre des dispositifs
- la dynamique des signaux qu'ils peuvent traiter.

On étudiera également :

- les servitudes d'emploi,
- les possibilités d'intégration,
- la consommation énergétique,
- la réalisation pratique des dispositifs spécialisés.

.../

SUMMARY

The spectacular decrease of the cost of components used in digital computers has promoted the widespread use of digital signal processing following A/D conversion.

Recently developed CCD with considerable computing power allow direct analog processing of time - dependant linear transforms.

Taking as a practical example the PCM filters the performance and potential applications will be discussed including the following : computation capacity and precision, accuracy of frequency response, noise and dynamic range.

Also described are : auxiliary circuits, power consumption and practical implementation of specialized devices in LSI form.



PERFORMANCES ET POSSIBILITES D'EMPLOI DES DISPOSITIFS A
TRANSFERT DE CHARGE DANS LE TRAITEMENT DU SIGNAL

J.E. PICQUENDAR

INTRODUCTION

Dans les systèmes électroniques, les signaux se présentent naturellement sous la forme de grandeurs électriques : ce sont par essence des signaux analogiques.

Les traitements que l'on peut faire subir à un signal mettent en oeuvre un nombre restreint d'opérations élémentaires de base au nombre desquelles on peut citer :

- la comparaison
- le filtrage destiné soit à sélectionner soit à éliminer
- le stockage
- la convolution.

Un certain nombre de ces opérations peuvent être effectuées directement sur des grandeurs électriques au moyen de circuits électroniques appropriés au nombre desquels on peut citer :

- les comparateurs
- les filtres
- les multiplicateurs élémentaires.

Cependant on se heurte rapidement dans cette voie à des difficultés qui tiennent aux principes mêmes des circuits utilisés.

- Les circuits passifs sont bien linéaires mais ils sont dissipatifs et ne peuvent stocker les signaux bien longtemps ;
- les circuits actifs de leur côté introduisent des non linéarités, du bruit et limitent la dynamique des systèmes.

C'est pour contourner ces deux problèmes que l'on a développé le traitement numérique des signaux.

La méthode consiste à opérer le plus près possible de l'entrée la conversion analogique/numérique cela consiste à remplacer la représentation du signal sous la forme d'une grandeur électrique par une représentation sous la forme d'un nombre binaire. Certes ce nombre binaire est lui aussi représenté par des grandeurs électriques mais la réduction à 2 états seulement de celles-ci permet l'élimination des bruits parasites et autorise la régénération des signaux sans dégradation des performances.

Si un signal de télévision analogique ne peut actuellement traverser 100 répétiteurs de télédistribution sans détérioration inadmissible, sa représentation numérique peut, sans dégradation apparente, traverser plusieurs millions de portes d'ordinateur.

La mise au point de convertisseurs analogiques/numériques rapides et précis et le développement des circuits intégrés à large échelle avec au tout premier plan le microprocesseur ont largement contribué à l'emploi généralisé du traitement numérique du signal.

Les mémoires permettent de stocker les informations pendant un temps nettement plus élevé que dans le cas du traitement analogique. La dégradation, la non-linéarité et le bruit sont pratiquement absents des ordinateurs.

De plus, le traitement du signal se ramène à un traitement mathématique, passible de simulation, d'analyse et de vérification et se libère, du moins en apparence, des contraintes technologiques.

Et cependant, dans de nombreux cas, le développement pratique des dispositifs à transfert de charge risque de renverser cette tendance.

LE CALCULATEUR DE FORME LINEAIRE A TRANSFERT DE CHARGE.

L'utilisation pratique et fructueuse des calculateurs numériques a fait rentrer dans les habitudes le remplacement des signaux continus par des signaux échantillonnés rythmiquement.

Le problème fondamental du calculateur analogique revient donc à sélectionner une grandeur électrique capable de représenter un nombre fini d'échantillons du signal avec la précision et la dynamique nécessaire tout en permettant le stockage sans dégradation.

Les dispositifs à transfert de charge représentent le signal par un nombre de porteurs de charge (électrons ou trous) qui est proportionnel à son amplitude.

Les technologies mises au point au cours du développement des circuits MOS (métal - oxyde-semiconducteur) permettent de délimiter rapidement le domaine d'utilisation de ces nouveaux systèmes.

A la température ambiante dans un silicium de qualité industrielle le temps de retour à l'équilibre d'une capacité MOS est couramment de l'ordre de la dizaine de secondes ce qui fait que l'on pourra atteindre des temps de stockage de l'ordre de cent millisecondes.

Avec les tensions habituelles de l'ordre de la dizaine de volts et des surfaces d'électrodes correspondant aux pratiques des fabricants de semiconducteurs, on peut stocker sur chacune d'entre elles jusqu'à 10^8 électrons. A l'autre extrémité de l'échelle on montrera que les bruits sont de l'ordre de quelques centaines d'électrons ce qui offre une plage d'utilisation potentielle d'environ 100 décibels que l'on n'avait pas jusqu'ici trouvé dans les calculateurs analogiques.

PERFORMANCES ET POSSIBILITES D'EMPLOI DES DISPOSITIFS A
TRANSFERT DE CHARGE DANS LE TRAITEMENT DU SIGNAL.

J.E. PICQUENDAR

La forme normale du dispositif à transfert de charge est celle d'une mémoire séquentielle dynamique.

Le nombre des porteurs présents dans chaque case de la mémoire peut être mesuré de manière non destructive et non perturbante par méthode capacitive.

C'est en grande partie les particularités uniques de cette mesure qui expliquent les performances exceptionnelles de ce dispositif : il n'y a aucun transfert d'énergie du signal entrant au signal sortant d'un dispositif à transfert de charge.

Du point de vue fonctionnel nous pourrions considérer la fonction de base d'un dispositif à transfert de charge comme celle d'une boîte noire qui, à un signal d'entrée $x(t)$ associé à un signal de sortie $s(t)$ reliés par la relation suivante :

$$S(t) = a_0 x(t) + a_1 x(t - \tau) + a_2 x(t - 2\tau) + \dots + a_n x(t - n\tau)$$

ou $a_0, a_1, a_2 \dots a_n$ sont des nombres algébriques caractéristiques des dispositifs et ou τ est la période de l'horloge commandant rythmiquement le transfert de charges d'une case à la suivante ; c'est bien une forme linéaire.

Fixons quelques ordres de grandeur :

- la fréquence de l'horloge peut varier de quelques dizaines de hertz à quelques dizaines de megahertz.
- le nombre de coefficients peut atteindre plusieurs centaines.

UTILISATION DES CALCULATEURS DE FORME LINEAIRE TEMPORELLE.

Les calculateurs de forme linéaire temporelle sont plus connus sous leur forme de filtres transverses, ils se prêtent en effet particulièrement bien à la réalisation de :

- filtre passe bas, passe bande, passe haut,
- filtre de Hilbert,
- filtre pour compression d'impulsion

Mais ils se prêtent également à la réalisation de :

- calculateurs analogiques de transformée de Fourier rapide
- corrélateurs
- calculateurs numériques en algèbre de Galois.

Dans la suite nous examinerons les possibilités actuelles d'emploi en nous référant à une réalisation concrète : un filtre de voie pour transmission multiplex numérique. C'est un filtre passe bas dont la bande passante s'étend de 300 hertz à 3400 hertz avec une oscillation inférieure à $\pm 0,2$ db et dont l'atténuation à partir de 4600 hertz est supérieure à 40 db.

Deux autres conditions viennent s'ajouter au gabarit :

- la dynamique, définie comme le rapport entre l'énergie maximum du signal de sortie entaché de moins de 0,5 % de taux de distorsion harmonique et l'énergie de bruit à la sortie du système en l'absence du signal, doit être supérieure à 75 décibels.
- la consommation du dispositif doit être inférieure à 50 mW.

PERFORMANCES ACTUELLES DES DISPOSITIFS A TRANSFERT DE CHARGE.

PUISSANCE DE CALCUL

Le calculateur de forme linéaire qui possède n coefficients et obéit à une horloge de fréquence f effectue par seconde nf multiplications et f additions.

Dans le cas pratique d'un filtre pouvant servir au multiplex numériques :

$$n = 180 \quad f = 64 \text{ kHz}$$

Le filtre effectue donc plus de 10 millions de multiplications par seconde.

PRECISION DU CALCUL

La précision du calcul est liée à trois facteurs :

- la linéarité des transformations charge \rightarrow tension et tension \rightarrow charge. Comme elle utilise la relation $V = Q/C$ ou C est une véritable capacité on peut négliger les erreurs qu'elle introduit compte tenu des précautions que l'on prend pour sa réalisation.
- la régularité de l'horloge
Si l'on choisit une horloge à quartz, la précision peut atteindre 10^{-6} et on peut négliger les erreurs qu'elle introduit.
- la précision des coefficients de pondération

En utilisant des électrodes de longueurs voisines de 1 millimètre et des procédés électroniques de réalisation de masques on peut atteindre des précisions de l'ordre de $1/4000$.



PERFORMANCES ET POSSIBILITES D'EMPLOI DES DISPOSITIFS A
TRANSFERT DE CHARGE DANS LE TRAITEMENT DU SIGNAL

J.E. PICQUENDAR

TENUE DES GABARITS

La difficulté de réalisation d'un filtre dépend :

- de la valeur de l'affaiblissement en bande coupée
- de la valeur de l'ondulation en bande passante
- de la raideur du front de transition.

Le filtre à transfert de charge a des coefficients de pondération de valeurs très voisines de celles des échantillons de sa réponse impulsionnelle. Le nombre de coefficients dépend donc principalement de la raideur du front de transition.

On sait réaliser assez aisément des filtres respectant une ondulation de $\pm 0,1$ db en bande passante et d'atténuation $\gg 40$ db en bande coupée.

On peut en pratique limiter à quelque millièmes le taux d'harmoniques.

BRUITS DES DISPOSITIFS

Bien entendu, comme tous dispositifs actifs, les dispositifs à transfert de charge produisent un certain bruit.

Le bruit total de sortie est dû à la combinaison de nombreux bruits élémentaires que l'on peut classer en bruits propres et bruits auxiliaires.

On peut recenser trois sources de bruits propres :

- les bruits Schottky d'injection des charges
- les bruits liés à l'inefficacité de transfert ou plutôt à ses variations
- les bruits liés à la partition des charges entre capacités.

L'ensemble de ces bruits est généralement faible et peut être ramenée à des valeurs inférieures à 1000 électrons.

Les bruits auxiliaires ont pour source :

- les bruits d'horloge qui sont de deux types :
 - . parasites résiduels dus aux transitions d'horloge
 - . bruit dû à la gigue de phase de l'horloge
- les bruits d'alimentation dans lesquels nous classons également les bruits dus aux MOS de charge et de lecture
- les bruits d'environnement dûs au fait que les électrodes du filtre sont "en l'air" et captent par couplage électrostatique tous les signaux parasites de l'environnement. Un soin particulier doit être apporté au blindage des dispositifs.

Tout ceci conduit à une dynamique des dispositifs pouvant atteindre à l'heure actuelle 80 décibels.

SERVITUDE D'EMPLOI

Pour fonctionner, un dispositif à transfert de charge a besoin d'une horloge et d'un certain nombre de circuits auxiliaires.

C'est de la précision de l'horloge que vient en grande partie la puissance de calcul. C'est une servitude, moins lourde, que l'on pourrait penser car l'horloge peut être commune à de nombreux dispositifs et pré-existe souvent comme c'est le cas dans les systèmes téléphoniques.

Les circuits auxiliaires comprennent notamment :

- les générateurs de phase, produisant à partir du signal d'horloge les tensions à appliquer aux électrodes de transfert
- les dispositifs d'injection des charges
- les dispositifs de lecture.

Tant pour diminuer leur consommation que leur sensibilité aux parasites extérieurs ces dispositifs doivent se trouver sur la même puce que le dispositif à transfert de charge proprement dit. Le calculateur de forme linéaire sera donc un LSI.

La technologie de réalisation des dispositifs à transfert de charge est très voisine de celle des MOS et l'on peut donc rassembler sur une même puce dispositif et circuits auxiliaires.

CONSOMMATION ENERGETIQUE

Le dispositif par lui même est une capacité qui ne fait que transférer des charges ; il a donc une consommation intrinsèque très faible. La consommation principale est due aux servitudes (générateur de phase etc ...) et aux contraintes d'interface avec le monde extérieur.

En pratique on peut envisager réaliser sous forme d'un LSI de taille raisonnable (de l'ordre de 20 millimètres carrés) un groupe de plusieurs filtres (2 ou 4) montés dans un seul boîtier et consommant de l'ordre de 100 mw en utilisant des tensions d'alimentations courantes (12 V - 5 V).

.../

PERFORMANCES ET POSSIBILITES D'EMPLOI DES DISPOSITIFS A
TRANSFERT DE CHARGE DANS LE TRAITEMENT DU SIGNAL

J.E. PICQUENDAR

CONCLUSION

Les dispositifs à transfert de charge permettent donc de réaliser des calculateurs de formes linéaires puissants et bien adaptés aux traitements des signaux radar, sonar et de télécommunications.

Leur faible volume, leur consommation et leur coût modeste induiront des modifications profondes dans l'architecture des systèmes électroniques.

Leur développement pratique a été subordonné à la réalisation de LSI et à l'existence d'un marché de volume suffisant pour supporter le coût de leur étude et leur mise au point.

Leur utilisation par l'Industrie Téléphonique qui consacre le cinquième de ses dépenses au filtrage est sans doute le point de départ de leur essor.

