

• Chapitre DSP (Digital Signal Processor)

• 1. Introduction

Nous allons introduire une description des processeurs de traitements des signaux appelés sous l'acronyme Anglais DSP (Digital Signal Processor).

Ce processeur est utilisé dans le traitement numérique du signal dont les applications sont nombreuses et variées (traitements du son, de l'image, synthèse et reconnaissance de la parole, analyse, compression de données, télécommunications, automatisme, etc.). Chacun de ces domaines nécessite un système de traitement numérique adaptée, pour un coût économique approprié. . Son architecture, ses instructions et l'ensemble de ses fonctionnalités ont été choisies pour le rendre particulièrement performant dans le domaine du traitement du signal. Le DSP est une solution pour les applications embarquées.

Les microprocesseurs progressent très vite, chaque nouvelle génération est plus performante que l'ancienne, pour un coût moindre. Les DSP, qui sont un type particulier de microprocesseur, n'échappent pas à cette progression.

2. Présentation des DSP

Un DSP est un type particulier de microprocesseur. Il se caractérise par le fait qu'il intègre un ensemble de fonctions spéciales. Ces fonctions sont destinées à le rendre particulièrement performant dans le domaine du traitement numérique du signal.

Comme un microprocesseur classique, un DSP est mis en œuvre en lui associant de la mémoire (RAM, ROM) et des périphériques. Un DSP typique a plutôt vocation à servir dans des systèmes de traitements autonomes. Il se présente donc généralement sous la forme d'un microcontrôleur intégrant, selon les marques et les gammes des constructeurs, de la mémoire, des timers, des ports série synchrones rapides, des contrôleurs DMA, des ports d'E/S divers.

D'une manière générale l'architecture d'un système de traitement numérique du signal peut être représentée de façon très schématique par la figure suivante :

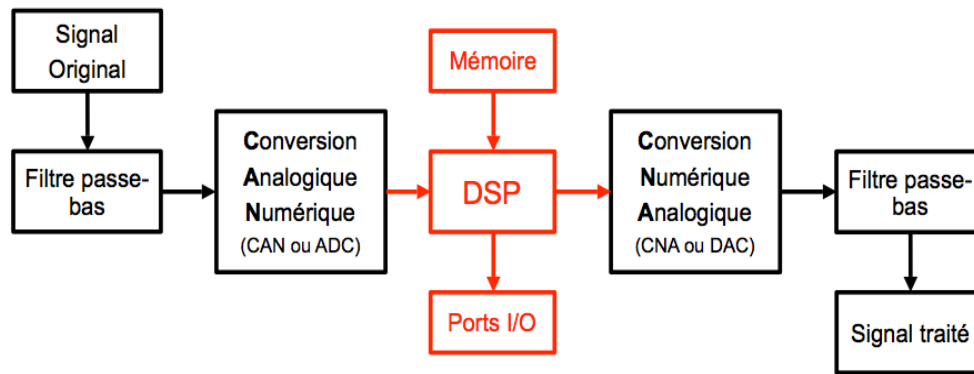


Figure1.1 Système de traitement numérique simple

ADC : Convertisseur Analogique Numérique

DAC : Convertisseur Numérique Analogique

Le [filtre](#) antirepliement et de reconstruction sont des **filtres passe-bas**

Dans tous les domaines du traitement du signal, on trouve des traitements faisant appel à des fonctions :

- 1- de filtrage (opérations de convolution) ;
- 2- de calcul matriciel ;
- 3- de transformations complexes (DFT, FFT, DCT...) ;
- 4- de génération de signaux ;
- 5- de calculs de caractéristiques statistiques telles que, moyennes, inter corrélations et autocorrélations, Convolution etc.

3. Avantages des systèmes à base de DSP

Tous les systèmes à bases de DSP bénéficient des avantages suivants :

1- Souplesse de la programmation :

Un DSP est avant tout un processeur exécutant un programme de traitement du signal. Ceci signifie que le système bénéficie donc d'une grande souplesse de développement. De plus, les fonctions de traitements numériques peuvent évoluer en fonction des mises à jour des programmes, et cela pendant toute la durée de vie du produit incluant le système. Ainsi, modifier par exemple tel ou tel paramètre d'un filtre numérique ne nécessite pas un changement matériel.

2- Implémentation d'algorithmes adaptatifs :

Une autre qualité issue de la souplesse des programmes. Il est possible d'adapter une fonction de traitement numérique en temps réel suivant certains critères d'évolutions du signal (exemple : les filtres adaptatifs). Des possibilités

propres au système de traitement numérique du signal. Certaines fonctions de traitement du signal sont difficiles à implanter en analogique, voire irréalisables (exemple : un filtre à réponse en phase linéaire).

3- Stabilité :

En analogique, les composants sont toujours plus ou moins soumis à des variations de leurs caractéristiques en fonction de la température, de la tension d'alimentation, du vieillissement, etc. Une étude sérieuse doit tenir compte de ces phénomènes, ce qui complique et augmente le temps de développement. Ces inconvénients n'existent pas en numérique.

4- Répétabilité, reproductibilité :

Les valeurs des composants analogiques sont définies avec une marge de précision plus ou moins grande. Dans ces conditions, aucun montage analogique n'est strictement reproductible à l'identique, il existe toujours des différences qu'il convient de maintenir dans des limites acceptables. Un programme réalisant un traitement numérique est par contre parfaitement reproductible.

-
- 2. : Caractéristiques et numérisation des DSP

1-Introduction

Parallèlement aux microprocesseurs et aux microcontrôleurs, les processeurs de traitement numérique du signal, ou DSP (Digital Signal Processor), ont bénéficié des énormes progrès en rapidité (grâce au faible temps de commutation) et en puissance de calculs (grâce au nombre de bits des bus internes) des composants logiques intégrés programmables.

D'une manière générale, tous les processeurs vérifient la loi de Moore, l'un des fondateurs de la société Intel qui annonçait, dès sa création, que la densité d'intégration des composants doublerait tous les dix-huit mois. En 1995, on savait intégrer dix millions de transistors dans un composant unique. Utilisés initialement pour gérer la carte son des micro-ordinateurs, les DSP ont vu leur utilisation s'accroître considérablement depuis 1985, tout d'abord grâce au développement des télécommunications (téléphonie numérique, puis téléphonie sans fil GSM), puis grâce à ses possibilités de traitement rapide de certaines commandes numériques faisant appel à des algorithmes complexes permettant ainsi le travail en « temps réel » .

En utilisant des données numériques extraites d'un signal, on rend les systèmes de commande et de gestion électroniques beaucoup plus fiables, et reproductibles. Là où il fallait des réglages en électronique analogique, il suffit d'imposer une valeur constante convenablement choisie dans un registre

particulier du composant. On fixe ainsi l'amplification ou la bande passante d'un filtre numérique, et ceci de manière définitive.

La très bonne précision en temps (donc en fréquence) des composants numériques provient de l'extraordinaire stabilité de la fréquence d'oscillation du quartz, fréquence qui sera celle de l'horloge du processeur, en pratique choisie entre 20 MHz et 200 MHz. La capacité en nombre de bits de données est l'une des caractéristiques de la puissance de traitement du processeur. Il existe des microprocesseurs et des microcontrôleurs 8 bits, à 16 bits et même plus.

Les DSP devant être encore plus performants, les données numériques seront à 16 ou 32 bits, voire plus.

2- Rôle du DSP

Le traitement numérique du signal, qu'il provienne du son ou d'une image vidéo, est rendu accessible par le DSP grâce à son unité de calcul spécifique multiplicateur-additionneur- accumulateur de données.

En effet, tout DSP est prévu pour effectuer le plus rapidement possible, en un seul cycle d'horloge, l'opération multiplication-addition sur des grandeurs numériques comme :

$$MR = X \cdot Y + R$$

Où X et Y sont soit des données, soit des constantes et R une donnée, une constante ou un résultat précédent. MR est alors le résultat de l'opération arithmétique.

Si le DSP fonctionne en virgule fixe avec des données sur 16 bits, le résultat MR est alors sur 32 bits (ou plus, selon l'architecture). Si l'utilisateur ne conserve que les 16 bits de poids fort, le calcul est alors effectué en **simple précision**. Si les 32 bits sont utilisés, on parle de **double précision** : le temps de calcul est alors plus long.

Si le DSP fonctionne en virgule flottante avec des données en 32 bits, le résultat MR est alors sur 40 bits (ou plus, selon l'architecture). L'utilisateur ne prend en compte que les données de 32 bits en ignorant les bits de poids faibles de la mantisse.

Le premier DSP a été produit en 1982 par Texas Instruments. Depuis, cinq autres générations de DSP sont apparues. Les processeurs des générations 1, 2 et 5 sont en virgule fixe, les générations 3, 4, 6 en virgule flottante.

3. Les diverses approches possibles.

3.1. Approche signal

Cette approche caractérise d'emblée le DSP et fait de lui un composant numérique pour les spécialistes du signal et les électroniciens.

L'[utilisateur](#) retrouve les filtres, avec amplification, atténuation, mais aussi le traitement numérique du signal (convolution, corrélation, transformée de Fourier rapide : FFT pour *Fast Fourier Transform*), filtrage numérique, compression, codage et décodage des données ...), toutes ces applications faisant appel à des algorithmes.

Les signaux à traiter sont caractérisés par la fréquence maximale possible associée à un phénomène physique ou à un système donné. D'après le théorème de Shannon, la fréquence d'échantillonnage F_e , définie par : **$F_e = 1/T_e$** ,

T_e étant la période d'échantillonnage, doit être telle que : **$F_e \geq 2f_{max}$**

Si on ne respecte pas cette règle, il risque d'y avoir *repliement spectral* (*aliasing*). La fréquence d'échantillonnage **F_e** est en général imposée par le convertisseur analogique/numérique.

Le nombre de cycles de calcul à l'intérieur d'une période d'échantillonnage **T_e** , donne la possibilité pour le DSP d'intervenir efficacement ou non en *temps réel* entre deux prises d'échantillons. Si ce n'est pas le cas, par exemple pour un signal vidéo, le DSP intervient selon un processus plus lent, tout en gérant des interruptions sur une période d'échantillonnage. La gestion des ports entrée/sortie devient alors très complexe.

Dans d'autres cas, le DSP est intéressant pour faire une simulation ou une estimation de grandeurs en temps réel *en parallèle avec le déroulement d'un phénomène physique*. Il faut alors que les durées de calcul des données simulées soient plus courtes que la durée d'évolution du phénomène physique. Ceci est possible si le modèle n'est pas trop complexe, ou si le phénomène physique est très lent.

3.2 Les applications des DSP sont nombreuses dans les domaines suivants :

- **Télécommunications** :

Modem, multiplexeurs, récepteurs de numérotation DTMF, télécopieurs, codeurs de parole GMS, ...),

- **Interfaces vocales** :

Codeur vocaux, reconnaissance automatique de la parole, synthèse vocale ...

- **Militaire** :

Guidage missiles, navigation, communications cryptée, radar, ...

- **Multimédias et grand public** :

Compression des signaux audio (CD), compression des images, cartes multimédias pour PC, synthèse musicale, jeux, ...

-Médical :

Compression d'image médicale (IRM, échographie...), traitements des signaux biophysiques (ECG, EEG,...), implants cochléaires, équipement de monitoring.

- Electronique automobile :

Équipement de contrôle moteur, aide à la navigation, commande vocale, détection de cliquetis pour avance à l'allumage, ...

- Automatisation et contrôle de processus :

Surveillance et commande de machines, contrôle de moteurs, robots, ...

-Instrumentation :

Analyseur de spectre, générateurs de fonction, interprétation de signaux sismiques, ...

3.3. Approche technologique

La **Figure 2.1** montre la vitesse d'un composant en fonction de sa «performance», c'est-à-dire de l'adaptation à des besoins spécifiques de l'électronique. On voit la place privilégiée du DSP par opposition à celle du microprocesseur, d'usage plus général.

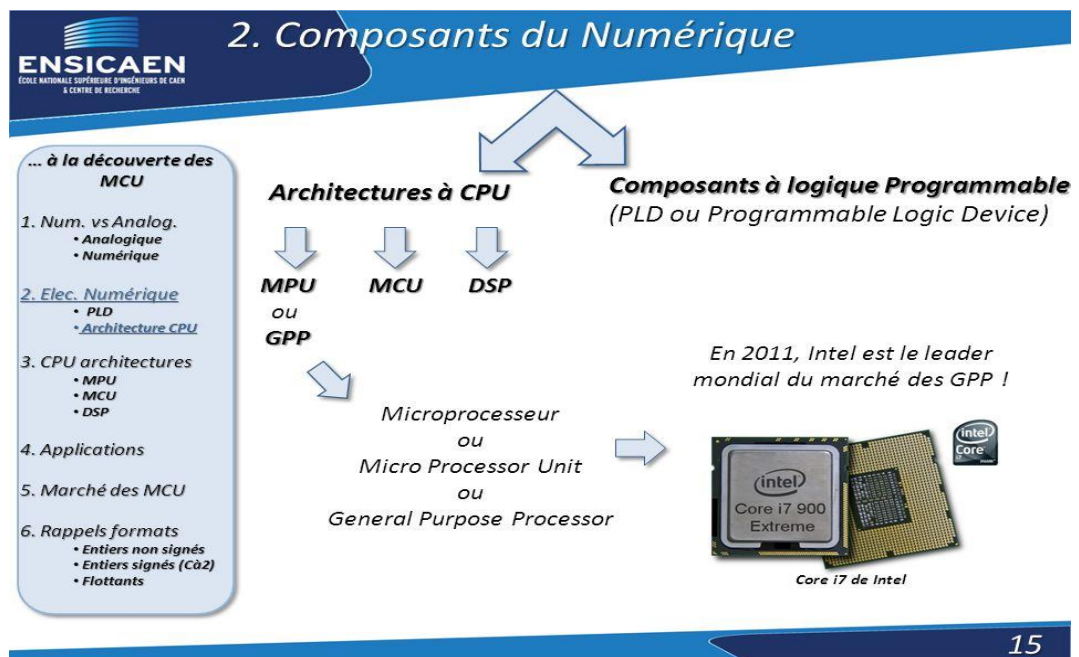


Figure 2.1 : Place du DSP vis-à-vis des autres processeurs

3.3. Approche processeur

On l'a vu, le DSP peut être comparé au microprocesseur et au microcontrôleur. De fait, certains DSP, comme les TMS320F6713 de Texas Instruments utilisé pour des commandes de moteurs électriques, ou les Z89323/373/ ... /473 de Zilog sont des processeurs où l'on a optimisé les avantages du DSP et ceux du microcontrôleur. D'autres, comme les DSP 56000 de Motorola sont issus de la technologie du microprocesseur 68000.

Dans la commande et le contrôle de systèmes complexes, le DSP joue à la fois le rôle du *microcontrôleur*, et celui du *calculateur rapide en temps réel* pour obtenir tous les signaux nécessaires à la commande. C'est le cas du DSP Texas TMS320F240x qui permet la commande des moteurs asynchrones en contrôle vectoriel ou en flux orienté, ainsi que celle des moteurs synchrones et des moteurs pas-à-pas. Mais une autre approche possible consiste à considérer un « noyau DSP » à l'intérieur d'un circuit intégré comportant de nombreuses opérations. La société Hewlett Packard propose la vente des logiciels permettant la création puis l'intégration d'un noyau DSP dans un ASIC (*Applied Specific Integrated Circuit*). Il peut servir, à l'intérieur du composant intégré, en « parallélisme » à un processeur RISC (*Reduced Instruction Set Computer*). Citons, par exemple, le DSP TMS320C54x associé au cœur ARM7, ou bien le MPC823 de Motorola qui réunit à la fois un DSP56800, un cœur Power PC et un module RISC. Le DSP peut aussi être associé à d'autres processeurs par l'intermédiaire du port hôte. Il peut servir en « parallélisme » à un microprocesseur.



3.3.1 Noyau DSP

Soit un processeur assurant en un seul cycle d'horloge l'opération arithmétique élémentaire

$$MR = X \cdot Y + R$$

Il s'agit par exemple d'effectuer des opérations arithmétiques du type *produit de convolution*

$$\sum x^{(k)} \cdot y(n-k)$$

Il est alors nécessaire que le processeur possède une architecture de Harvard avec deux mémoires vives au minimum, c'est-à-dire une mémoire de programme et une mémoire de données. Les données $x^{(k)}$ proviendront par exemple de la mémoire de données, et $y(n-k)$ de la mémoire programme. Ces mémoires communiquent avec quatre bus internes au moins, c'est-à-dire un bus d'adresse pour chacune des mémoires, un bus de données, et un bus de programme. Un système générateur d'adresses, appelé pointeur, s'impose pour activer les mémoires en lecture ou en écriture. La rapidité de calcul s'obtient non seulement grâce à un cycle d'horloge très court, et donc une fréquence élevée, de l'ordre de 200MHz pour certains processeurs, mais aussi grâce à la gestion d'un pipeline. Tout cela réduit, en définitive, un noyau DSP implanté soit dans un composant dédié, soit dans un composant intégré, soit encore sur une carte de traitement d'images ou de flot de données.

Le DSP est en principe un composant séquentiel synchrone, c'est-à-dire que toutes les opérations programmées ne sont effectuées que lorsqu'un front d'horloge apparaît, d'où l'importance de la fréquence de l'horloge. Néanmoins, il commence à apparaître des DSP asynchrones tel le stDSP 16 bits de LG Semicon. Dans ce cas, le transfert des données est contrôlé par des signaux spécifiques d'entrée et de sortie : les registres du pipeline sont ouverts pour le début de la transmission, puis fermés une fois la donnée transmise et placée dans un nouveau registre.
