

Fundamentos de procesamiento digital de señal



Introducción a DSP

- Ventajas del Procesamiento Digital
- Conversión analógico-digital
- Muestreo y Aliasing.
- Procesadores digitales de Señal.

¿Qué es DSP?



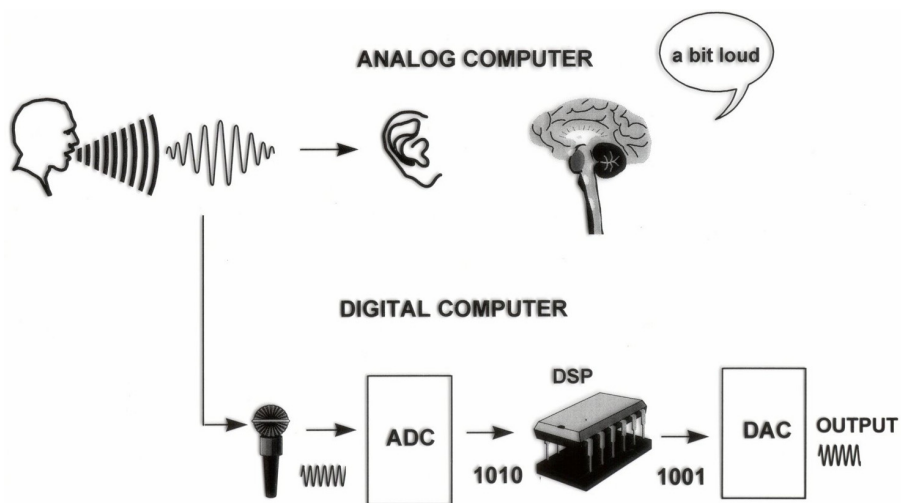
- **DSP: Es una disciplina identificada por el acrónimo en Inglés de “Digital Signal Processing”.**
 - **Comprende los fundamentos matemáticos y algorítmicos que describen como procesar, en un ambiente de computo digital, información asociada a señales provenientes del mundo real.**
 - **Digital:** Sistema electrónico (digital) que opera con datos discretos representados en binario y de precisión finita.
 - **Señal:** Un parámetro variable por medio del cual la información es transmitida en un sistema electrónico
 - **Procesamiento:** la realización de operaciones en los datos mediante una secuencia de instrucciones programadas de acuerdo a un algoritmo que modifica dichos datos o extrae información de los mismos.
- **DSP: Es el dispositivo identificado por el acrónimo “Digital Signal Processor”.**
 - **Implementa ciertas soluciones especializadas de hardware que aceleran la ejecución de los algoritmos de DSP.**

Un poco de historia



- 1948: **Claude Shannon**, “A mathematical theory of communication” Bell System Tech Journal 1948
- 1956: **Texas instruments** desarrolla un procesador digital para datos sísmicos.
- 1965: **James Cooley & John Tukey**: **algoritmo FFT**
- 1970: **Bishnu Atal**: Linear predictive coding.
- 1980s: **Primeros DSPs** de Texas intruments, Intel, NEC.
- 1990: **MPEG-1 layer 3 (MP3)**
- 2000s: **MPEG-7 (Multimedia Content Description Interface)**

Procesamiento Digital de Señal



Conceptos básicos



- **Algunas ventajas sobre procesamiento analógico**
 - **Simplicidad y Versatilidad**
 - Los sistemas pueden ser programados
 - Portabilidad a diferente hardware
 - **Estabilidad y Repetitibilidad**
 - Fácilmente duplicable
 - No cambia con la temperatura
 - **Utilización de una representación o formato digital**
 - Admiten códigos de detección de errores
 - Se pueden realizar funciones especiales

Conceptos básicos



- **Se pretende cambiar o analizar información qué es medida como una secuencia discreta de números.**
- **El procesamiento con un DSP es un campo del procesamiento digital en general que se caracteriza por**
 - **Las señales vienen del mundo real**
 - Necesidad de trabajar en tiempo real
 - Necesidad de medir señales y convertirlas en números
 - **Las señales son discretas:**
 - Información entre muestreos se pierde

Conceptos básicos



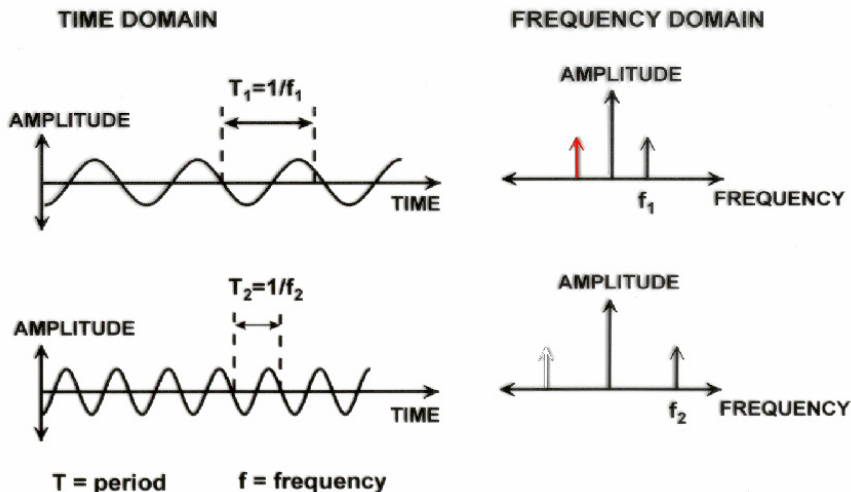
Bases matemáticas

- Modelado de señales continuas. Series y Transformada de Fourier, Transformada de Laplace, filtros analógicos.
- Convolución y Correlación
- Sistemas muestreados, cuantificación de señales: ruido de cuantificación
- Modelado de señales muestreadas: la Transformada Z
 - Transformada discreta de Fourier (DFT), transformada discreta del coseno (DCT), otras transformaciones (Wavelet, Hartley, ...)

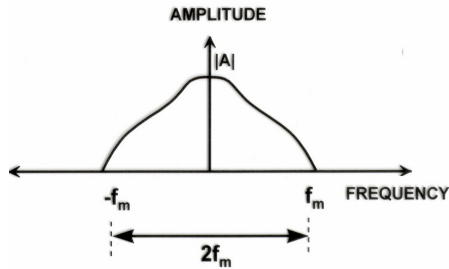
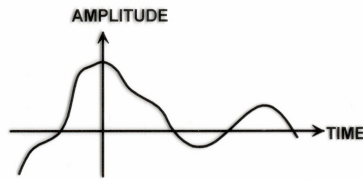
Métodos algorítmicos:

- Transformada rápida de Fourier (FFT)
- otros algoritmos típicos: (Ej: Algoritmo de Goertzel, ...)
- Diseño de filtros digitales

Representación de señales en el dominio de tiempos y en el de frecuencias

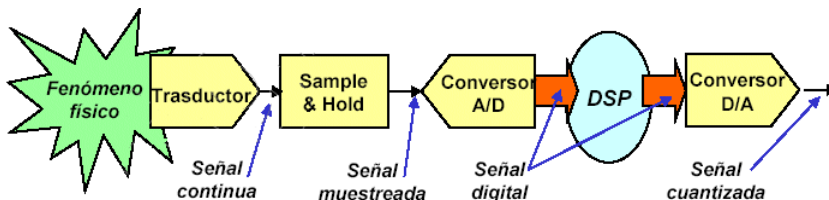


Señales reales: conceptos básicos



- Las señales reales son la combinación de muchas frecuencias
- Ancho de Banda = $2 f_m$
- Espectro = Contenido en frecuencias.

Tratamiento de señales

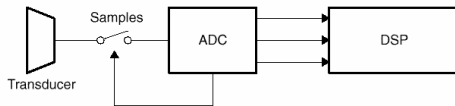
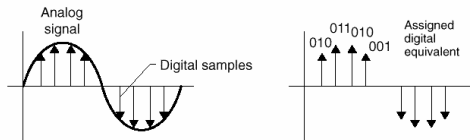


- La mayoría de los fenómenos naturales macroscópicos están asociados a señales continuas: temperatura, radiación, sonido, velocidad y dirección del viento, humedad, .. Lo mismo sucede con muchos fenómenos físicos usados en aplicaciones tecnológicas: fuerza, velocidad de giro, potencia, etc...
- Sin embargo, a veces es útil definir señales imaginarias (usando números complejos) para facilidad de cálculo

Tratamiento de señales



A/D-D/A Conversion



- Las señales reales son analógicas

Transductor

- Convertidor a señal eléctrica

A-D

- cuantización
- muestreo

DSP

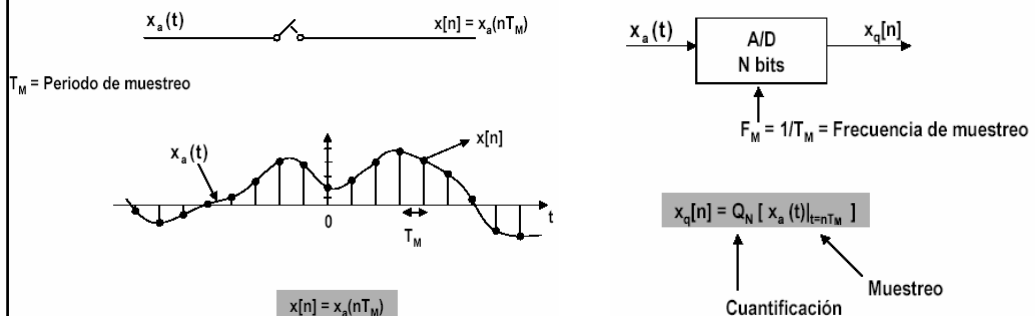
- Manipulación digital

Conversión A/D



Muestreo temporal => Periodo T_M

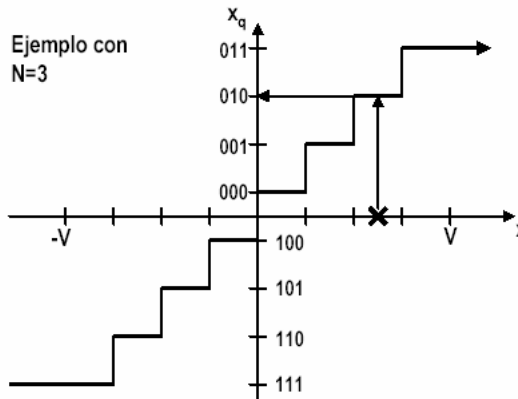
Cuantificación => Número de bits N



Cuantificación

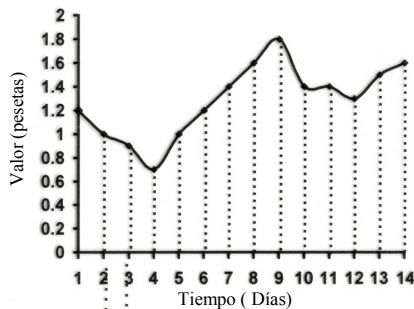


$x_q[n] = Q_N [x[n]] \Rightarrow$ en $[-V, V]$ se representan 2^N valores

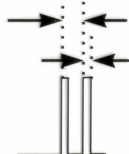


Si $N \gg 1 \Rightarrow x_q[n] \cong x[n]$

Muestreo



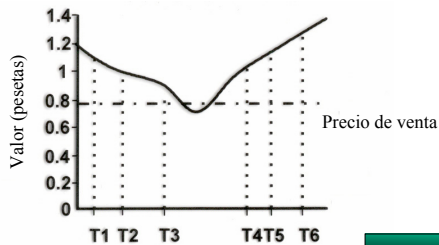
- Tomar una medida a intervalos periódicos.
- Periodo de muestro fijo.
- Estimar el valor del precio de la acción en el tiempo que no disponemos de datos.



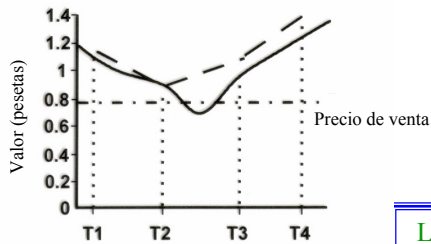
Periodo de Muestreo: tiempo entre medidas.

Tiempo de Muestreo: tiempo empleado en tomar una medida.

Pérdida de Información



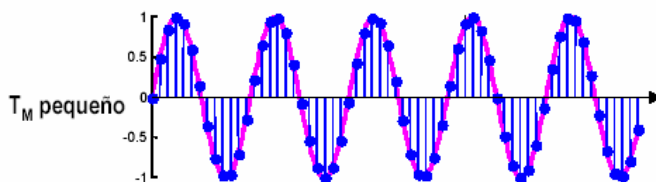
- Tomar muestras a intervalos **NO** periódicos en los puntos de interés
- La interpretación de información es más difícil.



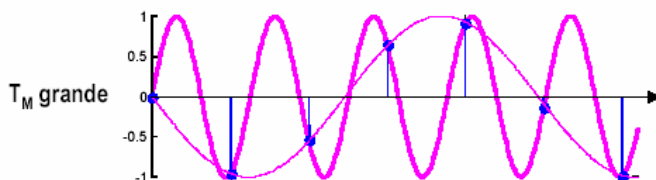
- Periodo de muestro fijo
¿ Se pierde información?
- Es más fácil de interpretar.

La CLAVE es la Frecuencia de Muestreo.

Elección del periodo de muestreo



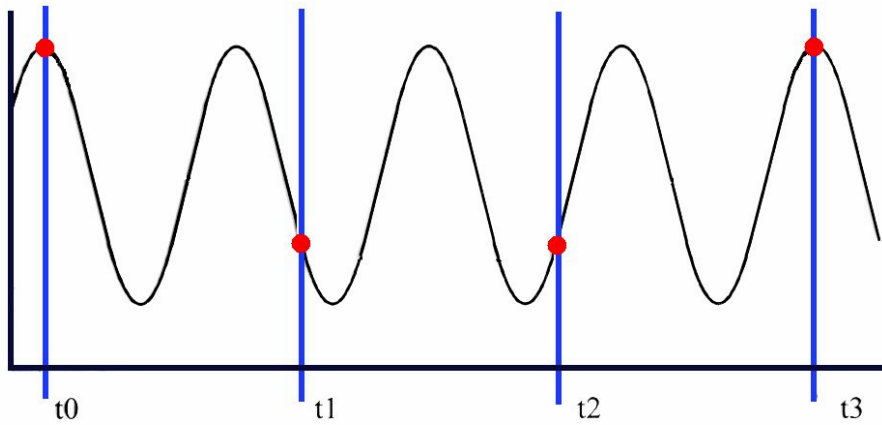
- Buena representación de la señal
- Muchas muestras



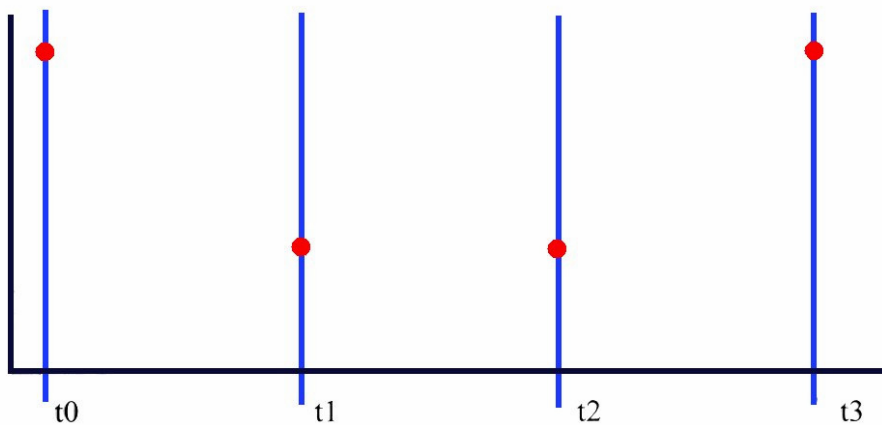
- Pérdida de información
- Pocas muestras

T_M óptimo: mayor posible sin pérdida de información

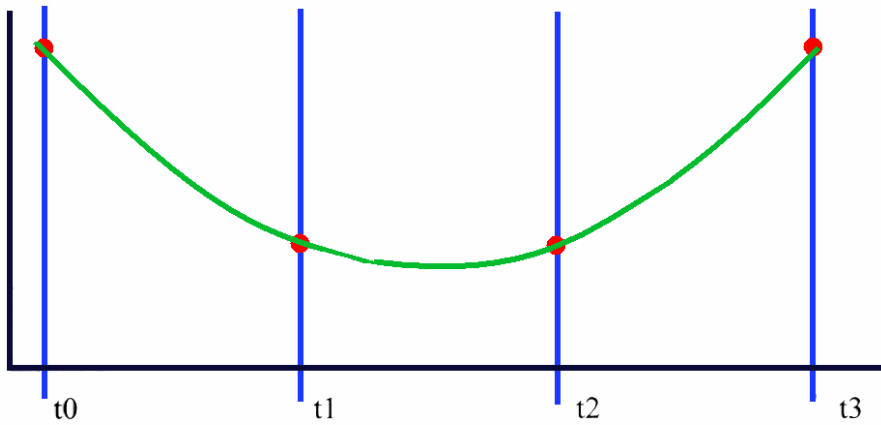
Problema de múltiples Alias



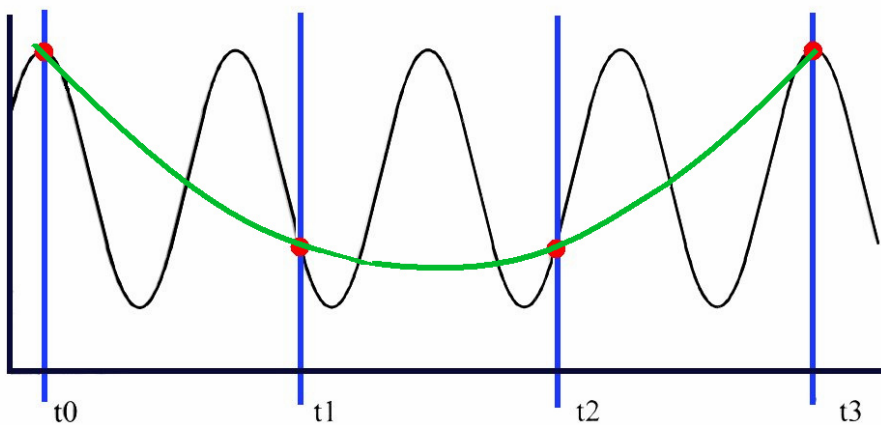
Problema de múltiples Alias



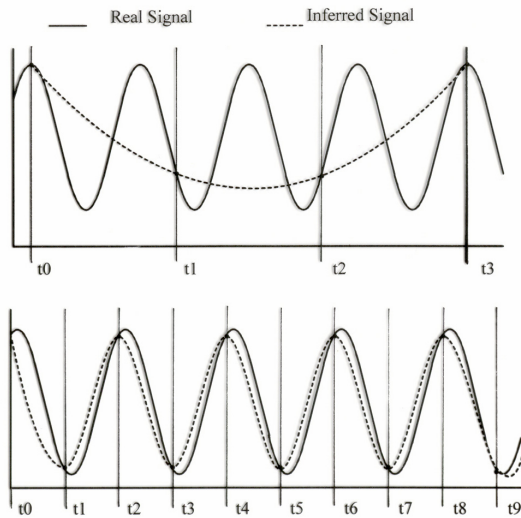
Problema de múltiples Alias



Problema de múltiples Alias



Problema de múltiples Alias



ingeniería informática

Francisco.Gomez@ii.uam.es



Señales 2D: Imágenes

Una imagen digital es una imagen $f(x,y)$ que ha sido discretizada o cuantificada en las coordenadas espaciales y en su brillo. Así pues una imagen digital se puede considerar como una matriz cuyos índices de filas y columnas ($N \times M$) identifican a un punto en la imagen y el valor de la matriz en ese punto será el nivel de gris en ese punto (caso de una imagen monocroma con varios niveles de gris).

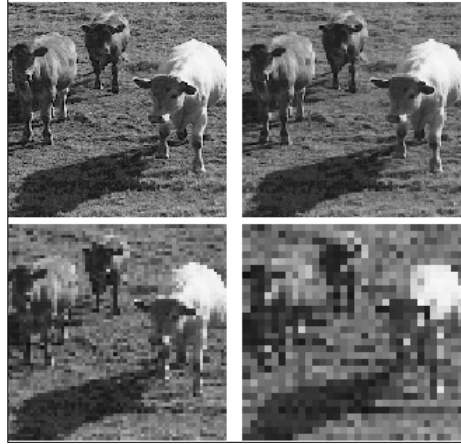
Perdida de información al capturar una imagen:

- Discretización a píxeles (muestreo). Resolución
- Rango limitado de valores de intensidad luminosa (cuantificación).

Muestreo y cuantificación

El muestreo de la imagen tiene el efecto de reducir la resolución espacial de la misma. La diapositiva siguiente muestra el efecto de captar una misma imagen a diferentes resoluciones. Todas ellas han sido transformadas al mismo tamaño para su visualización:

De izquierda a derecha y de arriba a abajo. Muestreo a 256 x 256, 128 x 128, 64 x 64 y 32 x 32 píxeles



Cuantificación

El efecto de la cuantificación viene dado por la imposibilidad de tener un rango infinito de valores de medida para la intensidad de brillo de los píxeles.



Efecto de la cuantificación: De izquierda a derecha, 8 bits, 1 bits y 4 bits.

Muestreo y cuantificación

- **Muestreo y cuantificación no uniforme**
 - un esquema **adaptativo** donde el proceso de muestreo depende de las características de la imagen.
 - En general se requiere un muestreo más preciso en las cercanías las transiciones más bruscas de niveles de gris que en las regiones más suaves donde se puede aplicar un muestreo más burdo.
 - El aplicar este método supone un estudio previo de las características de la imagen.
- **Aliasing espacial**
 - Para que una frecuencia de muestreo sea correcta, esta ha de ser, al menos, el doble de la frecuencia espacial de la imagen que se está muestreando. Si no se respeta se produce lo que se conoce como **Aliasing**, apareciendo artificios y visualizándose frecuencias que no existían en la imagen original



Bibliografía en Web

- **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing** by Steven W. Smith
California Technical Publishing ISBN 0-9660176-3-3 (1997)
<http://www.dspguide.com/>
- <http://www.bores.com/>



Procesadores digitales de Señal

- Estructura típica de un sistema DSP
- Características y ventajas de los DSPs
- Arquitecturas/tipos de DSPs
- Aplicaciones de los DSPs

Procesamiento Digital de Señal



- La entrada es una señal analógica
- Se convierte la señal analógica a digital
- Procesar matemáticamente la representación de la señal
- Volver a convertir de digital a analógica
- Dar como salida una señal analógica

• Procesamiento en tiempo Real de la representación
Matemática de la señal

Procesamiento Digital de Señal



- ¿Por qué usar procesamiento digital de señales?

Parámetro o característica	Procesamiento analógico de señales	Procesamiento digital de señales
Precisión obtenible	1% al 10%	$2^{(-16)} \dots 2^{(-24)}$
Efectos espúreos	Temperatura, humedad, envejecimiento, ruido	Redondeo o truncamiento
Costo y tamaño	elevado	bajo / mediano
Confiabilidad	media	elevada
Relación señal/ruido	50 a 60 dB	100 o más dB
Calibración	Manual	No necesaria o digital
Adaptabilidad	Compleja	Simple
Señales 2D o 3D	No procesables	Procesables
Actualización	Cambios de hardware	Software
Consumo de potencia	Elevado	Bajo

Estructura de un sistema DSP: Filtro IIR



Sistema muy utilizado, permite por ejemplo aislar las señales con una características de frecuencia específicas

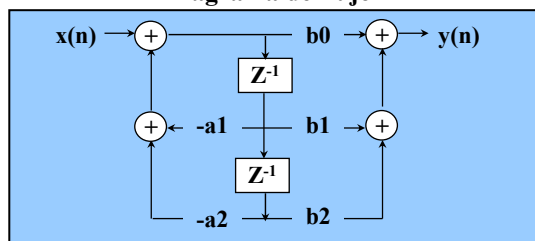
Función de transferencia

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}{1 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}}$$

Ecuación en diferencias

$$y(n) = -\sum_{k=1}^N a(k) \cdot y(n-k) + \sum_{k=0}^M b(k) \cdot x(n-k)$$

Diagrama de flujo



¿Por qué es necesario un procesador de propósito específico?



- Estas operaciones requieren muchos cálculos de la forma:
 $A = B \cdot C + D$
- Esta ecuación simple involucra una multiplicación y una operación de suma
- La instrucción de multiplicación de un procesador de propósito general es muy lenta en comparación con la instrucción de suma
 - El microprocesador Motorola 68000 necesita
 - 10 ciclos de reloj para una suma
 - 74 ciclos de reloj para una multiplicación

¿Qué es un DSP?

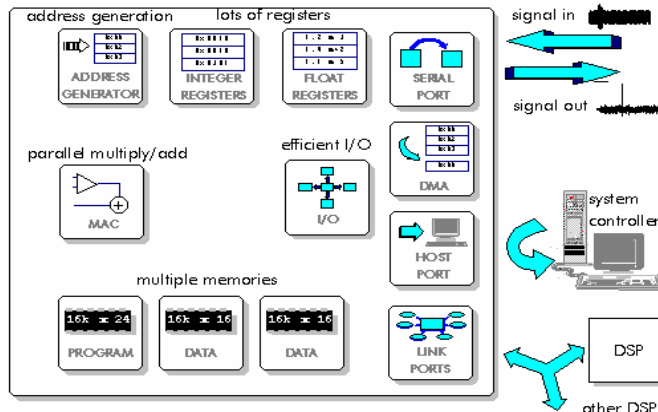


- Es un microprocesador con un juego de instrucciones dedicado al procesamiento digital de señal:
 - Mayor paralelismo
 - Juego de instrucciones orientado a MAC
 - $y = a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + \dots$
- Filosofía microcontrolador: CPU + memoria interna + periféricos
- Es raro que tengan conversores A/D o D/A

Procesadores DSP



- DSP típico



© BORES Signal Processing

DSP vs microprocesador genérico



¿En qué difiere un DSP de una CPU tradicional?

- **por sus aplicaciones de software:**
- aplicaciones cíclicas, de duración acotada, donde se requiere altísima eficiencia de ejecución
- uso de Assembler y dialectos especiales del lenguaje C para optimizar el código
- algoritmos usuales:
 - filtrado
 - convolución (interacción de dos señales)
 - correlación (comparación entre señales)

DSP vs microprocesador genérico



¿En qué difiere un DSP de una CPU tradicional?

- **por sus recursos de hardware:**
 - disponibilidad de modos de direccionamiento especializados
(Ej: bit-reversal, colas circulares)
 - varias unidades de procesamiento operando en forma concurrente
(MAC, Barrel Shift,...)
 - operaciones aritméticas especiales: algunos DSPs con unidades FP.
 - esquema de Timing e Interrupciones mucho más orientado a acciones en tiempo real
 - pocos o nulos recursos que generan latencias, como memoria virtual, caches, etc.

DSP vs microprocesador genérico



¿En qué difiere un DSP de una CPU tradicional?

- **por sus recursos de hardware:**
 - Arquitecturas tipo HARVARD con mapas de datos e instrucciones separados
 - Dos o más mapas de memoria de datos que permiten leer concurrentemente operandos y coeficientes
 - Manejo especializado de punteros de direcciones a través de unidades de cálculo dedicadas
 - Opciones para la digitalización y captura de señales con intervalos regulares (DMA)
 - Recursos internos o dispositivos periféricos especializados para la conversión A/D y D/A de señales, así como para el filtrado anti-alias y la reconstrucción

DSP vs microprocesador genérico



¿En qué difiere un DSP de una CPU tradicional?

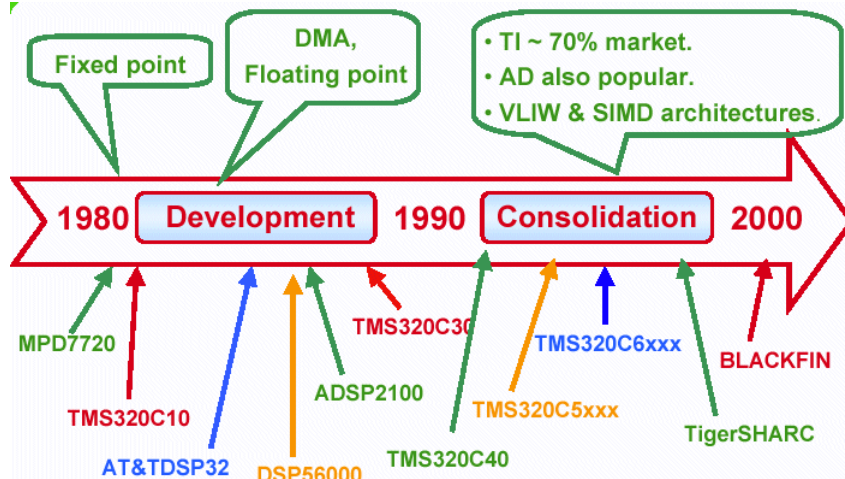
- **por sus recursos de hardware:**

- Elevada capacidad de procesamiento aritmético de datos en tiempo real, con elevada precisión, para evitar problemas de redondeo y truncamiento
- Etapas Multiplicadora/Acumuladora (**MAC**) apta para resolver ecuaciones del tipo $A = A + (B \times C)$ en un único ciclo
- Circuitos BS (**Barrel Shifter**) para desplazar un dato varios bits a derecha/izquierda en un único ciclo de instrucción
- Una **ALU** operando en forma independiente al MAC y al BS
- Códigos de operación para controlar MAC, ALU y BS en una única instrucción (varias operaciones concurrentes)

Procesadores DSP



- **Evolución de los procesadores DSP**



Procesadores DSP



- **Tipos**

Multiprocesadores DSP en un chip

- TMS320C80
- TMS320C6000

Procesadores 32Bit- Floating Point

- TI TMS320C4x
- Motorola 96000
- AT&T DSP32C
- Analog Devices ADSP21000

Procesadores 16Bit- Fixed Point

- TI TMS320C2x
- Motorola 56000
- AT&T DSP16
- Analog Devices ADSP2100

Consideraciones para optimizar un DSP



#1: La CPU se diseña considerando la aplicación DSP.

Un entorno que permite la ejecución eficiente de operaciones de un proceso DSP, tal como realizar MAC en un ciclo.

#2: Buses múltiples para un flujo eficiente de instrucciones y de datos

Sistema de gestión de datos que permite un procesamiento eficiente de vectores y streams de datos en tiempo real. (Arquitectura Harvard)

#3: Conjunto de instrucciones muy específico para conseguir gran potencia de cálculo en DSP. (Highly-tuned instruction set)

Instrucciones sofisticadas que se pueden ejecutar en muy pocos ciclos, con menos código y menor consumo de potencia.

Características de los Procesadores DSP



– Muchos registros

- Permiten guardar datos temporalmente
- Registros enteros y de punto flotante

– Generador eficiente de direcciones

- Poseen registros de direcciones
- Usualmente se genera en operaciones de “fetch” o “store”
- Operaciones típicas
 - *rP
 - *rP++
 - *rP--
 - *rP++I (registro indirecto)
 - *rP++Ireverse (util para algoritmo FFT)

- Buffers Circulares

Procesadores DSP



– Arquitectura Harvard

- Un bus instrucciones, otro para datos
- Usualmente permiten usar ambos para operandos
- Normalmente memoria cache para instrucciones
- Requiere gran cantidad de pines



Procesadores DSP



- Formato de datos

- Enteros

0	1	0	1	0	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

$$= 2^6 + 2^4 + 2^1 + 2^0 = 83$$

-2^7 2^6 2^5 2^4 2^3 2^2 2^1 2^0

- Coma fija: el punto decimal está prefijado (números <1)

0	1	0	1	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

$$= 2^{-1} + 2^{-3} = 0.5 + 0.125 = 0.625$$

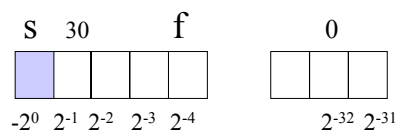
-2^0 2^{-1} 2^{-2} 2^{-3} 2^{-4} 2^{-5} 2^{-6} 2^{-7}

Procesadores DSP



- Coma fija con 32 bit (Q31):

- Formato $x = (-1)^s + 0.f$



$$m_{31}x(-2)^0 + m_{30}x2^{-1} + m_{29}x2^{-2} + \dots + m_1x2^{-30} + m_0x2^{-31}$$

- Ejemplo Q3 (4bit)

$(-2)^0$	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}		
0	0	0	1	$= 0+0+0+0.125 = 0.125$	menor positivo
...					
0	1	1	0	$= 0+0.5+0.25+0 = 0.75$	
...					
0	1	1	1	$= 0+0.5+0.25+0.125 = 0.875$	mayor positivo
1	0	0	0	$= -1$	mayor negativo
...					
1	1	0	1	$= -1+0.5+0+0.125 = -0.375$	
...					
1	1	1	1	$= -1+0.5+0.25+0.125 = -0.125$	menor negativo

Procesadores DSP

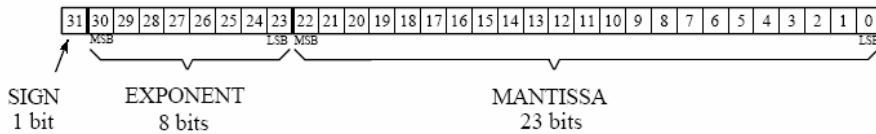


Punto flotante

- Escalado automático de números
- Un número muy grande es automáticamente escalado hacia abajo.
- Un número pequeño es automáticamente escalado hacia arriba.

$$v = (-1)^S \times M \times 2^{E-127}$$

Formato 32 bit ANSI/IEEE 754-1985
precisión simple



ingeniería informática

Francisco.Gomez@ii.uam.es

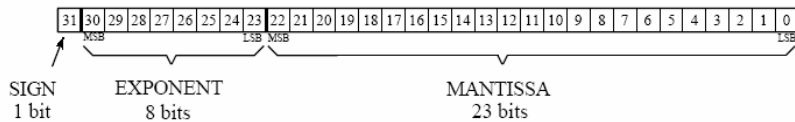


Procesadores DSP



Punto flotante

$$v = (-1)^S \times M \times 2^{E-127}$$



Ejemplo1

0 00000111 110000000000000000000000
 ↓ ↓ ↓
 + 7 0.75

$$+ 1.75 \times 2^{(7-127)} = + 1.316554 \times 10^{-36}$$

Ejemplo2

1 10000001 011000000000000000000000
 ↓ ↓ ↓
 - 129 0.375

$$- 1.375 \times 2^{(129-127)} = - 5.500000$$

ingeniería informática

Francisco.Gomez@ii.uam.es



Criterio de selección de un DSP



- **Formato Aritmético**
 - Punto fijo vs coma flotante
 - Ancho de palabra
- **Rendimiento**
 - Bajo: ~ 25 a 50 MHz, bajo consumo y coste.
 - Medio: ~150 MHz, multiproceso
 - Alto: Arquitectura mejorada, VLIW o SIMD
- **Otros**
 - Interfaces externos
 - Multiproceso
 - Consumo de potencia
 - Coste

PARAMETROS

- **Rango dinámico**

$$\text{Rango Dinámico} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\text{valor máximo}}{\text{valor mínimo}} \right)$$

Mayor Rango dinámico supone la representación de un conjunto mayor de datos sin overflow

- **Diferentes aplicaciones tienen diferentes necesidades**
 - **Telecom : 50 dB**
 - **High Fidelity : 90 dB**
- **Precisión**

$$\text{Max Precisión}_{\text{bits}} = \log_2 \left(\frac{\text{valor máximo}}{\text{max. error de cuantización}} \right)$$

Procesadores DSP



- **Punto flotante**

$$v = (-1)^S \times M \times 2^{E-127}$$

$$M = 1.m_{22}m_{21}m_{20}m_{19} \dots m_2m_1m_0$$

- Mayor número = $\pm (2-2^{23}) \times 2^{128} = \pm 6.8 \times 10^{38}$
- Valor menor (incremento) = $\pm (1.0) \times 2^{-127} = \pm 5.9 \times 10^{-39}$

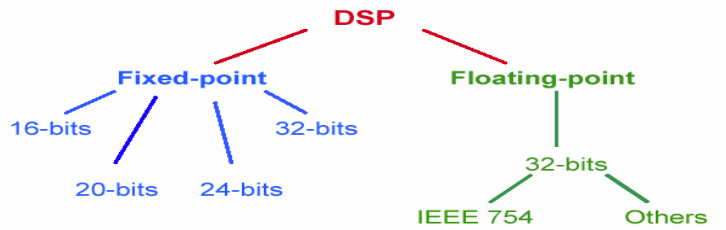
A los que hay que quitar los patrones que el estándar reserva para definir ± 0 , $\pm \infty$, NaN

$$\text{Valor absoluto máximo} = (2-2^{23}) \times 2^{127} = 3.4 \times 10^{38}$$

$$\text{Valor absoluto mínimo} = 1.0 \times 2^{-126} = 1.2 \times 10^{-38}$$

$$\text{Rango Dinámico} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\text{valor máximo}}{\text{valor mínimo}} \right) = 1529 \text{ dB.}$$

Selección de un DSP



- Hardware mas sencillo
 - Menos silicio
- Menor coste
- Mayor velocidad de CPU
- Menor consumo de potencia
- Mayor Rango dinámico
 - Arquitectura de la CPU
 - Periféricos
- Menor esfuerzo en la codificación
 - No es necesario un escalado
- Mayor precisión
 - Aunque depende del tamaño de la palabra.

Procesadores DSP



Precisión en punto flotante
Ejemplos de espaciado entre números en coma flotante de simple precisión.

El espaciado esta entre una 1 parte en 8 millones y 1 parte en 17 millones del valor del número

0.00001233862713	spacing = 0.000000000000091
0.00001233862804	(1 part in 13 million)
0.00001233862895	
0.00001233862986	
⋮	
1.000000000	spacing = 0.000000119
1.000000119	(1 part in 8 million)
1.000000238	
1.000000358	
⋮	
1.996093750	spacing = 0.000000119
1.996093869	(1 part in 17 million)
1.996093988	
1.996094108	
⋮	
636.0312500	spacing = 0.0000610
636.0313110	(1 part in 10 million)
636.0313720	
636.0314331	
⋮	
217063424.0	spacing = 16.0
217063440.0	(1 part in 14 million)
217063456.0	
217063472.0	

Procesadores DSP

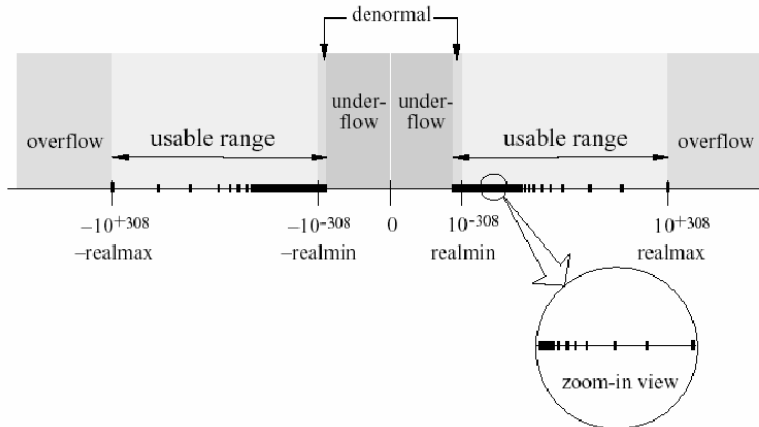


Punto flotante de doble precisión (64 bits)

Signo 1 bit

Exponente 11 bit

Mantisa 52 bit

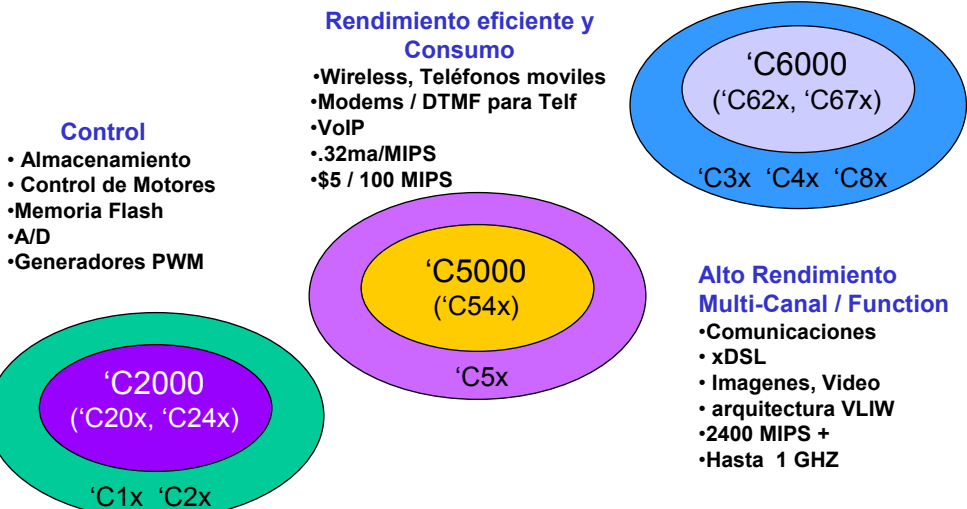


ingeniería informática

Francisco.Gomez@ii.uam.es



DSP de Texas Instruments



ingeniería informática

Francisco.Gomez@ii.uam.es



Aplicaciones



- **Filtrado y compresión de audio y video, cancelación de ruido:**
 - ecualización y tratamiento a lineal para mejorar la relación señal/ruido o el uso del ancho de banda (Ej: ADPCM, MPEG2, MP3, FAX)
- **modems:**
 - métodos de modulación y demodulación digital de datos sobre un canal de ancho de banda y ruido propio dado. P.Ej:(ASK, FSK, PSK, DPSK, QAM, TCM)
- **señalización:**
 - envío y detección de información de control sobre un canal de voz o datos (P.Ej: DTMF, R2, CallerID)
- **cancelación de eco:**
 - para compensar ecos en sistemas de elevado tiempo de propagación (Ej: VOIP: Voice Over IP) o con elevado tono local (telefonía de manos libres)
- **cifrado:**
 - para comunicaciones seguras
- **detección y corrección de errores:**
 - agregado de datos a la información transmitida para detectar y corregir eventuales errores de recepción

Aplicaciones



- **telefonía celular:**
 - manejo dinámico de frecuencias y potencias en estaciones base
- **Multiplexores T1 y Switches PBX:**
 - T1 para uso combinado de datos y voz
 - PBX para centrales telefónicas digitales
- **Síntesis digital directa:**
 - para estaciones de broadcast totalmente digitales
- **Tratamiento de señales de RF:**
 - telefonía celular, modulación y demodulación digital, spread-spectrum.
- **Medicina:**
 - tomografía, MNR, ecografía, scanners,
 - electrocardiograma, electroencefalograma, diagnóstico asistido
- **Visión artificial y OCR: Optical Character Recognition**
- **telemetría:**
 - monitoreo satelital de recursos, prospección petrolera/minera/submarina
- **Sonar y Radar:**
 - radares de apertura sintética, arrays de antenas, detección de blancos móviles, detección doppler, navegación, oceanografía
- **Instrumental:**
 - analizadores de red, de espectro, etc....

Aplicaciones



- **Control de motores:**
 - robótica, sistemas de transporte, sistemas de impresión, control de cabezales en sistemas de almacenamiento masivo de datos (discos rígidos, DVD, etc.)
- **Control de procesos:**
 - controladores PID, control adaptativo
- **Análisis de vibraciones:**
 - detección preventiva de fallas por análisis del espectro de vibraciones
- **Sistemas de navegación:**
 - GPS, piloto automático, sistemas de guía de misiles, etc
- **Telefonía:**
 - Caller ID, generación DTMF, detección de DTMF, Call Progress y Pulsos de tarificación (16kHz)
- **Automotriz:**
 - AirBags, control de combustión, inyección y emisiones, ABS, etc..
- **Electrodomésticos inteligentes, domótica y sistemas de seguridad**
 - heladeras, lavarropas, aire acondicionado
 - audio hogareño semi-profesional: sistemas surround
 - Equipos de música: organos, sintetizadores
 - radio digital y televisión: Set-Top boxes

Procesadores digitales de Señal



Bibliografía en Web

- Hong Kong City U Image Processing Lab's Introduction to DSP: www.ee.cityu.edu.hk/~lmpo/ee32211/notes/dsp/dsp.html
- BORES On-Line Introduction to DSP: www.bores.com/courses/intro/
- Texas Instruments: www.ti.com
- OGI ECE544: <http://www.ece.ogi.edu/~macon/ECE544/>
- Berkeley's EECS 20: <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~mayi/imgproc/>