

Diseño Moderno de Circuitos Digitales Usando DSP'S

M. en C. Osvaldo Espinosa Sosa
M. en C. Romeo Urbieta Parrazales
Ing. Marco Antonio Ramírez Salinas
 Profesores del CIC-IPN

Los seres humanos interactuamos con el mundo real en base a señales analógicas, las cuales pueden ser presión, intensidad luminosa, calor, sonidos etc. Dichas señales son variables continuas en el tiempo. Cada uno de nuestros sentidos es sensible a diferentes tipos de señales analógicas. Nuestros oídos son sensibles al sonido, nuestros ojos a la luz etc., una vez que recibimos una señal, nuestros órganos sensoriales se encargan de convertirla en una señal eléctrica y la mandan al cerebro, nuestra gran computadora analógica. El cerebro es una computadora sumamente poderosa cuya capacidad no es posible alcanzar con ninguna de las computadoras digitales actuales, ya que no solo analiza la información recibida, sino que también es capaz de tomar decisiones usando esos datos.

Desafortunadamente las computadoras trabajan con señales digitales, y no analógicas, es por eso que para poder aprovechar la capacidad y versatilidad que nos ofrecen, debemos hacer lo siguiente:

1. Convertir las señales analógicas en señales eléctricas, utilizando un transductor (como un micrófono).
2. Digitalizar esas señales, es decir convertirlas de su forma análoga a

digital por medio de un dispositivo llamado ADC (Convertidor Analógico – Digital).

Una vez que la señal se ha convertido a su forma digital, la computadora puede procesarla. Dado que el sistema procesa señales digitales, este es llamado Procesador Digital de Señales (DSP), y este hecho marca una diferencia respecto a otros microprocesadores y microcontroladores de propósito general. Una vez que el DSP ha procesado a la señal, se debe volver a su forma original (analógica) para que podamos percibir el efecto. Este último proceso lo realiza un Convertidor Digital – Analógico (DAC). Un altavoz, por ejemplo, puede reproducir señales audibles en base a las señales eléctricas que nos entrega un DAC. Para procesar una señal en forma digital debemos convertirla al menos dos veces (en este esquema general de procesamiento).

¿DE QUÉ CONSTA UN SISTEMA TÍPICO DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES?

Básicamente consta de un chip al que denominamos DSP, elementos de memoria, posiblemente un convertidor digital – analógico (DAC), uno analógico – digital (ADC) y canales de comunicación con el mundo externo (puertos). No todos los sistemas de procesamiento de señales deben tener la misma arquitectura o

el mismo número de componentes, esa selección depende de la aplicación. Por ejemplo un sistema de audio puede requerir convertidores ADC's y DAC's mientras que uno para procesar imágenes no.

El DSP es un chip que contiene diferentes elementos de hardware, algunos de los elementos más importantes se mencionan a continuación:

Unidad central

aritmético – lógica. Esta es la parte del DSP que ejecuta la mayor parte de las operaciones o instrucciones como pueden ser sumas o multiplicaciones. De hecho es la parte que hace más rápidos a los DSP's en comparación con otros procesadores de propósito general.

Unidad aritmética auxiliar. Los DSP's tienen frecuentemente una unidad aritmética auxiliar, que se utiliza para realizar cálculos matemáticos y operaciones lógicas en el caso de estar ocupada la unidad central.

Puertos. Los DSP's normalmente tienen puertos de comunicación seriales y paralelos para comunicación rápida con otros procesadores y/o convertidores.

Memoria. La memoria retiene información e instrucciones para los DSP's. Los DSP's leen y/o escriben información en ella, es muy

frecuente que se encuentren bancos de ésta en el interior del chip ya que suele ser más rápida que la memoria externa.

Convertidores. Estos dispositivos proveen la función de transformación para el DSP, ya que solo trabajan con señales digitales, requieren elementos para transformar una señal analógica en digital y viceversa.

LOS PRODUCTOS Y LAS SUMAS

Hasta este punto nos podríamos preguntar: ¿porqué necesitamos un DSP?, ¿porqué no utilizar un procesador de propósito general para el tipo de tareas que estamos tratando?. La respuesta se basa en la naturaleza de las operaciones más comunes en la labor del procesamiento de señales: los productos y las sumas. Las sumas y las restas, son realizadas en pocos ciclos de reloj en la mayoría de los procesadores, pero la multiplicación y la división son mucho más complejas operaciones. Una operación de multiplicación consiste de una serie de sumas y desplazamientos. Los microprocesadores de propósito general son muy lentos para ejecutar operaciones de multiplicación y división, en donde a través de microcódigo se implementan una serie de sumas, restas y desplazamientos para una simple multiplicación. Como ejemplo, el 68000 (un microprocesador de Motorola) requiere 10 ciclos de reloj para sumar, y alrededor de 74 para multiplicar. Por la naturaleza del procesamiento digital de señales requerimos realizar múltiples cálculos de la forma:

$$A = B * C + D * E$$

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n-k]$$

Convolución

$$X[\Omega] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\Omega n}$$

Transformada de Fourier

Es obvio que necesitamos un hardware especializado en ejecutar sumas y multiplicaciones en un solo ciclo de reloj para el procesamiento de señales. Es por esto que la mayoría de los DSP's tienen instrucciones específicas para multiplicar, sumar y almacenar resultados en un solo ciclo. Este tipo de instrucciones son llamadas con frecuencia MAC.

Hemos enfatizado que necesitamos software especializado para desempeñar la suma y el producto en el menor tiempo posible, pero ¿cómo es posible obtener una operación de multiplicación lo más rápida posible?, sin un multiplicador lo suficientemente rápido el procesamiento de señales sería un sueño. El problema de diseñar multiplicadores rápidos empezó en los inicios de los años 70's cuando en 1971 Lincoln Laboratories diseño un multiplicador usando 10,000 circuitos integrados realizando la multiplicación en tan solo 600ns. A mitades de los años 70's la multiplicación se podía realizar en tan solo 200ns. Este hecho hizo posible diseñar procesadores de aceptable desempeño, aunque grandes y caros, pero que demostraron la viabilidad de la multiplicación rápida. A principios de los años 80's, DSP's en un solo chip aparecieron con un razonable desempeño y a medida que han transcurrido los años, el tiempo necesario para realizar una multiplicación ha disminuido mucho. En la actualidad existen dispositivos para operar con enteros que pueden multiplicar en tiempos tan cortos como menores a 5ns, dados los orígenes de esta tecnología el mejoramiento alcanzado ha sido notable. Ahora veamos más de cerca la arquitectura de los procesadores para ver como se ha afectado el diseño de los DSP's.

Los procesadores necesitan instrucciones para operar, a cada ciclo de reloj debe indicárseles lo que deben hacer, si tenemos el conjunto de instrucciones almacenadas de alguna forma, esto es más sencillo, ya que solo debe buscar y ejecutar instrucciones. De esta forma hablamos de máquinas con programa almacenado, las cuales buscan instrucciones, después datos y al ejecutar la instrucción devuelven datos para almacenar. Existen dos tipos de arquitecturas bien conocidas, la Von Neuman y la Harvard.

Las máquinas von Neuman almacenan tanto programas como datos en una misma área de memoria. En este tipo de máquinas la instrucción contiene la operación a realizar así como la dirección del dato necesario para la operación. Esto hace necesario leer primero la instrucción y posteriormente el dato. En una arquitectura Harvard la única diferencia existente es el hecho de tener programa y datos en dos memorias separadas, y que se accesan por dos vías distintas, esto permite que instrucciones y datos puedan ser cargados en forma simultánea.

La arquitectura von Neuman se utiliza en sistemas computadores de propósito general, así como la arquitectura Harvard es más común en procesadores especializados, procesamiento en tiempo real o bien aplicaciones dedicadas. La mayoría de los DSP's tienen arquitectura Harvard ya que muchas aplicaciones requieren máquinas rápidas para procesamiento en tiempo real. Por lo tanto internamente existen en los chips rutas o buses para datos y para programa en forma separada, aunque por cuestiones de economía de los circuitos, para accesos a espacios externos se tiene un solo bus multiplexado para el doble propósito. El esquema anterior se denomina "Harvard modificado". Un ejemplo de pro-

cesador que utiliza esta arquitectura es el TMS320C50 de Texas Instruments. Este chip aprovecha las características anteriores para realizar dos trabajos en forma simultánea: la búsqueda de instrucciones y datos sin interrupción uno del otro, lo cual provee un alto desempeño a bajo costo. Con lo anterior queremos decir que existe en esta arquitectura un alto grado de paralelismo.

SISTEMAS DE DESARROLLO CON DSP'S

Un DSP es un circuito integrado que no puede funcionar sin la "inteligencia" de un programa, que no es mas que un conjunto de instrucciones para realizar ciertas tareas, y para lograr lo anterior hacemos uso de algunas herramientas como son:

Ensambladores. Son programas que generan código a nivel del microprocesador usando instrucciones a nivel texto. Debido a que nosotros entendemos mejor palabras escritas que series de unos y ceros, utilizamos los ensambladores para convertir instrucciones en texto a lenguaje de máquina. Esto evita la necesidad de aprender largas y tediosas series de números binarios.

"ADD A,B" ————>
 "111000100101010001001"

Lenguajes de alto nivel. Son similares a los ensambladores pero mucho mas amigables. Los ensambladores constan de instrucciones en verdad muy básicas, como sumar, multiplicar o bien comparar. Los lenguajes de alto nivel tienen instrucciones mas complejas como imprimir o implementar bucles de repetición, por lo que es mas fácil escribir programas en lenguajes de alto nivel. Aunque los lenguajes de alto nivel permiten escribir programas en forma más fácil, los

ensambladores generan código que se ejecuta más rápido, por eso los dos son muy usados en los DSP's, Combinando las ventajas de ambos, podemos escribir el grueso de una aplicación en alto nivel, y las secciones críticas en cuanto a velocidad en ensamblador.

Simuladores. Estos programas son implementaciones del chip en software. Un simulador permite correr un programa, y simular casi toda la funcionalidad del procesador. Éstos son usados par analizar los diseños antes de implementar en hardware y son muy útiles para predecir cuando un diseño trabajará o no.

Emuladores. Un emulador es un circuito que trabaja justamente como un DSP, pero nos permite controlar y ver el resultado de la ejecución de instrucciones, siendo el modo normal de trabajo la ejecución paso a paso, lo que permite ver como se modifican los voltajes de los terminales del circuito involucrados en la ejecución de la instrucción corriente. Esta es una pieza invaluable en el desarrollo de sistemas.

El ciclo de desarrollo de una aplicación para DSP's comienza con la escritura de un programa para su posterior simulación. Si todo trabaja como es deseado se prueba el software en el hardware diseñado y se puede llegar a una primera versión del producto final. Cuando mejoras o adiciones son requeridas, se puede llegar a una versión posterior por el mismo procedimiento anterior.

¿PORQUÉ DIGITALMENTE?

Hasta este punto nos preguntáramos: ¿porqué es preferible convertir las señales de su forma analógica a digital?. Como vamos a discutir en la presente sección, el procesamiento

digital de señales ofrece claras ventajas que lo hacen ideal para cierto tipo de aplicaciones. Lo que es cierto es que la revolución digital ha cambiado y seguirá cambiando nuestras vidas. Para aplicaciones del procesamiento de señales las ventajas que se alcanzan en los resultados pueden ser:

Programabilidad. Como se puede ver, un mismo hardware puede realizar diversas tareas, por ejemplo un mismo sistema puede funcionar como un filtro, como un sintetizador de música, como control de motores, etc. La función depende del conjunto de programas que alimenten al sistema, y este hecho le confiere gran flexibilidad.

Escalabilidad. Una vez diseñado el sistema, si al encontrarse funcionando queremos modificarlo o bien agregar nuevas funciones, solo requerimos modificar el programa que alimenta a dicho sistema. Esto es deseable cuando los sistemas cambian a un nuevo ambiente o bien condiciones de trabajo. Con sistemas analógicos lo anterior requeriría el cambio de componentes o agregar nuevos elementos al diseño.

Flexibilidad. Una sola tarjeta con DSP puede desempeñar muchas funciones simplemente cargando los nuevos programas en ella.

Las ventajas presentadas anteriormente permiten reducir el tiempo de diseño y la complejidad del mismo. Con circuitos analógicos, un nuevo circuito debe ser diseñado para cada función.

Estabilidad y repetibilidad. Los componentes analógicos como resistencias, capacitores, diodos, amplificadores operacionales etc. Son afectados todos ellos por la temperatura. Su desempeño y características cambian con los cambios debidos a la temperatura. El desempeño de un

equipo no es el mismo en climas fríos que en el desierto, y para ciertas tareas esto puede ser catastrófico. Los circuitos digitales pueden operar en un amplio rango de temperaturas sin cambio aparente en su desempeño.

Envejecimiento. Como los componentes envejecen, sus características se modifican, esto afecta el desempeño y la operación de los circuitos analógicos, el fenómeno anterior hace que un circuito que hoy día funciona perfectamente, dentro de unos años no funcionará del todo.

Tolerancias. Los componentes como resistencias y capacitores tienen tolerancias, sus valores no son 100% precisos, es decir nos pueden vender un componente de cierto valor con 10% de variación. Dos circuitos analógicos que tienen un mismo diseño operaran en forma algo distinta. Este puede ser un problema grande, pues los fabricantes de equipo pueden enfrentarse con que varios de sus equipos fabricados no funcionen adecuadamente debido a este problema.

Repetibilidad. El desempeño de un circuito digital no cambia de una unidad a otra. Ya que el procesamiento de la información es en forma numérica, una multiplicación genera el mismo valor en cualquier procesador. El alimentar dos voltajes a la entrada de diversos circuitos analógicos producirá siempre distintos resultados. La tolerancia de los componentes no afecta el desempeño de los circuitos digitales, siempre producen el mismo resultado. Como los factores físicos no afectan el desempeño de los circuitos digitales, estos trabajarán igual en Asia o en Sudamérica. El nivel de precisión será determinado por el número de bits usado, y siempre será el mismo. Con circuitos analógicos la precisión de los resultados puede variar ampliamente de un cir-

cuito a otro. Después de todo, un reproductor de CD tiene la misma calidad de reproducción y solo es afectada por la mínima circuitería analógica que lo compone.

Funciones especiales. Algunas funciones especiales solo pueden implementarse digitalmente, ya que los circuitos analógicos no pueden hacerlo, o lo hacen ineficientemente. Un ejemplo de lo anterior es la compresión de la información. Los canales de comunicación son realmente caros, existe una sustancial diferencia en costo en una llamada de telefónica de dos minutos a una de 20 minutos entre la misma fuente y destino. El almacenamiento de la información también puede ser caro, por lo que debemos tener cuidado en la forma de almacenarla. La compresión sin pérdida es una respuesta a los dos problemas anteriores. Una cierta cantidad de información puede ser comprimida a la mitad de su tamaño original, por lo tanto solo ocupa la mitad del espacio que requeriría en un disco en su versión original, y segundo tardaríamos solo la mitad de tiempo para transmitirla en un canal de comunicación. Este tipo de "magia" es imposible en circuitos analógicos. Otro ejemplo es la realización de filtros de ranura, un caso especial de rechaza banda con una selectividad muy estrecha. Este tipo de filtros puede implementarse fácilmente en forma digital, ya que en forma analógica es prácticamente imposible producir resultados similares. Este tipo de filtros se usan a menudo para la cancelación de ruido debido a maquinaria u otra fuente de ruido. Además, la obtención de filtros de fase lineal (con mínima distorsión) es más sencillo en forma digital.

APLICACIONES PRÁCTICAS UTILIZANDO PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

Desde su introducción en el mercado, los DSP's han encontrado una amplia variedad de aplicaciones, ya que generalmente la tecnología de los DSP's no es cara actualmente.

Equipos musicales de alta fidelidad. Como hemos mencionado anteriormente el procesamiento de señales juega un papel importante en equipos de alta fidelidad, por ejemplo en sistema reproductor de CD, o bien en ecualizadores gráficos digitales, o el manejo de sistemas sonoros de muy alta calidad. El precio actual de estos equipos muestra que esta tecnología no es cara.

Juguetes. Los niños de hoy pueden jugar con muñecos parlantes, o bien al apretar un botón se reproduce el sonido una herramienta, o un animal, y por si fuera poco existen ya juguetes que utilizan el reconocimiento de voz.

Modems. Los modems cada vez son más eficientes y rápidos en su operación y su uso se ha ido extendiendo poco a poco. Los DSP's juegan un papel importante en las funciones de estos equipos ya que permiten la cancelación de ecos, o bien la compresión y descompresión de la información.

Sistemas telefónicos. La telefonía celular utiliza a los DSP's para codificar y decodificar la información, asimismo es muy frecuente encontrar máquinas contestadoras que nos indican: "para ventas presione 1", "para soporte técnico presione 2", etc. Este trabajo lo hacen los DSP's.

Procesamiento de imágenes. Los DSP's son usados ampliamente en procesamiento de imágenes, como

en simuladores tridimensionales para aumentar el realismo, estas aplicaciones pueden incluir visión para robots, compresión de la información, cálculo de detalles tridimensionales, inspección de imágenes, reconocimiento de huellas dactilares, etc.

Además de las anteriores, existen otros campos de aplicación, como en la medicina, la industria, la instrumentación etc. Como se muestra en la **tabla 1**.

LAS FAMILIAS ACTUALES DE DSP'S

Existen en la actualidad dos clasificaciones para los DSP's: de punto fijo (enteros) y de punto flotante. El rango de cantidades que se pueden expresar es muy variado. Mientras que en uno de punto fijo se pueden representar típicamente valores entre:

$\pm 2^{15} (\pm 32768)$ y $\pm 2^{-15} (\pm 0.000031)$,
 en uno de punto flotante se tienen rangos más amplios:

$\pm 2^{128}$ y $\pm 2^{-128}$

Esta diferencia es considerable, y es importante en el momento de elegir un dispositivo para una aplicación en particular. Por ejemplo, un sistema profesional de sonido empleará dispositivos de punto flotante mientras que un juguete utilizara uno de punto fijo.

El ancho del bus de datos en un procesador de punto fijo es típicamente de 16 y 24 bits, casi todos tienen arquitectura Harvard modificada, y son ampliamente usados en juguetes, discos duros, modems o bien el sistema de suspensión activa de un auto.

En los procesadores de punto flotante el ancho del bus de datos es de 32 bits típicamente, dadas las características de éstos, tienen un rango dinámico más amplio. Es precisamente esta mayor precisión la que los hace ideales para aplicaciones en sistemas de alta fidelidad, sistemas de correo de voz, procesamiento de imágenes tridimensionales etc.

Cada vez salen al mercado procesadores más potentes que aprovechan las características de la tecnología actual, esto permite incorporar varios DSP's trabajando en paralelo en el interior de un solo chip, o procesadores que trabajan a frecuencias superiores a los 200Mhz. La exigencia de las tecnologías y las aplicaciones actuales implican el conocimiento y uso intensivo de los DSP's como elemento de trabajo.

TELECOMUNICACIONES

Modem	Repetidores de línea	Encriptación de datos	Telefonía celular
Modem multicanal	Digital PABx	Cancelación de ecos	Estaciones Base
DTAD	Redes Digital	Ecuilibradores adaptivos	Paginadores
Telefonía	Telefonía por pago	Correo de voz	

CONSUMIDORES / COMPUTADORAS

TV digital	Tarjetas mezcladoras	Dictado	Discos duros
Cámara digital	Cajas de efectos	Multimedia	Máquinas de lavado
Copiadoras a color	Sintetizadores	Remotas terminal	Refrigeración
Videofono	Tarjetas de sonido PC	Fax	Impresoras
Scanners	Ecuilibradores HIFI	Juguetes	
DVD	GPS		

INDUSTRIAL

Control de Motor	Robótica	Seguridad (acceso)	Electricidad (medición)
Bombas para agua	Visión para Robots	Seguridad alarmas	Instrumentación
HVAC	Servo control	Lectores de barras	

AUTOMOTRIZ

Encendido Electrónico	Control antiderrapante	Audio Digital	Bolsa de aire
Culch Eléctrico	Control de máquinas.	Telefonía celular	GPS/Navegación
Frenos	Control adaptivo de ruta	Asientos y espejos eléctricos	Elevadores de ventanillas
Cancelación Activa	Ayuda de parqueo etc.		

Tabla 1. Campos de aplicación

CONCLUSIÓN

El uso de las nuevas tecnologías digitales permite contar con circuitería cada vez más confiable, económica y con un alto grado de eficiencia, es evidente que nuestro mundo se vuelve cada vez más digital, y por lo tanto cada vez más aplicaciones de la vida moderna se dirigen hacia esa tendencia ya sea en el hogar, en la industria, en la medicina, en la oficina, en los centros de investigación etc. Es un hecho que los tres factores que contribuyen a lo anterior son:

1. La necesidad de un mejor aprovechamiento de los recursos. (Los canales de comunicación por ejemplo)
2. La necesidad de un equipo rápido, confiable, de alta calidad y de mayor precisión.
3. La necesidad de contar en un futuro con equipo que tenga la posibilidad de crecimiento y flexibilidad.

En nuestros días, debemos explotar adecuadamente los recursos y las facilidades que nos provee la tecnología moderna a fin de mejorar y no rezagarnos en un mundo de contante cambio y actualización.