

CURSO DE PROCESADO DIGITAL DE LA SEÑAL EN FPGAS BASADO EN UN PROYECTO

T. SANSALONI, A. PÉREZ-PASCUAL, V. TORRES Y J. VALLS

Departamento de Ingeniería Electrónica. Escuela Politécnica Superior de Gandía.

Universidad Politécnica de Valencia. España.

El artículo presenta el curso de doctorado “Tratamiento digital de la señal en FPGAs” basado en el desarrollo de una aplicación práctica: el diseño e implementación de un analizador de espectros. En este curso se tratan temas de procesamiento digital de la señal (FFT, CORDIC, filtros, síntesis de frecuencia,...) considerando su implementación hardware. Cada tema se corresponde con una clase en la que se resuelve una parte del proyecto. Los resultados obtenidos con esta metodología muestran que se alcanzan los objetivos del aprendizaje y que aumenta la motivación de los alumnos.

1. Introducción

Este es un curso del programa de doctorado de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia. Tiene como objetivo implementar eficientemente algoritmos de procesamiento digital de la señal (DSP) en dispositivos FPGA (Field-Programmable Gate Array). Para ello se centra en tres aspectos íntimamente relacionados: teoría de DSP, recursos de los dispositivos FPGA y arquitecturas para la implementación de algoritmos de DSP.

La teoría desarrolla los conceptos de muestreo, desplazamiento en frecuencia, diseño de filtros, enventanado, FFT, CORDIC y síntesis de frecuencia. Todos estos conocimientos se refuerzan con las prácticas, que permiten también, manejar las herramientas de simulación e implementación de circuitos en FPGAs (System Generator, Simulink, Matlab, ISE de Xilinx y Fuse). Los diseños se prueban en dispositivos Virtex-II y Virtex-IV de Xilinx disponibles en el sistema de desarrollo XtremeDSP.

La finalidad del curso se resume en un único propósito: implementar un analizador de espectros basado en FFT (AE) sobre FPGAs, desde el diseño del sistema, hasta su realización hardware. Este trabajo práctico se ajusta en gran medida a los contenidos del curso, dado que los bloques que constituyen el analizador coinciden con las necesidades de aprendizaje. Así pues, son estos bloques los que definen la organización del curso. Esta división en pequeñas partes, además de dar sentido al curso, permite desarrollar una aplicación real de bastante complejidad, esta meta, hace que los estudiantes se sientan mucho más motivados. Cada clase tiene su parte teórica y su parte práctica, juntas persiguen un objetivo común: “diseñar un AE y que éste funcione”.

No es posible medir la eficiencia de las implementaciones de los algoritmos cuando se utiliza como plataforma de desarrollo los DSPs. En este curso, a diferencia de lo que ocurre en la inmensa mayoría de cursos de procesamiento digital de la señal [1-8] es posible valorar los resultados de la implementación en función del tamaño de la ruta de datos elegida. Para ello, se ha optado por implementar los diseños en dispositivos programables FPGA, que son reprogramables y tienen un flujo de diseño e implementación más corto y sencillo que otras alternativas hardware.

2. El analizador de espectros y su relación con los contenidos del curso

El analizador de espectros es la aplicación que se ha elegido para presentar y consolidar los conceptos teóricos del curso; con él se cubren la mayoría de ellos. En la Figura 1 se muestra el diagrama de bloques de un analizador de espectros típico basado en FFT. En dicho diagrama puede verse el circuito mezclador, los filtros diezmodores mediabanda, el módulo de enventanado, la

transformada rápida de Fourier y las transformaciones matemáticas para obtener el módulo de valores complejos y el valor del logaritmo [9].

En el diseño se tiene una señal analógica de entrada entre -1 y 1V. Esta señal pasa por un filtro anti-aliasing en la placa XtremeDSP y se cuantifica con 14 bits. A partir de este momento, todo el procesamiento necesario para resolver la aplicación se va a realizar en la FPGA.

La primera etapa de procesamiento digital es el desplazamiento en frecuencia de las muestras de entrada. Consiste en trasladar a banda base la sección del espectro que interesa visualizar, con lo que se controla la frecuencia central de la visualización. Para mejorar la resolución del espectro se utiliza un banco de filtros mediabanda de diezmado por dos que permiten controlar el *zoom*.

La transformada rápida de Fourier (FFT) es corazón del sistema; su tamaño determina la resolución en frecuencia del espectro. Para visualizar el módulo del espectro, se utilizan módulos adicionales. Un módulo CORDIC en coordenadas circulares y modo vectorización transforma los datos complejos que se obtienen a la salida de la FFT en su valor de módulo y fase. Para realizar medidas en escala logarítmica se incluye además otro módulo CORDIC en coordenadas hiperbólicas y modo vectorización que transforma las unidades a dBV. Por último, la señal se convierte a analógica y se visualiza en un osciloscopio.

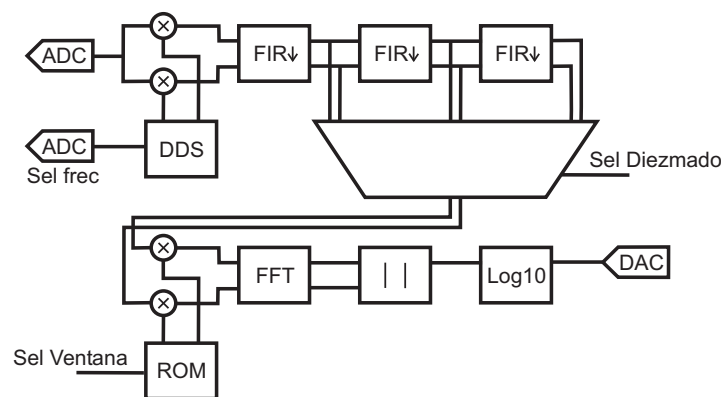


Figura 1. Diagrama de bloques del analizador de espectros.

Las especificaciones del instrumento se indican en la tabla 1. Los estudiantes deben diseñar los filtros, determinar el tamaño de la ruta de datos para mantener la precisión en todos los módulos y elegir las opciones de implementación que consigan mejor relación área/velocidad.

Tabla 1. Especificaciones del analizador de espectros.

FRECUENCIA Rango de frecuencias: DC a 30MHz Resolución en frecuencia mejor que 50kHz (sin zoom) <i>Span</i> de variación continua definido por el valor de la frecuencia del DDS Zoom: x2, x4
AMPLITUD Amplitud de la señal de entrada: $\pm 1V$ (cuantificada con 14 bits) Rango dinámico: 75 dB
GENERAL Frecuencia de reloj del sistema y del ADC: 65MHz Ventanas: Rectangular, Blackman-Harris, Hanning, Flattop Visualización del módulo (en escala lineal o logarítmica) y de la fase

3. Detalles del curso

Este es un curso de 4 créditos: con 2 créditos de teoría y 2 créditos de prácticas, que se desarrolla en sesiones de 4 horas durante 10 semanas. Cada clase se dedica a uno de los bloques del analizador.

La Tabla 2 muestra el programa de la asignatura y su desarrollo temporal. Los contenidos teóricos son típicos en los cursos de procesado [10]. Cada clase comienza con una presentación teórica de uno de los temas. Los contenidos teóricos se refuerzan con las prácticas, que se realizan tras la teoría, durante la misma sesión. En la tabla se han especificado los contenidos teóricos de cada clase y la aplicación práctica desarrollada en cada una de las semanas del curso.

Tabla 2. Organización del curso.

Semana	Teoría	Prácticas
1	Introducción al procesado digital de la señal en FPGAs.	
2	El analizador de espectros: diagrama de bloques y funciones básicas.	Modelado del AE ideal.
3	Representación de los datos. Aritmética en punto fijo. Recursos para DSPs en los dispositivos FPGA.	Diseño del bloque de enventanado.
4	Efectos de precisión finita. Circuitos aritméticos en FPGAs.	Diseño de multiplicadores por coeficientes constantes.
5	Filtros digitales: Filtros FIR. Filtros multitasa.	Diseño de filtros mediabanda diezmaadores por dos.
6	Filtros digitales: Filtros IIR.	Diseño de filtros mediabanda diezmaadores por dos (cont.)
7	Fast Fourier Transform.	Configuración del módulo FFT. Control de la señal <i>enable</i> .
8	Síntesis digital de frecuencia.	Diseño e implementación del mezclador.
9	Algoritmo CORDIC.	Configuración del CORDIC para conversión de coordenadas cartesianas a polares. Diseño del operador logaritmo.
10		Integración y verificación del sistema completo.

Además de estas horas presenciales, para llevar a cabo el proyecto, los alumnos deben realizar alrededor de 20 horas de trabajo personal, supervisado en gran medida por los profesores. Esta metodología requiere una importante dedicación del profesorado, que sólo es posible cuando el número de alumnos en el curso es reducido. Durante los años que se ha impartido este curso el número de alumnos matriculados se aproxima a los 10.

La información necesaria para seguir la asignatura se ha organizado en una página web accesible a los alumnos matriculados en el curso. De dicha dirección pueden descargarse las transparencias que el profesorado ha preparado para cada uno de los temas, los ejercicios propuestos y la documentación adicional que se ha considerado de interés.

En esta asignatura no se realizan exámenes y los alumnos son calificados según los resultados del proyecto. La experiencia revela que resultados del aprendizaje conseguidos con esta metodología son satisfactorios. El 100% de los alumnos entienden los conceptos de procesado de señal en punto fijo y los utilizan correctamente en el diseño e implementación hardware de los distintos bloques del proyecto propuesto. Cerca del 90% de los alumnos realizan un diseño eficiente del analizador de

espectros y comprueban su funcionamiento en el hardware. Por ello, se puede afirmar, que la metodología utilizada consigue alcanzar los objetivos propuestos.

Por otra parte, la asignatura satisface a los alumnos, tal y como reflejan los resultados de las encuestas realizadas. En la Tabla 3 puede verse que los alumnos dan puntuaciones altas en la mayoría de los ítems (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de la encuestas realizadas a los alumnos.

	Curso 2004/05	Curso 2005/06
El nivel de la asignatura es adecuado.	7,5	8,9
Los objetivos están bien definidos desde el principio.	6,7	8,9
Los materiales de trabajo (documentación, bibliografía, etc) utilizados son cualitativamente adecuados.	8,3	7,9
Es coherente con la orientación del programa de doctorado.	9,2	8,2
Los contenidos se desarrollan lo suficiente.	8,3	7,9
Se fomenta la participación de los alumnos en clase.	9,2	7,5

4. Herramientas utilizadas

Para diseñar el analizador de espectros se utiliza la herramienta System Generator. Este software permite modelar DSPs complejos con Simulink y transformarlos en un proyecto de Xilinx ISE para la implementación del sistema en FPGAs. Este software facilita el modelado de sistemas de precisión finita en punto fijo, permitiendo definir el tamaño del *data-path* (ruta de datos) de las distintas arquitecturas y medir la eficiencia de las implementaciones en función de la precisión elegida.

Los componentes de las bibliotecas de System Generator simplifican notablemente el proceso de diseño al generar de forma automática un proyecto para FPGAs con el modelo realizado. Este proyecto se puede emplazar y rutar directamente con la herramienta Xilinx ISE.

El proyecto se implementa en la plataforma de prototipado Xtreme DSP de Nallatech. Este hardware dispone de una placa madre BenONE con un módulo BenADDA. La placa incluye dos convertidores analógico/digitales de 14-bit a 65-MSPS (AD6644), dos convertidores digital/analógico de 14-bit a 160-MSPS (AD9772A) y un dispositivo FPGA Virtex-II (XC2V6000-FF1152). El sistema puede utilizar un reloj externo o un oscilador de 65 MHz incluido en la placa. La programación del dispositivo FPGA se realiza con el programa FUSE incluido en el paquete.

En el proyecto el ADC1 se utiliza para capturar la señal de entrada y el ADC2 se utiliza para controlar la variación del desplazamiento en frecuencia del espectro (frecuencia del mezclador). El módulo del espectro se obtiene por el DAC1 mientras que el índice correspondiente al valor de la muestra transformada se obtiene del DAC2. Para conseguir una buena representación de la salida, se conectan ambas salidas a un osciloscopio en modo X-Y.

5. Resultados y originalidad

En este artículo se ha presentado la metodología utilizada en el curso “Tratamiento Digital de la Señal en FPGA” para el diseño y la implementación de un analizador de espectros en FPGAs. Este curso hace hincapié en cómo implementar de forma óptima algoritmos DSP en FPGAs. La mayor parte de los algoritmos presentados en teoría se utilizan en el proyecto, lo que facilita la comprensión de los contenidos teóricos y aumenta la motivación de los alumnos.

La originalidad de este trabajo radica en que a diferencia de lo que sucede en la mayoría de los cursos dedicados al procesamiento digital de la señal, este curso realiza desarrollos prácticos de alta complejidad sobre hardware programable. Generalmente los cursos dedicados a este tema, desarrollan sus aplicaciones sobre DSPs y por este motivo, no alcanzan a valorar el coste y las prestaciones de los distintos algoritmos desde el punto de vista de su implementación hardware. En el curso se han utilizado las herramientas System Generator, Simulink, Matlab e ISE de Xilinx y se han probado los diseños en la placa XtremeDSP. Estas herramientas facilitan el paso del modelo del sistema a su implementación hardware en FPGAs y permiten valorar los resultados de la implementación de los distintos algoritmos dependiendo de la precisión elegida en la ruta de datos.

Referencias

- [1] W. T. Padgett, *An undergraduate fixed point DSP course*, IEEE Signal Processing Society's 2nd Signal Processing Education Workshop, Pine Mountain, GA, Sep. 2002.
- [2] J. Vieira, A. Tome, and J. Rodrigues, *Providing an environment to teach DSP algorithms*, IEEE Signal Processing Society's 2nd Signal Processing Education Workshop, Pine Mountain, GA, Sep. 2002.
- [3] A. J. Kornecki, *Real-time systems course in undergraduate CS/CE programs*, IEEE Trans. Educ., CD-ROM Supplement, vol. 40, no. 4, p. 9, Nov. 1997.
- [4] C. H. G. Wright, T. B. Welch, D. M. Etter, and M. G. Morrow, *Teaching hardware-based DSP: Theory to practice*, Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing, vol. 4, Orlando, FL, May 2002, pp. 4148–4151.
- [5] W-S. Gan and M. Kuo, *Teaching DSP Software Development: form design to fixed-point implementations*, IEEE Trans. Educ., vol. 49, no. 1, pp. 122-131, Feb. 2006.
- [6] W-S. Gan, *Teaching and learning the hows and whys of real-time digital signal processing*, IEEE Trans. Educ., vol. 45, no. 4, pp. 336–343, Nov. 2002.
- [7] W-S. Gan, Y-K Chong, W. Gong and W-T Tan, *Rapid Prototyping System for Teachin Real-Time Digital Signal Processing*, IEEE Trans. Educ., vol. 43, no. 1, pp. 19-24, Feb. 2000.
- [8] A. J. S. Ferreira and F. J. O. Restivo, *Grasping the potential of digital signal processing through real-time DSP laboratory experiments*, IEEE Signal Processing Society's 2nd Signal Processing Education Workshop, Pine Mountain, GA, Sep. 2002.
- [9] C. Rauscher. *Fundamentos del Análisis de Espectro*. Rohde & Schwarz (2001).
- [10] J.G. Proakis y D.G. Manolakis. *Digital Signal Processing: principles, algorithms, and applications*, Prentice Hall (1996).