

Signalverarbeitung in programmierbarer Logik

Wo Prozessoren in ihrer Leistungsfähigkeit nicht mehr ausreichen, wird programmierbare Logik in Form von FPGA (Field Programmable Gate Arrays) eingesetzt. Hunderte von Rechenoperationen können damit in zwei, drei Clockzyklen erledigt werden. Typische Anwendungsbeispiele finden sich in der Bildverarbeitung, der Kommunikations- und Übertragungstechnik, im Bereich schneller Regleralgorithmen sowie der Signalanalyse. Im letzteren Bereich ist es vor allem die breitbandige Spektralanalyse, die in Forschungsgebieten wie der Atmosphärenphysik oder der Radioastronomie zur Anwendung kommt.

Bruno Stuber

Die Leistungsgrenze wird im Bereich der Spektralanalyse stetig nach oben geschoben: Mit einem einzelnen FPGA lassen sich heute in Echtzeit kontinuierlich Bandbreiten von etwa 2 GHz bei Abtastraten von 4 GS/s (bei 10 Bit) mit einer Auflösung von ca. 32'000 Kanälen spektral analysieren.

Schlüsseltechnologie FPGA

Die Leistungsfähigkeit der FPGA beruht auf dem „parallel processing“, den auf höchste Performance getrimmten Funktionseinheiten („Logikzellen“), der flexiblen Konfigurierbarkeit der Logik, in Verbindung mit den fortschrittlichsten und dichtesten Halbleitertechnologien. Die prominentesten Hersteller sind Xilinx und Altera.

Stichwort „Logikzellen“: Für die Signalverarbeitung sind die internen RAM-Blöcke und die (fixed-point) Multiplizierer die Schlüssel-Elemente. Zusammen mit Addieren, Multiplexern und Steuerlogik lassen sich damit praktisch alle Signalverarbeitungs-Aufgaben lösen. Die grössten Bausteine weisen bis zu tausend Multiplizierer auf (Wortbreite der beiden Operanden: 18x24 Bit) und mehrere Megabyte Dual Port RAM, die in kleineren Blöcken zur Verfügung stehen. An der Peripherie steht eine Vielzahl von Interface-Funktionsblöcken zur Verfügung, beispielsweise ultraschnelle serielle Ports, die eine Datenübertragung von mehreren Gigabit pro Sekunde erlauben. Auch Anbindungen zu externen DDR RAM oder zu Bussystemen wie PCIe sind ohne weiteres möglich. Die grösseren Bausteine enthalten zudem 1 oder mehrere Prozessor-Kerne, welche flexibel konfiguriert und mit einem Programm-Code geladen werden können. Während die Logikzellen die Daten in einer Pipeline-Architektur kontinuierlich verarbeiten, kann der Prozessor Steuerungsaufgaben erledigen oder kompliziertere, kontextabhängige Rechenschritte übernehmen.

Die Programmierung der Logik erfolgt mittels der Beschreibungssprache VHDL. Um die höchste Performance bezüglich Datendurchsatz zu erreichen, muss die logische Funktion auf einem elementaren Niveau beschrieben werden, gleichzeitig muss auch die optimale logische Struktur genügend genau vorgegeben werden. Nur so wird die anschliessende Logiksynthese die bestmögliche Abbildung auf die FPGA Zellen erzeugen.

Das Projekt: Spektralanalyse am technologischen Limit

Im Rahmen eines KTI-Projekts wird die FPGA basierte Spektralanalyse bezüglich Funktion und Performance erweitert und auf Höchstleistung getrimmt. Die Key Features der Entwicklung sind:

- 1) Konfigurierbare Architektur des Berechnungs-Kerns (FFT Core), zugeschnitten auf die verschiedenen sogenannten Digitizer Hardware Plattformen des Industriepartners: Die HW Versionen unterscheiden sich vor allem bezüglich Anzahl Signal-Eingänge, Abtastraten bzw. den damit verbunden Bandbreiten und ADC Wortbreiten. Die Palette reicht von 2-Kanal 500 MS/s, 16 Bit ADC bis hin zu 2x4 GS/s mit 10 Bit ADC.
- 2) Erweiterung der konventionellen FFT (Fast Fourier Transform) zur Digitalen Filterbank:

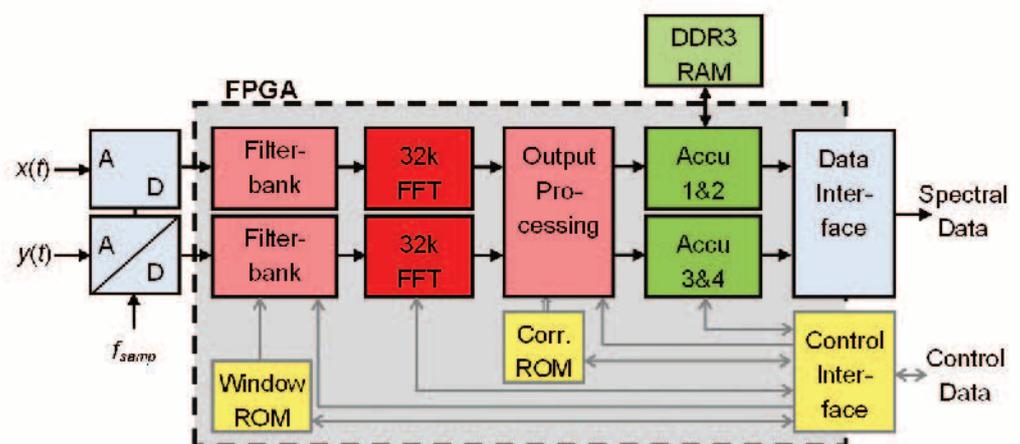


Abbildung 1: Struktur der 2-Kanal Version des FFT-Cores im FPGA

Die spektrale Auflösung bzw. Separation der Frequenzkanäle wird damit erheblich verbessert. Implementiert ist eine 32k FFT (2^{15} Kanäle).

- 3) Ein- oder zwei-kanaliger Betrieb des Spektrometers, selektierbar im Betrieb, mit erweitertem back end processing: Das klassische Spektrometer (beispielsweise in der Radioastronomie) benötigt einen Kanal und akkumuliert das Power-Spektrum fortlaufend, um das Rauschen auszumitteln. Neu kann parallel dazu auch das Quadrat des Power-Spektrums akkumuliert werden, um damit Störquellen in einzelnen Frequenzkanälen zu detektieren (-> Curtosis Analysis), weiter ist auch das komplexe Spektrum verfügbar.

Im Zweikanal-Betrieb halbiert sich die Abtastrate, dafür stehen für viele Anwendungen sehr interessante Ausgangsfunktionen zur Verfügung: Nebst den Power-Spektren kann das Kreuzleistungs-Spektrum P_{xy} gerechnet werden. Weiter stehen die Summe und die Differenz der Spektren zur Verfügung, womit die beiden Seitenbänder (oberes und unteres) separiert werden können. Phasen- oder Amplitudenfehler der beiden Eingangskanäle können mittels einer programmierbaren Korrekturtabelle reduziert werden.

FPGA 0: Spectrum 4

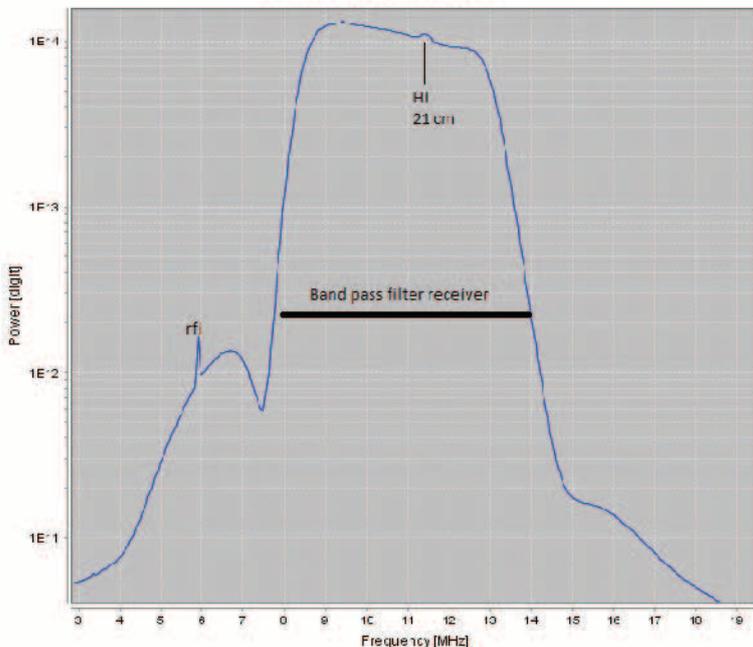


Abbildung 2: Messung der Wasserstofflinie einer galaktischen Quelle der Milchstrasse auf 21cm Wellenlänge: Peak bei 1420.4 MHz, heruntergemischt auf 10.7 MHz. (Quelle: Ch. Monstein, ETHZ, Messung auf Diavolezza).

Herausforderung Arithmetik

Alle Rechnungen im FPGA erfolgen in Fixed-Point-Arithmetik (analog zur Integer-Rechnung in Prozessoren), meist mit Wortbreiten von etwa 16 bis 24 Bit. In der FFT-Pipeline durchlaufen die Datenwerte etwa zwei Dutzend Multiplikationsstufen und ebenso viele Additionen. Jede Operation vergrössert die Wortbreite: Während die Addition ein Carry-Bit benötigt, addieren sich bei der Multiplikation die Wortbreiten. Es ist somit unumgänglich, die Wortbreiten entlang des Verarbeitungspfads systematisch zu kürzen. Ausgehend von der Wortbreite des AD-Wandlers kann zwar eine gewisse Erweiterung entlang der Pipeline-Stufen erfolgen, dies erfordert aber mehr RAM-Blöcke zur Zwischenspeicherung oder auch breitere Multiplizierer ($> 18 \times 24$ Bit).

Das Begrenzen und Kürzen der Wortbreiten ist im Hinblick auf das akkumulierte Spektrum eine äusserst subtile Angelegenheit: Jede „unausgewogene“ Massnahme kann sich sofort im Spektrum zeigen durch Effekte wie: Treppen (platforming effect), Sprungstellen, Feinstrukturen wie beispielsweise die Erhöhung jeder vierten Linie, generell ein erhöhter Rauschpegel im Spektrum oder ein unebener, eventuell badewannenförmiger Verlauf des Spektrums - alles Effekte, die sich in den typischen Anwendungsbereichen negativ auswirken. Im Rahmen des Projekts wurden diese Effekte systematisch untersucht und mittels Matlab und bitgenauer fixed-point Rechnung analysiert. Jede Arithmetik-Stufe wurde optimiert, in einzelnen Stufen wird gar ein convergent rounding angewendet, da auch das übliche nearest Rundungsverfahren noch einen minimalen Offset erzeugt.

Fazit

Mit diesem Projekt wurde die Leistungsfähigkeit der FPGA basierten Spektralanalyse erneut nach oben, an die vordere Front geschoben. Der Funktionsumfang im 1- und 2-Kanal Betrieb wurde erheblich erweitert und ist konfigurierbar im Betrieb (on the fly). Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten für ein breites Feld von Anwendungen, insbesondere in der Radioastronomie und der Atmosphärenphysik.

Projektteam

- Prof. Bruno Stuber, Dozent, bruno.stuber@fhnw.ch
- Daniel Treyer, MSc FHNW in Engineering, wissenschaftlicher Mitarbeiter, daniel.treyer@fhnw.ch
- Dino Zardet, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Mikroelektronik, dino.zardet@fhnw.ch
- Michael Roth, MSc in Engineering (MSE)

Projektpartner im KTI-Projekt

- Industriepartner und Hersteller der Digitizer Produktlinie: Agilent Technologies, Genf
- Anwender: Institute of Applied Physics, Universität Bern; Institute for Astronomy, ETH Zürich