

プラズマ波動観測器搭載用スペクトルマトリクス演算 FPGA モジュールの開発

櫻井 勢一郎 [1]; 笠原 禎也 [1]; 後藤 由貴 [1]
[1] 金沢大

Development of a FPGA module of spectral matrix calculator for plasma wave instruments

Seiichiro Sakurai[1]; Yoshiya Kasahara[1]; Yoshitaka Goto[1]
[1] Kanazawa Univ.

In recent years, measurement of plasma waveform is essential for the study of solar-terrestrial plasma physics. As total amount of the waveform data is enormous compared to telemetry capacity, it is necessary to process and reduce the data onboard. Such a signal processing was conventionally performed by onboard CPU, but it was impossible to apply advanced signal processing in real time to all waveform data. In this study, we aim to realize a FPGA module that generates spectral matrix in real time.

We designed the module on a FPGA board peculiarly developed in our group for evaluation purpose of digital signal processing in plasma waveform receiver [1, 2]. Six components of waveform less than 20 kHz can be fed into the FPGA board. Two FPGA (FPGA#1 and FPGA#2) is mounted on the board. FPGA#1 is used for arbitrary signal generator, while FPGA#2 is the data processing unit to emulate plasma waveform receiver.

The FPGA module of spectral matrix calculator consists of three sub-modules, FFTModule and SeparatorModule and Matrix-GeneratorModule performs a complex FFT on the waveform data. In the process of complex FFT, two channels of waveforms are simultaneously fed to the module, one channel to the real part and another one to the imaginary part. The SeparatorModule works to divide the obtained spectra into two channels again in the frequency domain. Finally these data are fed to the Matrix-GeneratorModule and spectral matrix with 6 x 6 components is generated.

According to our theoretical evaluation, the developed module is fast enough to generate spectral matrix in real-time.

[1] Matsui et al., SGEPS Fall Meeting #136, R006-P007, 2014.

[2] Kasahara et al., JPGU 2015, PCG31-19, 2015.

近年の科学衛星搭載のプラズマ波動観測器で生成される生の電磁界波形データは、衛星のテレメトリ伝送容量に比べて膨大なため、限られたリソースで最大の科学成果を得るための機上信号処理が不可欠である。従来、これらの信号処理はオンボード CPU が担っていたが、高度な信号処理をリアルタイムに全波形データに適用することは不可能であった。本研究では、FPGA(Field Programmable Gate Array)上で、波動の到来方向推定に必要なスペクトルマトリクスの生成をリアルタイムに行える演算モジュールの実現を目指す。

信号処理モジュールの開発は、研究室で開発した評価用 FPGA ボードを使用する [1,2]。この FPGA ボードは、衛星上で 20kHz 以下の電磁界波形を最大 6 成分の観測することを前提に設計されており、評価用に擬似信号を送出する FPGA#1 と、実際に機上で観測波形データを処理するためのデータ処理部を想定した FPGA#2 の 2 つの FPGA が搭載されている。それぞれの FPGA には外部 RAM として DDR2 メモリが接続されており、それぞれ評価用の擬似波形データの格納と処理後データの格納に用いることができる。また、USB ケーブルによって PC と接続することで、付属の CPU を介して各 FPGA と通信が可能である。ハードウェア記述言語には VerilogHDL を使用した。

スペクトルマトリクスの計算では、取得した 6 成分の波形データに対して複素 FFT を行い、これらの自己および相互パワースペクトルで構成された 6x6 の行列を作成し、それらの時間平均を求める。これを周波数成分の数だけ計算する必要があるが、スペクトルマトリクスがエルミート行列である特性を生かし、実際には対角成分と上三角成分のみを計算する。また、電磁界 6 成分を独立に 6 回複素 FFT を行う代わりに、実部と虚部に異なる成分を代入して複素 FFT を行い、得られた結果を再びそれぞれの成分に分離する方法を採用した。

現在開発中のモジュールは大きく 3 つに分かれており、複素 FFT を行う FFTModule、2 成分同時に実施した複素 FFT の結果を、各成分に分離する SeparatorModule、スペクトルマトリクスを計算する MatrixGeneratorModule で構成されている。複素 FFT は 1 フレーム 512sample で行うことを想定しており、FFTModule 及び SeparatorModule は 3 並列、MatrixGeneratorModule は一度に対角成分と上三角成分の最大 21 要素を演算することを想定している。評価用 FPGA ボードでは、サンプリング周波数を 65536[Hz] としており、512sample のデータを処理する場合、リアルタイム処理可能な最悪処理時間は $512/65535=7.8$ [ms] である。動作クロックを 25[MHz] とした時の FFTModule 及び、SeparatorModule のシミュレーションにおける処理時間はそれぞれ 0.51[ms]、0.041[ms] である。MatrixGeneratorModule の処理は 1 要素の演算に 2cycle かかると仮定し、それらを 256 回繰り返し、6 回分の時間平均を求めると想定すると、0.123[ms] で、これらすべてを合計しても十分リアルタイム処理が可能な計算量であることを確認した。またこれらの演算に必要な FPGA の大きさは Cyclone IV E の 10~15% 程度であり、回路規模的にも十分小さいモジュールで構成できることを確認した。現在、桁あふれ処理などの実装を行っており、今後、同モジュールを実機上で動作させ、その性能を定量的に評価を行う予定である。

[1] 松井 他, SGEPS 第 136 回総会及び講演会, R006-P007, 2014.

[2] 笠原 他, JPGU2015 年大会, PCG31-19, 2015.