

# FPGA を用いたデジタル FFT 分光器(OCTAD-S)の開発

○直井隆浩、岩井一正、久保勇樹、石橋弘光

(国立研究開発法人 情報通信研究機構 電磁波研究所 宇宙環境研究室)

## 要約

70MHz から 9GHz 帯をカバーするデジタル FFT 分光器 OCTAD-S を開発した。OCTAD-S 分光器は、エレックス工業株式会社が開発・製造した OCTAD を基に、FPGA へ FFT のプロセスを組み込んで開発した分光器である。ADC は、10-bit、5GHz。信号処理には FPGA が採用され、ソフト面の変更にも柔軟に対応。ACD モジュールを含め、交換や増設などのメンテナンスも容易に行える設計となっている。帯域を分割した 2 種類の分光器からなり、サンプリングレートは 2.048GHz と 4.096GHz、チャンネル数は 32,768 と 2,048、時間分解能は 8ms である。アンダーサンプル技術を用いて、ヘテロダイン方式を用いずに、マイクロ波帯まで直接分光している。宇宙天気予報に供する太陽電波の観測のため、鹿児島県指宿市の NICT 山川電波観測施設に設置の太陽電波望遠鏡へ搭載し、平成 28 年度より定常運用を実施している。

## 1. 概要

近年、デジタル信号処理の進歩は目覚ましい。従来は半導体等で構成された電子回路が行っていた処理をソフトウェアで行うようになり、装置の簡略化が進んでいる。ソフトウェアという性質上多様性に富み、また、汎用的ハードウェアを用いて処理を行うことで、比較的安価で機器の開発が可能となった。

天体観測における分光器もこの流れに乗っている。いわゆるソフトウェア受信機の利用である。信号処理に FPGA を用いるのはこの代表で、高速で且つ低電力の処理も可能となった。ここでは、新たに開発したデジタル FFT 分光器である OCTAD-S について、信号処理の紹介と性能評価について述べる。なお最後に、開発の契機となった山川太陽電波望遠鏡と宇宙天気業務について紹介する。

## 2. 分光器

### 2.1 OCTAD-S

OCTAD-S は、エレックス工業株式会社が開発・製造した OCTAD (Optically Connected Transmission system for Analog to Digital Conversion)を基に、FPGA へ FFT のプロセ



図 1 : OCTAD-S (上) と ADC (下左) 及び FPGA (下右)

表 1 : OCTAD-S 仕様

	2G64K	4G4K
ADC動作周波数	2.048 GHz	4.096 GHz
量子化ビット数	10 bit	
SFDR	~42 dB	~40 dB
GFDR	~37 dB	~38 dB
最大入力電力	0 dBm	
FPGA搭載数	2	1
周波数チャンネル	32768	2048
チャンネル幅	31.25 kHz	1 MHz
スペクトルの分解能(-3dB)	64 kHz	2.0 MHz
スペクトルの分解能(-9dB)	90 kHz	2.9 MHz
アキュジション時間	32 $\mu$ 秒	1 $\mu$ 秒
時間窓長	8m秒	
積算回数	250	8000

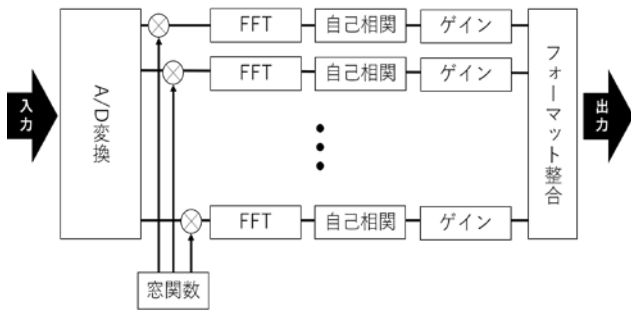


図 2 : 信号処理の概要

を組み込んで開発した分光器(-S: Spectrometer)である。図 1 には OCTAD-S の筐体と、内部に組み込んだ ADC 及び FPGA の写真を示す。分光器は、2 台の OCTAD-S から構成されており、

1.25GHz の ADC を 2 枚と 4 枚、Xilinx Virtex-7 (XC7VX485T) の FPGA チップを 2 枚と 1 枚、それぞれ搭載しており、2G64K 及び 4G4K と名称し、区別している。また、表 1 に OCTAD-S の仕様についてまとめる。

## 2.2 信号処理

信号処理の概要を図 2 に示す。フロントエンドを経た信号は AD 変換後、窓関数を掛けてから FFT 処理される。この際の時間窓長は 8 ミリ秒で、track-and-hold サークットを用いることで、デッドタイムのない処理を行っている。OCTAD-S の分光処理の特徴として、アンダーサンプルがあり、詳細は次節に述べる。アンダーサンプルによって折り返された FFT の結果は、その後のゲイン処理とフォーマットと整合により一連の周波数イメージとして整えられ、結果として 10GHz までの分光を可能とした。

## 3. 性能評価

### 3.1 折り返し特性

アンダーサンプリングの場合は入力信号周波数が高いため、通常のサンプリングよりも、サンプリング

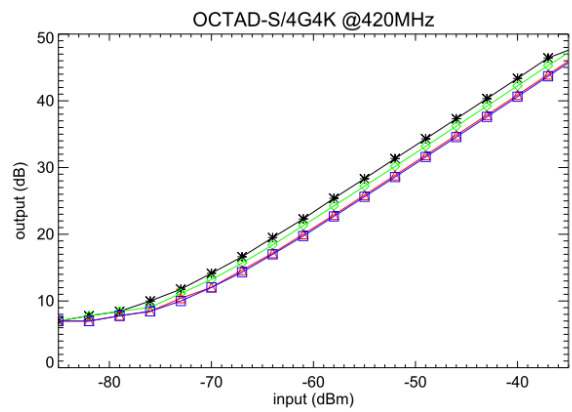


図 3 : 折り返し特性

420MHz の信号に対し、420 (\*黒)、3676 (◇緑)、4516 (△赤)、7772 (□青) の出力結果

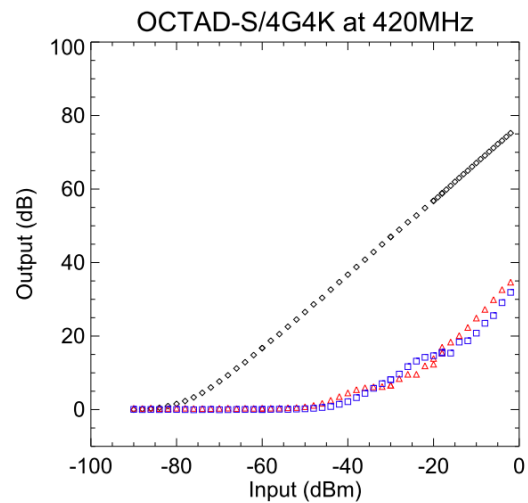
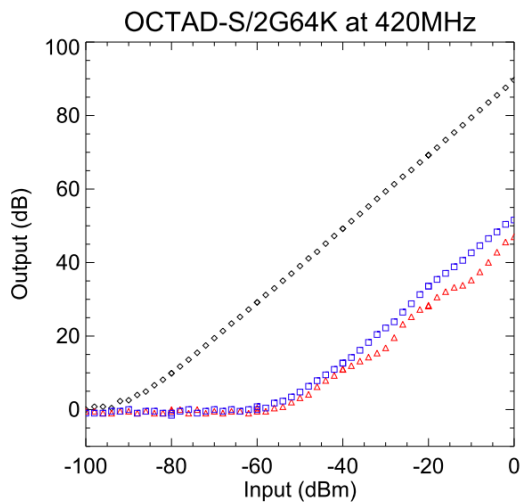


図 4 : ダイナミックレンジ

420MHz の測定結果を黒、840MHz での最大スプリアスを青、1444MHz でのゴースト青で示す

グクロックの揺らぎ（ジッタ）により AD 変換後の値に揺らぎとして影響が出る。図 3 には、OCTAD-S 4G4K の 420MHz 試験信号の折り返し特性の出力を示す。高い周波数になるほどジッタの影響を受けやすいが、本試験によりマイクロ波までの線形な動作を確認できた。

### 3.2 ダイナミックレンジと線形性

双方の分光器によるダイナミックレンジを図 4 に示す。アンダーサンプリングでは、入力周波数以下の全てのエイリアシング信号が帯域内に落ち込んで加算されるため、周波数以外に信号があるとスプリアスとなって妨害を受けることになる。また、使用周波数帯以外のノイズレベルが高いと SNR が大きく低下する。OCTAD-S ではおよそ 80dB のダイナミックレンジを測定しており、SFDR 及び GFDR においてもおよそ 40dB に達している。

### 3.3 アラン分散

分光器の安定性を評価するため、アラン分散安定時間を測定した。結果を図 5 に示す。およそ 1500 秒に達し、高い安定性を得ることができた。

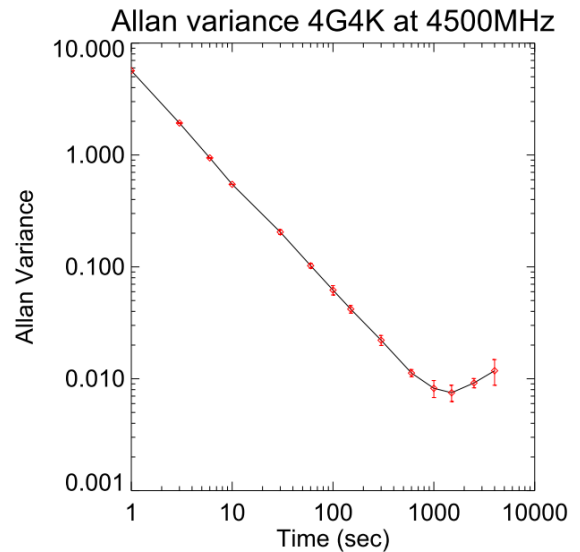


図 5 : アラン分散安定時間

## 4. 結論と宇宙天気及び今後の予定

### 4.1 結論

1. 独立した ADC と FPGA モジュールにより、より柔軟で低コストな分光器の製造に成功した。
2. アンダーサンプル技術を利用し、マイクロ波の track-and-hold サーキットを用いることで、デッドタイムなしの 10GHz までの直接分光を可能にした。

### 4.2 宇宙天気

情報通信研究機構では宇宙天気の予報等の業務を行っており、予報のための情報収集のひとつとして太陽電波観測を行っている。これまで観測を行っていた平磯太陽電波観測施設（茨城県ひたちなか市）に設置の太陽電波望遠鏡の老朽化に伴い、新たな望遠鏡を、情報通信研究機構の施設のひとつである鹿児島県指宿市の山川電波観測施設に建設した。本分光器はこの望遠鏡へ搭載するために開発され、平磯の機器に替わり、平成 28 年度より定常観測を行っている。

### 4.3 今後の予定

予定している性能強化として、量子化ビットの 12-bit への向上がある。量子化 SNR 理論値は 74dB となり、ダイナミックレンジのほぼ限界まで拡大できると考えている。既に試験用の ADC は完成しており、平成 29 年度中の搭載を目指している。また、太陽観測データの公開を予定しており、公開用ウェブインターフェイスの準備を行っている。こちらも、平成 29 年度中に公開を予定している。さらに、宇宙天気予報に供するため、太陽電波バーストを自動検出する機能の開発を行う。本分光器の開発については、論文投稿中である (Iwai et. al, submitted to EPSP)。