

FPGA を用いた太陽観測用電波望遠鏡の開発

Development of radio telescope for solar observation using FPGA

○竹原大智、野澤恵

(茨城大学 理学部 理学科)

(○Daichi Takehara, Satoshi Nozawa(Ibaraki University))

概要(Abstract)

太陽活動は約 11 年の周期で活発化しており、2025 年頃に太陽活動のピークを迎える
と予想されている。太陽活動が活発化することで太陽フレアやコロナ質量放出
(CME: Coronal Mass Ejection) がより頻繁に発生すると考えられる。一方、社会生活に
おいて電子機器をもはや必要不可欠とする我々は電力網や通信網などの重要な社会イン
フラが故障あるいは破壊される可能性を抱えている。これに伴い、現在宇宙天気予報に
注目が集まっているが、多くの課題を抱えているのが現状である。それらの課題を解決
するには、共通して観測地点を増やし観測データを充実させる必要がある。

本研究では宇宙天気予報の精度向上ひいては太陽研究への貢献を目指し、だれでも簡
単に構築と運用ができる簡易電波望遠鏡の開発を行う。今回は 430MHz(波長約 70cm)
で太陽電波の分光観測を行う。分光計には FPGA を用いて、必要であればデバイスドラ
イバも自作する。具体的には、八木・宇田アンテナ、経緯台、受信機、分光計、自動追
尾プログラムといった、電波望遠鏡本体から自動観測に必要なプログラムに至るすべて
を自作し、その設計図やソースコードをすべてオープンソースで公開することを目指す。

本研究には既存の技術の積み上げであるが、これにより電波望遠鏡を作る際に必要な
要素をすべて公開することで電波天文学での装置開発を始めるためのハードルを下げる
ことができることを実証した。

1. 研究の目的と内容

本研究では誰でも簡単に構築と運用ができる太陽観測用電波望遠鏡を開発し、全ての設計図をオー
プンソースで公開することで観測地点および観測データを増やし、宇宙天気予報の精度向上への貢
献を目指す。

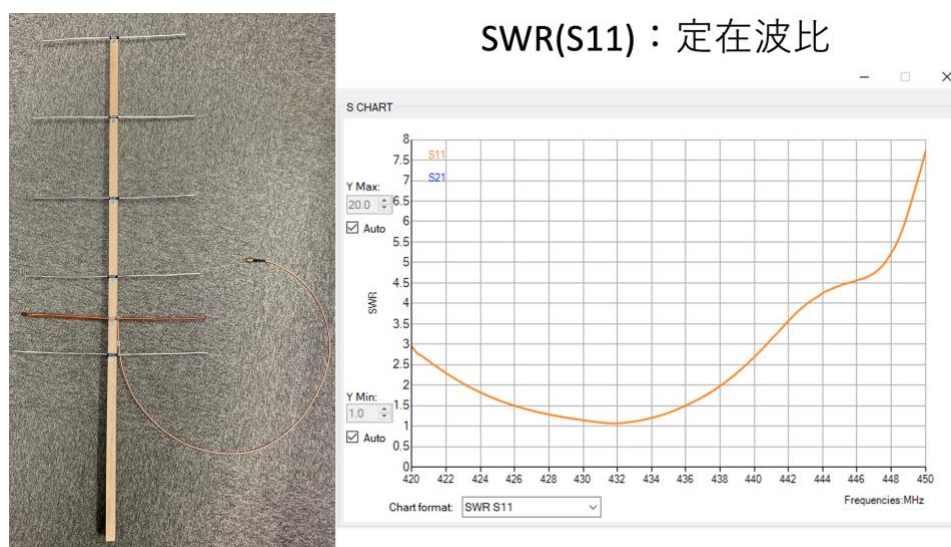
太陽観測用の電波望遠鏡を開発し 430MHz にて分光観測を行う。430MHz を選んだ理由は、この
周波数がアマチュア無線でも使用されている周波数であり、アンテナや受信機の設計の際に情報が
集めやすいことと、受信機に使用するフィルタや周波数変換器などが比較的手に入れやすく初心者
でも必要な情報を調べやすいからである。さらに 430MHz はキューブサットのビーコンでも使われ
ており、受信機や自動追尾のテストにも使用しやすい。

本研究では自動電波観測に必要な全てを自作し、その設計図やソースコードなど全てをオープンソースで公開する。具体的には、電波望遠鏡本体（アンテナ、受信機、経緯台、分光計）に加え、自動追尾用の軌道計算プログラムも作成する。今回は分光計を FPGA を用いて実装する。これらを全て公開することで電波天文学の装置開発を始めるためのハードルを下げるのではないかと考える。

2. 研究結果と議論

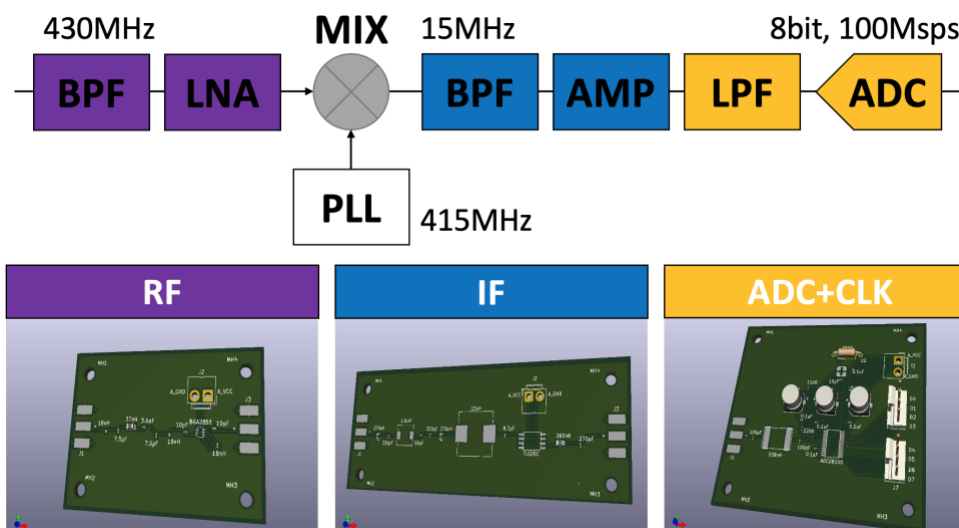
1) アンテナ

アンテナは八木・宇田アンテナを採用した。アンテナと受信機の整合状態を示す SWR では 426-436MHz の間で 1.5 を下回っており伝送損失が抑えられていることが確認できた。



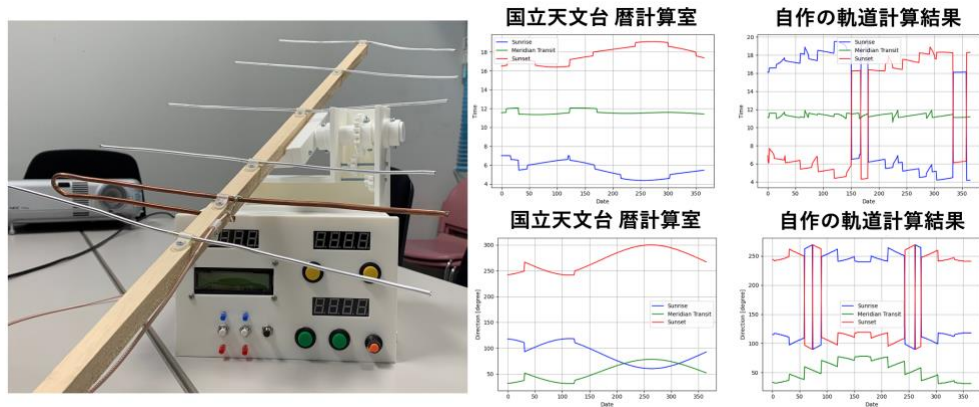
2) 受信機

スーパーヘテロダイン方式を採用し入力(430MHz)を局部発振器の 415MHz 出力と混合し 15MHz に周波数変換したのち 8 ビット・100Msps の AD コンバータでデジタル化し FPGA へ入力する。RF, IF, ADC+CLK 基板はいずれも設計から発注まで自分で行ったが、執筆時点ではまだ手元に届いていないため性能評価については記載できない。



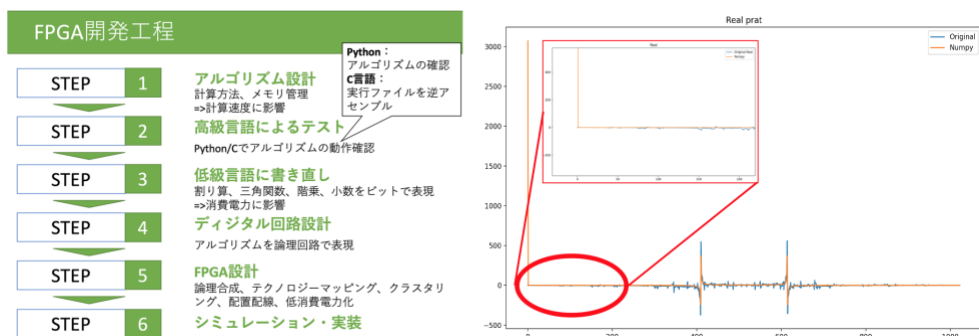
3) 自動追尾

太陽を常時自動観測するため、太陽の軌道計算データを用いて自動追尾を行う。経緯台は 3DCAD で設計したものを 3D プリンタで印刷して製作した。軌道計算では、自作の軌道計算プログラムの計算結果と国立天文台暦計算室が公開している計算結果を比較した。現時点では軌道計算プログラムに一部バグが確認されている。



4) 分光計

分光計は入力された信号をフーリエ変換することで周波数成分に分解する装置である。単純に AD コンバータとコンピュータを接続し、保存したデータを高級言語によってフーリエ変換するのでは動作速度が遅いだけでなく、データ量も膨大になる。例えば、今回使用する AD コンバータでは 1 バイト(8 ビット)、100Msps なので毎秒 100MB のデータを保存することになるが、10 秒で 1000MB(=1GB)のデータを保存することになる。そして、仮に 1024 点 FFT を行う場合、1 点にかかる時間は $10\mu s (=1024 \text{ point} / 100 \text{ MS/s})$ となる。この問題を解消するため FPGA を用いて分光計を製作する。開発では 6 つのステップに分けており、現在は 2 番目のステップにある。FFT アルゴリズムの動作確認を行い計算で生じたノイズの解決に取り組んでいる。



3. 課題

1) 受信機の改良

今回プリント基板で製作した受信機 2 号機は設計の段階でシミュレーションにより RF 回路の BPF は帯域幅が約 100MHz 程度あるのに対して、IF 回路の BPF は帯域幅が 4MHz ほどしかない。この改良としてフィルタ回路の設計をやり直す必要がある。それと同時に受信機の回路設計に

ついてさらに学習する必要がある。

2) 軌道計算アルゴリズムの改良

今回製作した軌道計算アルゴリズムでは国立天文台暦計算室が発表している軌道計算結果と大きく値がずれている区間が見受けられた。軌道計算では、地球の公転軌道を楕円で計算しており、閏年も考慮して計算している。しかし、結果は大きく異なる結果となった。方角に関する計算結果では、国立天文台暦計算室の計算結果に比べ、角度の変動が小さいことがわかった。

3) 分光計の実装

本研究では FPGA 開発のために設定した 6 つのステップのうち、2 番目で終わりとなった。今後の課題として、FFT アルゴリズムを完成させアセンブリ言語でのデータ操作の確認や、デジタル回路の設計と HDL での記述とシミュレーションを行い分光計を完成させなければならない。しかし、現在 FFT アルゴリズムの動作確認においてノイズが残っている。これが計算アルゴリズム側の問題なのか、今回用いた Python というプログラミング言語側の問題なのかについては今後別の言語で書き直すことで検証したい。

4. 展望

1) デバイスドライバの開発

本研究で開発している望遠鏡では FPGA を用いて分光計を製作している。ここで注目すべきは既存の IP コアを使用せずに分光計を開発していることである。すなわち、FFT 回路を製作した後はその計算結果をデータとして OS 側に渡し、ソフトウェアが処理できるようにしなければならない。このハードウェアとソフトウェアの通信を担うのがデバイスドライバである。

FPGA による分光計は現在開発途中なため出来上がりがどのようになるのかは現時点ではわからないが、少なくとも、演算結果はレジスタに保存される。そのレジスタにアクセスし、結果をソフトウェアが処理できるように OS 側に渡すデバイスドライバの開発を考えている。

2) 遠隔制御への対応

各望遠鏡に搭載された Raspberry Pi の IP アドレスを固定して LAN に接続することで SSH 接続や HTTPS 通信などネットワーク通信が容易にできるようになる。こうすることでアレイ化ができるようになる。しかし、毎回個別に Shell を立ち上げたり SSH 接続を確立したりするのは、望遠鏡の数が増えるに従い面倒になるので専用の制御ソフトウェア(GUI)を開発する予定である。

3) 干渉計化

遠隔制御が可能となれば望遠鏡の数を増やしアレイを形成することが可能となる。干渉計のメリットは単一鏡に比べ角分解能が高いことである。電波望遠鏡の角分解能は「波長÷開口面積」で表されるので開口面積が大きいほど分解能が向上する。電波干渉計は天体の位置や速度、輝度分布などを測定することもできる。

また、アンテナのビーム幅は開口面積が大きくなるほど小さくなる。今回用いる八木・宇田アンテナのビーム幅は約 36 度程度ある。干渉計に関しては結合素子型干渉計や VLBI もあり個人的にとっても興味があるので、干渉計の開発も今後の展望としておく。