

# ソフトウェア無線技術を用いたウィンドプロファイラー用 デジタル受信機の開発

脇阪洋平<sup>1</sup>, 橋口浩之<sup>1</sup>, 山本衛<sup>1</sup>, 山本真之<sup>1</sup>, 妻鹿友昭<sup>1</sup>, 今井克之<sup>2</sup>

1: 京大生存圏研, 2: 住友電工(株)

## 1 はじめに

大気中の微量成分の輸送は、対流によるもの以外に大気乱流に伴う拡散による効果が大きく、成層圏のみならず対流圏においても乱流拡散の効果は無視できない。大気乱流についての研究は大気力学の現象、過程を明らかにする上で重要であるが、観測は困難である。大気レーダーは、大気乱流からの散乱エコーを観測すること、時間・空間的に連続観測可能である点で、大気乱流の観測装置として優位にあるが、従来空間分解能に限界があった。単一の周波数、単一の受信アンテナを用いる通常のパルスレーダーでは、距離分解能はパルス幅で、空間分解能はアンテナビーム幅で規定される。MU レーダーでは、2003 年度に「超多チャンネルデジタル受信システム」が導入され、送受信周波数を切り替えながら、アンテナ各群からの受信信号を同時に並行して取得できるようになり、レーダー上空の大気乱流エコー強度の空間分布を 3 次元イメージング(映像化) することが可能となった。これにより大気乱流の 3 次元構造やその発生から消滅までの過程を観測するなど、大気乱流に関する研究が進められている。MU レーダーは、大気乱流を 3 次元イメージング可能な数少ないレーダーの一つである。しかし MU レーダーは大型のレーダーであるため、送受信の切り替えに時間がかかり、高度 2km 以下の大気乱流を観測できないという問題を抱えている。下層大気の中でも大気境界層は地表面の影響を受け、複雑な 3 次元乱流構造が存在すると考えられている。しかし下層大気の実地観測が可能なレーダーがないため、大気境界層の乱流の構造や、生成から消滅までの過程は解明されていない。MU レーダーでは観測できない大気境界層を含む下層大気の大気乱流の 3 次元構造の観測を行うため、ウィンドプロファイラーと呼ばれる小型大気レーダーの開発が進められてきた。現在、信楽 MU 観測所設置の既存のウィンドプロファイラー LQ7 の改良により「イメージング・ウィンドプロファイラー(Imaging Wind Profiler; IWP)」の開発が進められつつある。

本研究では、IWP を用いて多周波受信や多チャンネル受信を可能にし、周波数領域干渉計(Frequency Domain Interferometry; FDI)、空間領域干渉計(Spaced Domain Interferometry; SDI) による距離分解能、空間分解能の改善のために必要となるデジタル受信機を開発を目的とする。開発にはソフトウェア無線の技術を用いて他のレーダーシステムにも適応が容易な柔軟性の高いデジタル受信機を目指した。



図1 ウィンドプロファイラー LQ7

## 2 Universal Software Radio Peripheral 2(USRP2) 及び Universal Hardware Driver (UHD)

USRP2 は Ettus Research 社から販売されている無線 LAN などの開発、試験用として使用することを主な目的として開発されたソフトウェア無線機である[Yamamoto, 2008; 山本, 2010]。USRP2 はマザーボードとドーターボードで構成されている。マザーボードには FPGA(Xilinx 社製 Spartan 3 - 2000) が搭載されており、SD カードに記憶されている FPGA イメージとファームウェアを読み込んで起動する。FPGA イメージとファームウェアは GNU Radio と UHD から提供されている。FPGA 上ではザイリンクス社のソフトプロセッサコアである MicroBlaze が動作しており、このプロセッサ上でファームウェアが実行される。ファームウェアを書きかえることで外部からのリファレンス信号の周波数などを変更することが可能である。また、ドーターボードを変更することにより受信できる周波数範囲を DC 付近から 5.9 GHz の広い範囲で選択することができる。デジタルダウンコンバータを使用することで周波数帯をソフトウェアの変更のみで変換することが可能である。内部クロック(100 MHz) を外部信号によってロックするための外部信号入力用端子と、外部からトリガ入力を可能にするための端子があり、これらを利用して複数台の USRP2 を同期動作させることが可能である。

UHD は USRP2 を制御するファームウェアとライブラリを提供しているオープン・ソースのドライバである。C++で利用可能なライブラリが提供されている。通信に UDP (User Datagram Protocol) を用いるため、Linux に限らず Windows からの利用も可能である。



図 2 USRP2 の外観

### 3 結果

USRP2 と UHD を用いてデジタル受信機の開発を行った。送信波の漏れ込み信号を用いることで観測タイミングの検出を行った。また、複数台の受信機間での同期を行うために GPS (Global Positioning System) 受信機からの 10MHz リファレンス信号を用いて開発した各デジタル受信機の内部クロックをロックした。また開発したデジタル受信機内部の NCO (Numerically Controlled Oscillator) の初期位相を揃えるために GPS 受信機からの 1PPS 基準秒パルスを分配してトリガパルスとしてデジタル受信機に入力した。

LQ7 との同時観測により開発したデジタル受信機の動作確認を行った。LQ7 との試験観測の結果から開発した受信機が正しく動作しており、LQ7 と同等の性能を有していることを確認することができた。図 3、4 に試験観測による LQ7 と開発したデジタル受信機の平均ドップラー速度の比較結果を示す。

また、開発したデジタル受信機 2 台を用いた観測も行い複数台での同期観測が可能であるかを確認した。2 台同時観測の結果から提案した手法で複数台観測が可能であることを確かめることができた。

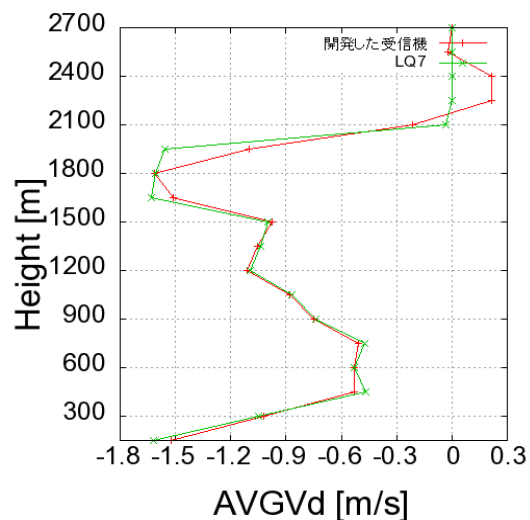
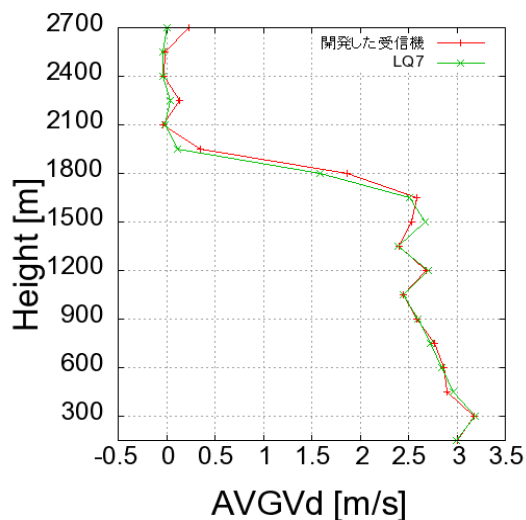


図 3 北ビーム方向の平均ドップラー速度の比較 図 4 東ビーム方向の平均ドップラー速度の比較

## 4 まとめ

USRP2 と UHD を用いて周波数領域干渉計、空間領域干渉計による距離分解能、空間分解能の改善のために必要となるデジタル受信機の開発を行った。送信波の漏れ込み信号を用いた観測タイミング検出方法などの開発で LQ7 と同等の性能を持つデジタル受信機が開発できた。複数台での観測を行うために GPS 受信機の 10MHz リファレンスや 1PPS 基準秒パルスを用いて複数台のデジタル受信機間での同期が可能となった。また、開発にソフトウェア無線の技術を用いたことで LQ7 だけではなく、他のレーダーシステムにも適応が容易な柔軟性の高いデジタル受信機が開発できた。今後は、周波数領域干渉計や空間領域干渉計を用いたイメージング処理やクラッター除去などの適応信号処理[Kamio et al., 2004]の実装をすることで、大気境界層の乱流の構造や、生成から消滅までの過程が明らかになると期待される。

## 参考文献

Kamio, K., Nishimura, K. and Sato, T.: Adaptive sidelobe control for clutterrejection of atmospheric radars, *Annales geophysicae*, Vol. 22, No. 11, pp. 4005–4012 (2004).

Yamamoto, M.: Digital beacon receiver for ionospheric TEC measurement developed with GNU Radio, *Earth Planets Space*, Vol. 60, No. 11, pp.e21–e24 (2008).

山本衛: RF ワールド No.10:GNU Radio と USRP で始めるソフトウェア無線, CQ 出版社(2010).