

大気レーダーによる風速・大気乱流測定データ品質向上のための信号処理手法の開発

山本真之¹・西村耕司²

- 1 : 情報通信研究機構 (NICT)
- 2 : 極域環境データサイエンスセンター (PEDSC)

2021年1月15日

極域データの保全・公開と利活用に関する研究集会

大気レーダー・ウィンドプロファイラ (WPR)

- ✓ 大気レーダーは、乱流等に起因する電波散乱エコー（大気エコー）を利用することで、晴天域における風速や乱流パラメータの高度プロファイルを計測するレーダー。
- ✓ 対流圏における風速測定を主目的とした大気レーダーは、一般にWPRと呼ばれる。WPRは、晴天域における風速を連続計測（時間分解能：10分以下、高度分解能：数100m）できる貴重な観測手段。気象予報などを目的に、日本・欧州・中国などでWPRの高層風速観測ネットワークが運用されている。

電波屈折率 n

$$n = \left(\frac{3.75 \times 10^{-1} e}{T^2} + \frac{7.76 \times 10^{-5} p}{T} \right)$$

e : 水蒸気圧, T : 気温, p : 気圧

大気乱流による気温・水蒸気の変動により、 n の擾乱が発生。

等方乱流に対する屈折率の構造定数 C_n^2

$$\overline{(n(r + \delta r) - n(r))^2} = C_n^2 |\delta r|^{2/3}$$

r : 位置、 δr : 微少な位置のずれ

ブラッグスケール ($\lambda/2$) を持つ
 n の擾乱は互いに強めあう。
→ 大気エコーの生成源となる。

レーダー反射率 η

$$\eta \cong 0.38 C_n^2 \lambda^{-1/3}$$

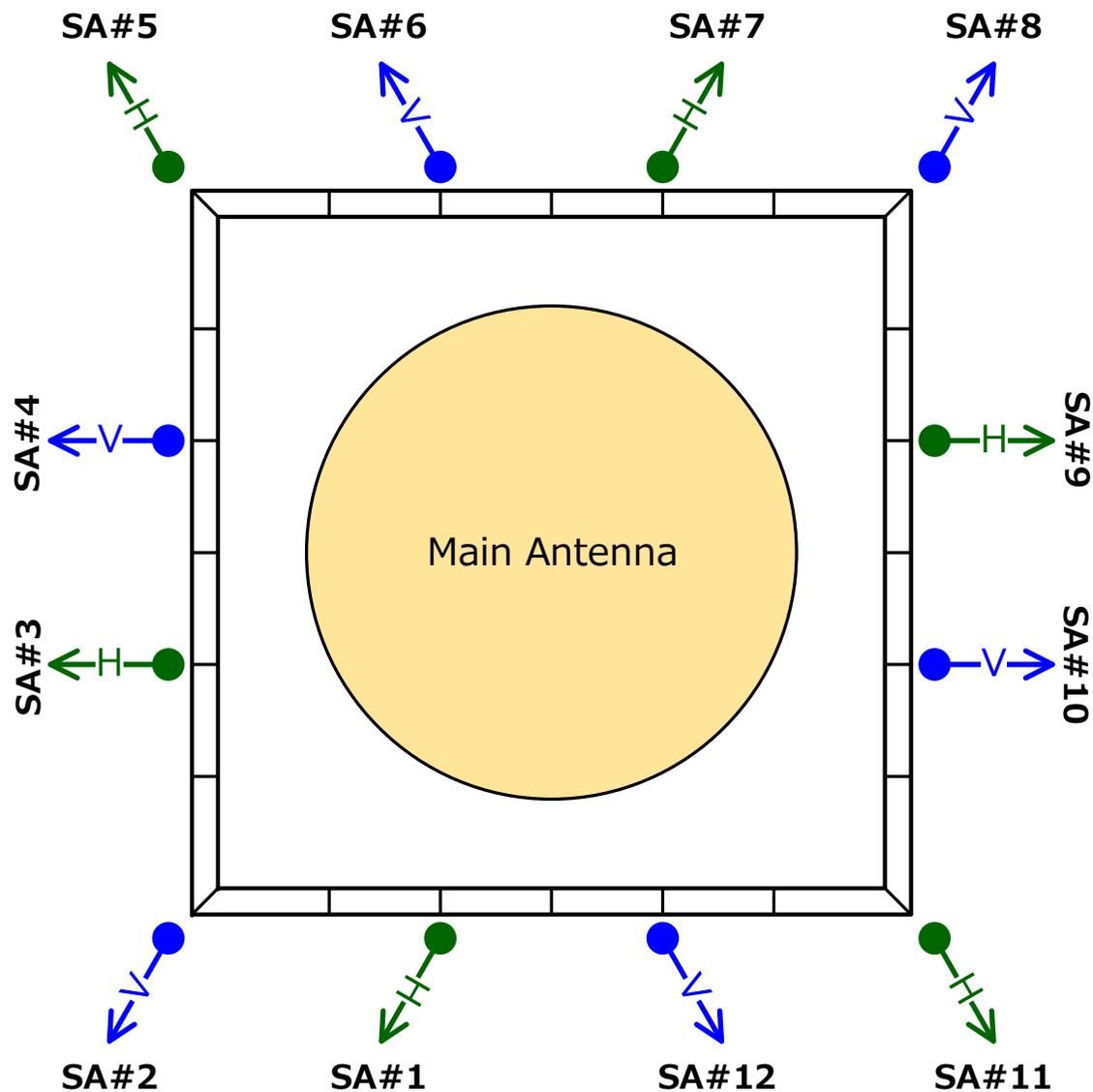
λ : 送信電波の波長

WPR: Wind Profiler Radar

研究の背景と目的

- 大気レーダー・ウィンドプロファイラ（WPR）の品質を低下させる要因の一つに、非所望のエコー（クラッタ）の混入がある。
 - クラッタの混入低減による風速等の観測プロダクトの品質向上は、大気レーダー・WPRのさらなる高度利用につながる。
- 高速で移動する航空機等からのクラッタ（以下、高速移動クラッタ）は、従来の技術による低減が困難。高速移動クラッタを低減する新たな信号処理手法として、Sidelobe-Shaping Pulse Compression Scheme（SSPCS）が提案されている。
 - SSPCSが高速移動クラッタを低減できる有望な信号処理手法であることを、観測実験により実証したい。
 - NICTの有する1.3GHz帯WPR（LQ-13）を用いた観測実験を実施。

LQ-13のアンテナ配置



- 主アンテナはルネベルグレンズ13台から構成されるフェーズドアレイアンテナ。
- クラッタ抑圧用サブアレイアンテナ (SA) 12台をH偏波SA・V偏波SAのペアとして配置。SAの方位間隔 (60度) は、SAの半値幅にほぼ相当。

USRP多チャンネルデジタル受信機の外観



**ソフトウェア無線用データ収集装置
(USRP X310) 8台**

- A/D変換
- デジタル直交検波



WS (2台)

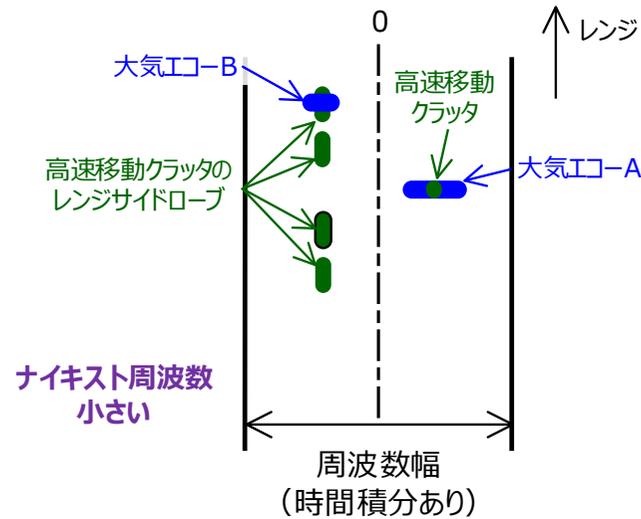
- レンズング
- パルス圧縮の復号
- 時間積分
- 測定データ保存

- ワークステーション (WS) 2台とUSRP X310 8台を用いることで、主アンテナ及び12台のクラッタ抑圧用サブアレイ (SA) から得た受信信号をリアルタイムデータ処理。
- リアルタイムデータ処理後の複素時系列データをハードディスクに保存。

Sidelobe-Shaping Pulse Compression Scheme (SSPCS)

(a)

従来手法（時間積分）におけるドップラースペクトルの高度分布

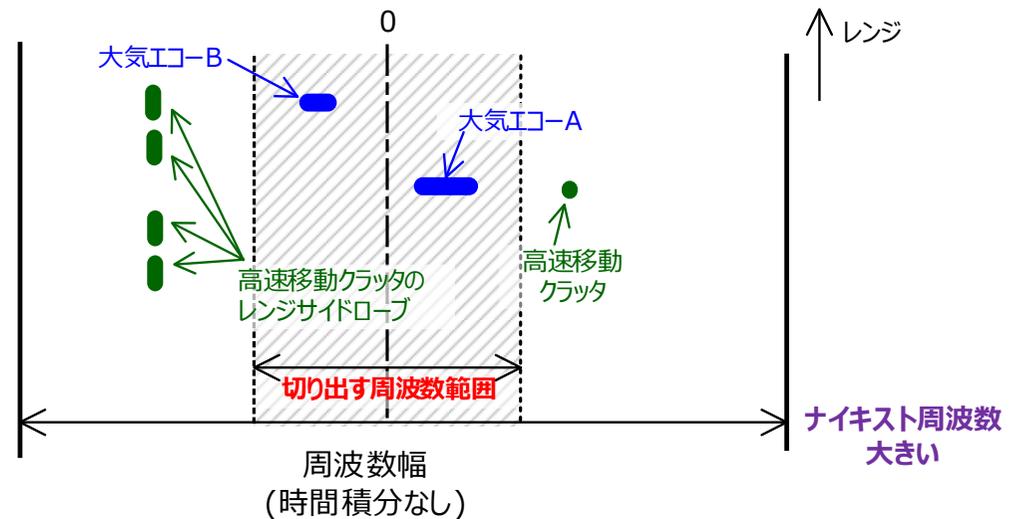


時間積分によるナイキスト周波数の低下のため、以下が発生。

- ・高速移動クラッタが周波数エリアジングすることで、大気エコー-Aと高速移動クラッタが重なる。
- ・高速移動クラッタのレンジサイドローブが周波数エリアジングすることで、レンジサイドローブが大気エコー-Bに重なる。

(b)

新手法（SSPCS）におけるドップラースペクトルの高度分布



時間積分をしない受信信号に対して直接FFTを行うことで、ナイキスト周波数を低下させない。

- 高速移動クラッタが周波数エリアジングすることを防ぐことで、大気エコー-Aと高速移動クラッタを分離。
- 高速移動クラッタのレンジサイドローブが周波数エリアジングすることを防ぐことで、大気エコー-Bとレンジサイドローブを分離。
- 逆FFTにより大気エコーの存在する周波数範囲だけを切り出すことで、保存データ量を増やすことなく高速移動クラッタの混入を低減。

- ・ナイキスト周波数を従来手法よりも広くとることで、高速移動クラッタにおける周波数エリアジングの発生を減らす。
 - 大気エコーの存在範囲に高速移動クラッタが混入する影響を低減できる。
- ・USRP多チャンネル受信機では、リアルタイムデータ処理の多くをワークステーション上でソフトウェア処理する。そのため、観測パラメータの設定自由度が高い。
 - USRP多チャンネル受信機を用いた観測実験を実施。

観測実験の結果

- SSPCSの観測実験におけるナイキスト周波数（ナイキスト速度）は、625 Hz（約69.1 m/s）とした。従来の観測パラメータにおけるナイキスト周波数（ナイキスト速度）は125 Hz（約13.8 m/s）あるいは156.25 Hz（約17.3 m/s）であるため、実施した観測実験では、ナイキスト周波数（ナイキスト速度）は4～5倍に拡大された。
- 以下のドップラースペクトルを得た。
 - SSPCSの観測実験で取得した広いナイキスト周波数の測定データを、そのまま高速フーリエ変換（FFT）することで得たドップラースペクトル。
 - 従来の観測パラメータで取得されるドップラースペクトル。従来の観測パラメータで取得されるのと同等のドップラースペクトルは、SSPCSの観測実験で取得した測定データを従来の観測におけるナイキスト周波数と同程度になるまで時間積分（コヒーレント積分）し、その後FFTすることで得られる。
- SSPCSありのドップラースペクトルとSSPCSなしのドップラースペクトルを比較した。
 - SSPCSなしの場合は、周波数エリアジングの影響により、高速移動クラッタが従来の観測パラメータにおける測定周波数範囲に混入した。
 - SSPCSの場合は、周波数エリアジングの影響を減らすことで、高速移動クラッタが従来の観測パラメータにおける測定周波数範囲に混入することを防ぐことができた。

**SSPCSは高速移動クラッタの低減に有用であることを、
観測実験により示した。**

研究発展の状況

- 本共同研究を含むPEDSC・西村先生との研究協力を基に、今年度より情報・システム研究機構とNICTとの共同研究が開始された
（課題名：大気観測用リモートセンシングセンサの高度化）。
- 情報・システム研究機構とNICTとの共同研究では、大気レーダー・WPR技術に関する取り組みに加え、南極昭和基地に設置されるスペクトルリオメータ用リアルタイム信号処理装置の製作にも取り組んでいる。