

レーダーインバージョンによる大気擾乱精測技術の開発

Development of measurement technique for atmospheric disturbance using radar inversion

研究代表者：橋口浩之（京大生存圏研究所）
hasiguti@rish.kyoto-u.ac.jp

研究分担者：西村耕司（京大生存圏研究所）
nishimura@rish.kyoto-u.ac.jp
担当：理論的側面の検討と研究の助言

研究分担者：王 元（京大生存圏研究所）
wang.yuan.73s@st.kyoto-u.ac.jp
担当：シミュレーションコードの作成と解析

研究目的 (Research Objective):

スペクトル観測方程式は、レーダーシステムと大気による電波散乱過程をモデル化した理論から導出され、Nishimura et al. [IEEE, 2020]により提唱された。これによると、レーダーシステムが多チャンネル受信（干渉計観測）の場合に、レーダービームを向けた観測体積内の3次元風速が観測可能となる。すなわち、従来のDBS観測では困難であった3次元風速場の観測が、レーダービームを多方向に向けることで可能となる(Fig.1)。この観測を実現するため、スペクトル観測方程式の逆問題を数値的に解いて3次元風速を推定するインバージョンアルゴリズムを構築した(RI法)。数値実験による推定精度検証のため、散乱シミュレーションを開発し、RI法の精度検証を行なうと同時に、従来法である空間アンテナ法(FCA法)による風速推定による比較も踏まえたRI法の相対的な性能も評価するため、数値実験を行なった。さらに、低高度観測時におけるドップラースペクトル幅(ビームブロードニング)についても、数値シミュレーションを用いて検討を行った。

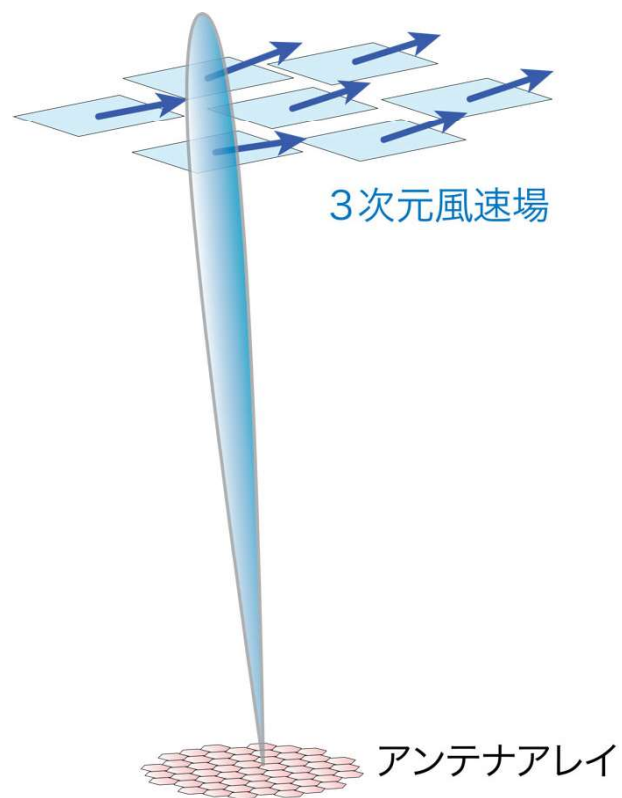


Fig. 1 3次元風速場観測の概念図

計算手法 (Computational Aspects):

散乱シミュレーションは、サンプリング領域よりも十分に広い空間内に一様分布する散乱体が、ある平均風速と速度分散をパラメータとする正規分布に従うランダムな速度でレーダーの送信波を散乱しながら、等速直線運動するモデルである(Fig.2)。散乱体の初期位置は、レーダーの半波長ほどの間隔で、ランダムな一様分布によって決まり、サンプリング領域の境界条件は周期境界としている。シミュレーションの計算コストは、散乱体の個数とアンテナ本数に依存する。本研究ではレーダーシステムとして、数多くの素子アンテナを持つMUレーダーを想定しているため、大規模計算機を利用した計算が必要となる(Table 1)。散乱シミュレーションの時間発展モデルは散乱体ごとに独立なので、散乱体を計算機の利用可能ノード数で分割し、各ノード内では OpenMP を用いた並列計算を行った。

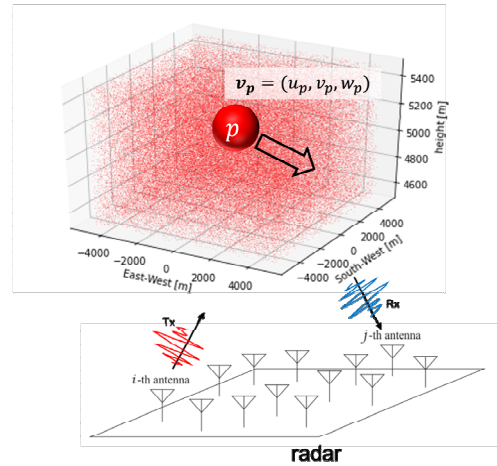


Fig.2 散乱シミュレーションの概念図

Table 1 シミュレーションの設定パラメータ

種別	設定項目	設定値
レーダーシステム	サンプリング間隔	0.032 sec
	ビーム方向	(天頂角, 方位角)=(0,0)
	距離分解能	150 m
	送信波長	6.45 m
	サンプリングレンジ	2000 m
	受信チャンネル	3
	送受信サブアレイ	F2, F3, F4
	レーダーの中心座標	(x, y, z) = (0, 0, 0) m
サンプリング継続時間	128 sec (サンプリング 4000 回)	
散乱モデル	散乱体積領域 V の x 軸移動領域 (東西)	$-2000 \leq x \leq 2000$ m
	散乱体積領域 V の y 軸移動領域 (南北)	$-2000 \leq y \leq 2000$ m
	散乱体積領域 V の z 軸移動領域 (上下)	$1500 \leq z \leq 2500$ m
	散乱体積領域 V 内の散乱体個数	$O(10^8)$ 個
	風速	$(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}) = (20, 0, 1)$ m/s
	速度分散	$\sigma = 0.5$ m/s

研究成果 (Accomplishments) :

独立な初期位置を設定した5回の散乱シミュレーション実験を行い、RI法(提案手法)とFCA法(従来法)による風速推定を行なった。RI法では、全ての推定パラメータの標準偏差内に真値を含んでおり、FCA法より高精度に3次元風速および速度分散を推定できた。また、FCA法では得られない鉛直流と風速分散も推定可能である。

Fig.3 に示すように、FCA 法と比較すると、水平風速と風向の推定値平均がより真値に近いことがわかる。以上より、電波散乱の物理的、統計的性質とレーダーシステムを考慮したスペクトル観測方程式のインバージョンアルゴリズムは、従来手法に比べ、推定の高精度化と観測情報量の向上を図ることができる。

また、MU レーダーに受信専用アンテナを付加して、バイスタティック方式により低高度観測を行う想定で、スペクトル観測理論を用いた数値シミュレーションにより精度評価を行った。特に乱流強度を推定する時に、乱流に伴う風速分散を推定するためにビームブロードニングの評価が重要となるが、近傍領域ではビーム幅と水平風の積から求まるビームブロードニングよりも大きな値を取ることが確認された。

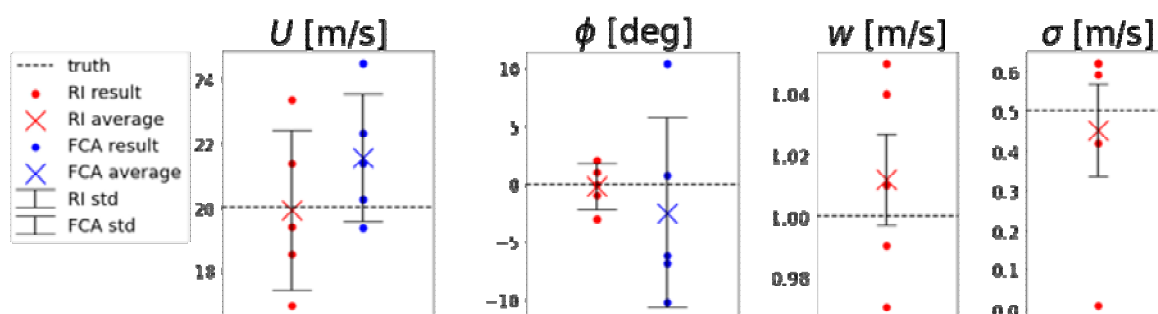


Fig.3 RI 法と FCA 法による風速推定結果。
(U :水平風速、 ϕ :風向、 w :鉛直流、 σ :速度分散)

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. 田村亮祐, 西村耕司, 橋口浩之, スペクトル観測理論に基づくレーダーインバージョンアルゴリズムの開発, 第14回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, オンライン, 2020年9月14-15日.
2. 田村亮祐, 西村耕司, 橋口浩之, レーダーインバージョンによる大気乱流強度推定, 日本気象学会2020年度秋季大会, オンライン, 2020年10月25-31日.
3. 田村亮祐, 西村耕司, 橋口浩之, レーダーインバージョン法を用いた乱流強度推定法の開発, 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, オンライン, 2020年11月1-4日.
4. Koji Nishimura, Ryosuke Tamura, and Hiroyuki Hashiguchi, Inversion Technique on Interferometric Atmospheric Radar, The 11th Symposium on Polar Science, Online, December 1-3, 2020.
5. R. Tamura, K. Nishimura and H. Hashiguchi, Volume scattering simulation for 3D wind vector estimation using radar inversion, Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting, online, May 30-June 6, 2021
6. Ryosuke Tamura, Koji Nishimura and Hiroyuki Hashiguchi, The Inversion Algorithm of Atmospheric Radar Signal Given by a 3-Dimensional Volume

Scattering Semi-Physical Simulation, LAPAN/BRIN-Kyoto University International Symposium for Equatorial Atmosphere / The 6th Asia Research Node Symposium on Humanosphere Science / INternational Conference on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment (INCREASE), online, September 20-21, 2021.

7. 田村亮祐・西村耕司・橋口浩之, レーダー干渉計インバージョンによる 3 次元風速場推定法の開発, 2021 年度 PANSY 研究集会, オンライン, 2022 年 3 月 9 日.
8. 田村亮祐・西村耕司・橋口浩之, レーダー干渉計インバージョンによる 3 次元風速場推定手法の開発, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 幕張・オンライン, 2022 年 5 月 22-6 月 3 日.
9. 王元・西村耕司・橋口浩之・橋本大志・堤雅基・佐藤亨・佐藤薫, バイスタティックレーダーによる低高度域観測技術の開発, 第 16 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, オンライン, 2022 年 9 月 5-6 日.
10. 王元・西村耕司・橋口浩之, バイスタティックレーダーによる低高度域観測技術の開発, 日本気象学会 2022 年度秋季大会, 北海道大学・オンライン, 2022 年 10 月 24-27 日.

(修士論文)

田村亮祐, レーダー干渉計インバージョンによる 3 次元風速場推定の研究, 令和 3 年度京都大学理学研究科地球惑星科学専攻修士論文.

王元, Development of Low Altitude Observation Technology by Bistatic Radar (バイスタティックレーダーによる低高度域観測技術の開発), 令和 4 年度京都大学情報学研究科通信情報システム専攻修士論文.