

# 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

田村亮祐(京大生存研、M1)  
西村耕司(国立極地研)  
橋口浩之(京大生存研)

## アウトライン

- 背景・目的
- スペクトル観測理論
- レーダーインバージョン(RI)法
- 乱流スペクトル幅の推定
- 風速の推定
- まとめ

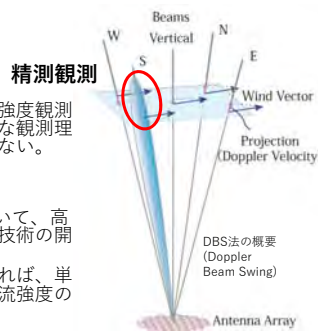
## 背景・目的

### □背景

- 大気レーダーによる風速・乱流強度観測において、既存の手法では厳密な観測理論に基づいた解析が行われていない。

### □目的

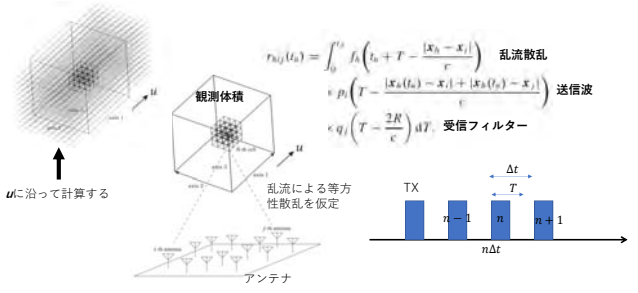
- スペクトル観測理論(後述)を用いて、高精度の観測が可能なデータ処理技術の開発を行う。
- 多チャンネルレーダーを利用すれば、単一のビームから三次元風速と乱流強度の推定も可能となる。



## アウトライン

- 背景・目的
- **スペクトル観測理論**
- レーダーインバージョン(RI)法
- 乱流スペクトル幅の推定
- 風速の推定
- まとめ

## スペクトル観測理論(1) Nishimura et al., 2020



## スペクトル観測理論(2)

- 【仮定】**  
観測体積内の任意の二点において
- 乱流散乱関数( $f$ )は無相関
  - 乱流散乱関数( $f$ )のパワースペクトルが等しい

受信波の相関関数

$$R(\tau) = E \left\{ \sum_k f_{k_1}^*(t) g_{k_1}(t) w(t+\tau) \right\} \times \left\{ \sum_k f_{k_2}(t+\tau) g_{k_2}(t+\tau) w(t+\tau) \right\} dt$$

$$= E \int \sum_k \sum_{k'} f_{k_1}^*(t) f_{k_2}(t+\tau) \times g_{k_1}^*(t) g_{k_2}(t+\tau) w^*(t) w(t+\tau) dt$$

$$= \int \sum_k \sum_{k'} E [ f_{k_1}^*(t) f_{k_2}(t+\tau) ] \times g_{k_1}^*(t) g_{k_2}(t+\tau) w^*(t) w(t+\tau) dt$$

Annotations: 矩形窓関数, 往復のビームパターン, 乱流散乱関数, ガウス関数と仮定

### スペクトル観測理論(3)

$$R(\tau) = F(\tau) G(\tau) W(\tau)$$

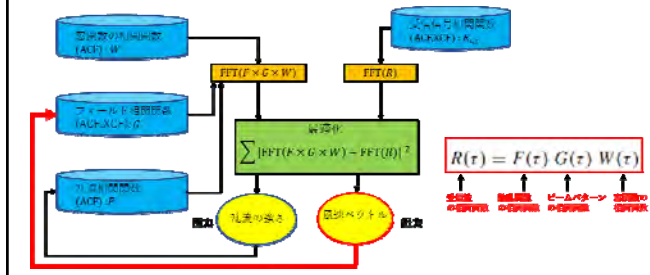
↑  
受信波の相関関数  
↑  
散乱関数の相関関数  
↑  
ビームパターン  
の相関関数  
↑  
窓関数の相関関数

- $F(\tau)$ : 乱流の強さを分散にもつ相関関数
  - $G(\tau)$ : ビームパターンと風速から導かれる相関関数
- 未知パラメータは逆問題を解くことで推定可能

### アウトライン

- 背景・目的
- スペクトル観測理論
- レーダーインバージョン(RI)法
- 乱流スペクトル幅の推定
- 風速の推定
- まとめ

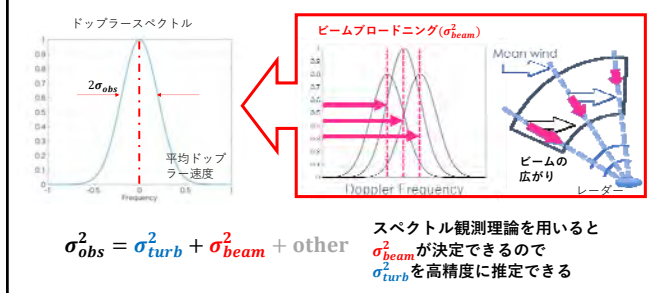
### レーダーインバージョン(RI)法



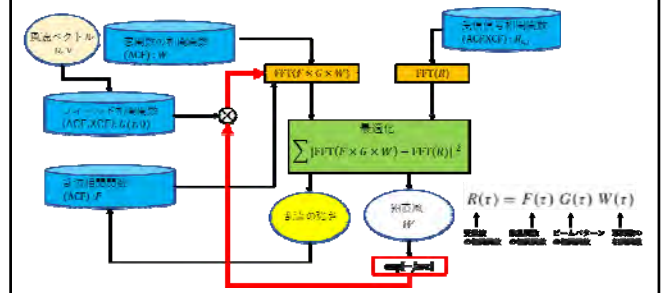
### アウトライン

- 背景・目的
- スペクトル観測理論
- レーダーインバージョン(RI)法
- 乱流スペクトル幅の推定
- 風速の推定
- まとめ

### 乱流スペクトル幅の推定(デブロードニング)



### デブロードニングのための高速化



### 相関関数の高速推定アルゴリズム(1)

$\omega = \frac{4\pi}{\lambda} w \cos \theta$  [rad/s]  
 $w = u \tan \theta$  [m/s]

フィールド相関関数  $G(\tau, \varphi)$  は計算コストが大きい  
ため、鉛直成分を分離する近似を適用する。

$$G(\tau, \varphi) \sim G(\tau, 0) \exp[-j\omega\tau]$$

これにより  $G(\tau, \varphi)$  の再計算なしで繰り返し最適化が可能となる。

**[用語]**

- $\varphi$ : 伏角
- $\theta$ : ビームの傾き

### 相関関数の高速推定アルゴリズム(2)

近似計算の妥当性の検証

$$\omega = \frac{4\pi}{\lambda} u \tan 5^\circ \cos \theta$$

$$G(\tau, 5^\circ) \sim G(\tau, 0^\circ) \exp[-j\omega\tau]$$

### 相関関数の高速推定アルゴリズム(3)

近似式  $G(\varphi) \sim G(0) \exp[-j\omega\tau]$  の精度検証

RMSE antenna G01G01, height 2000m

RMSE を計算

伏角 ( $\varphi$ ) が小さい場合は高い精度で成立する。

### RI法による乱流スペクトルの推定結果

サブアレーの組み合わせ

- 乱流スペクトルの推定プログラムは安定動作するようになった。
- 推定精度については検証中。

### アウトライン

- 背景・目的
- スペクトル観測理論
- レーダーインバージョン(RI)法
- 乱流スペクトル幅の推定
- **風速の推定**
- まとめ

### 風速の推定アルゴリズム

3つ以上のチャンネルから得られる相互相関関数(XCF)を用いる

現在実装中のプログラム

## まとめ

- スペクトル観測理論に基づくインバージョン法(RI)
- RI法による乱流スペクトル幅の推定(デブロードニング)
  - 鉛直風の分離による高精度アルゴリズムの実装
- RI法による風速の推定
  - 高速計算アルゴリズムの開発・実装中