

南極昭和基地大型大気レーダーによる 電離圏沿磁力線不規則構造の観測

Imaging Observation of Ionospheric Field Aligned Irregularities
by the PANSY radar at Antarctic Syowa Station

2024/2/26

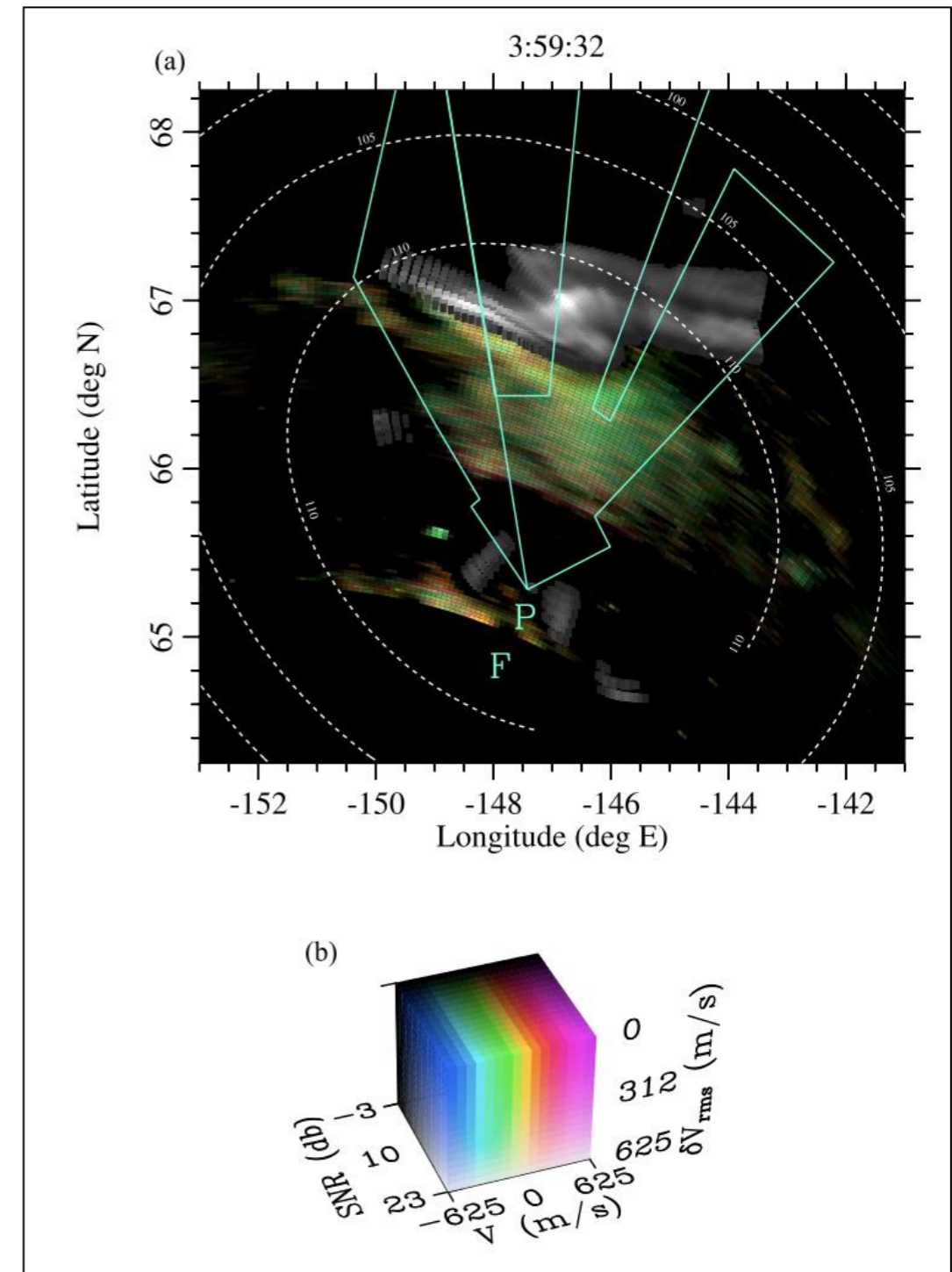
香川大輔¹、橋本大志²、齊藤昭則¹、西村耕司³

1: 京都大学大学院理学研究科、2: 国立極地研究所、3: 京都大学生存圏研究所

研究対象

沿磁力線不規則構造 (Field Aligned Irregularity; FAI)

- プラズマ密度の疎密構造が磁力線直交方向にできる現象
- プラズマ不安定性 (e.g. Farley-Buneman 不安定、gradient drift 不安定) により引き起こされる
 - 電場やプラズマ密度勾配によりプラズマ不安定性が発生する [Hysell et al. (2000)]
- FAI がレーダー電波の半波長の空間スケールを持つ場合、レーダー電波はコヒーレント散乱を起こし、地磁気の磁力線とレーダー電波が直交するところで強い反射波 (エコー) を生じる



Alaska の Homer レーダー (30MHz) による、
北極域 (64°~68° Lat.) E 領域 FAI の観測
[Hysell et al. (2012), Figure3]

南極昭和基地大型大気レーダー（PANSY レーダー）

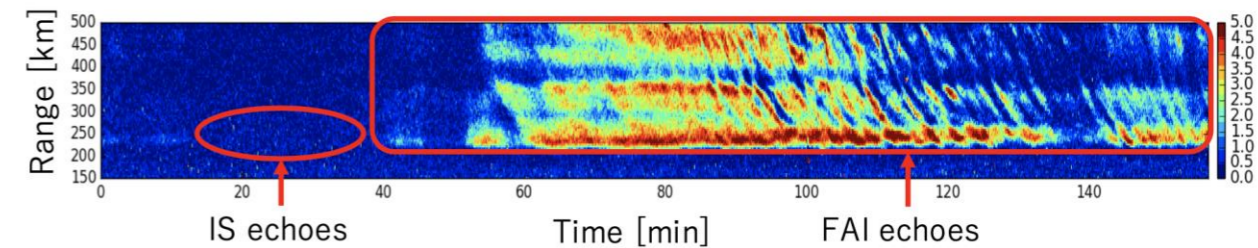
Program of Antarctic Syowa MST/IS radar (69.01°S, 39.59°E)

- VHF 帯（47MHz）フェーズドアレイレーダーで、電離圏電子密度 (Incoherent Scatter; IS) 観測が可能
- Hashimoto et al. (2019) では、この IS 観測における FAI エコー混入による干渉を除去するため、**FAI アレイ** を用いた多チャンネル信号処理技術を開発し、IS エコーと FAI エコーを分離した
→ FAI 観測に主眼を置いて同様の手法を用いれば、E 領域 FAI の運動を観測することが可能

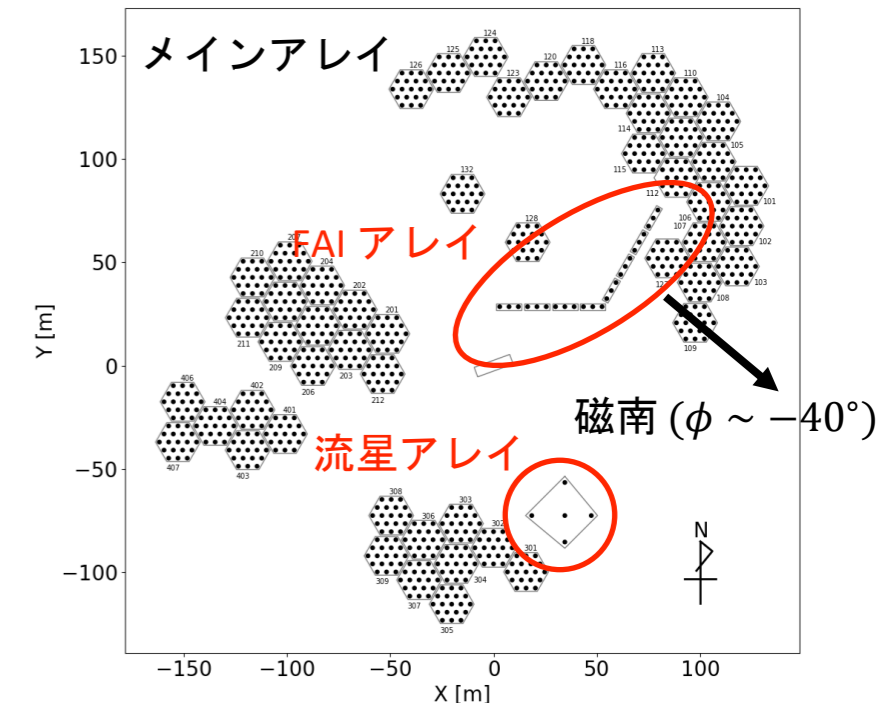
PANSY レーダー アレイ構成

アレイ名称	アンテナ本数	アンテナ配置	本研究での使用
メインアレイ	1045 本	平面状	×
FAI アレイ	24 本	直線状アレイ (12本/組) が二組	○ (うち6本使用)
流星アレイ	5 本	Jones' array *	○

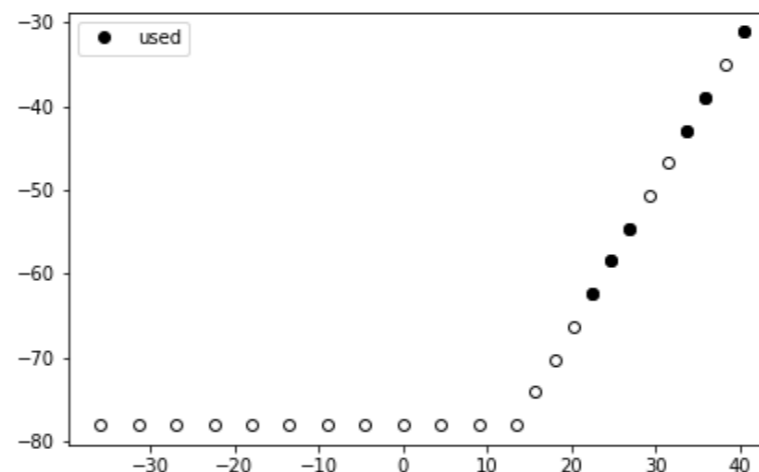
* : Jones et al. (1998)



IS 観測における E 領域 FAI エコーの混入



PANSY レーダー アンテナ配置図



FAI アレイ アンテナ配置図
(● : 使用アンテナ)



PANSY レーダー

研究の背景・目的・方法

背景

- 南極域では、SuperDARNによりE領域FAIの二次元構造観測が行われていたが、現在は行われておらず、FAIの詳細な二次元構造も明らかになっていない
- PANSYレーダーでは、E領域FAIの解析に主眼を置いた研究はされてこなかった

目的

- PANSYレーダーによるE領域FAIのイメージング観測を行い、FAIの発生・消滅、空間構造を調べる

方法

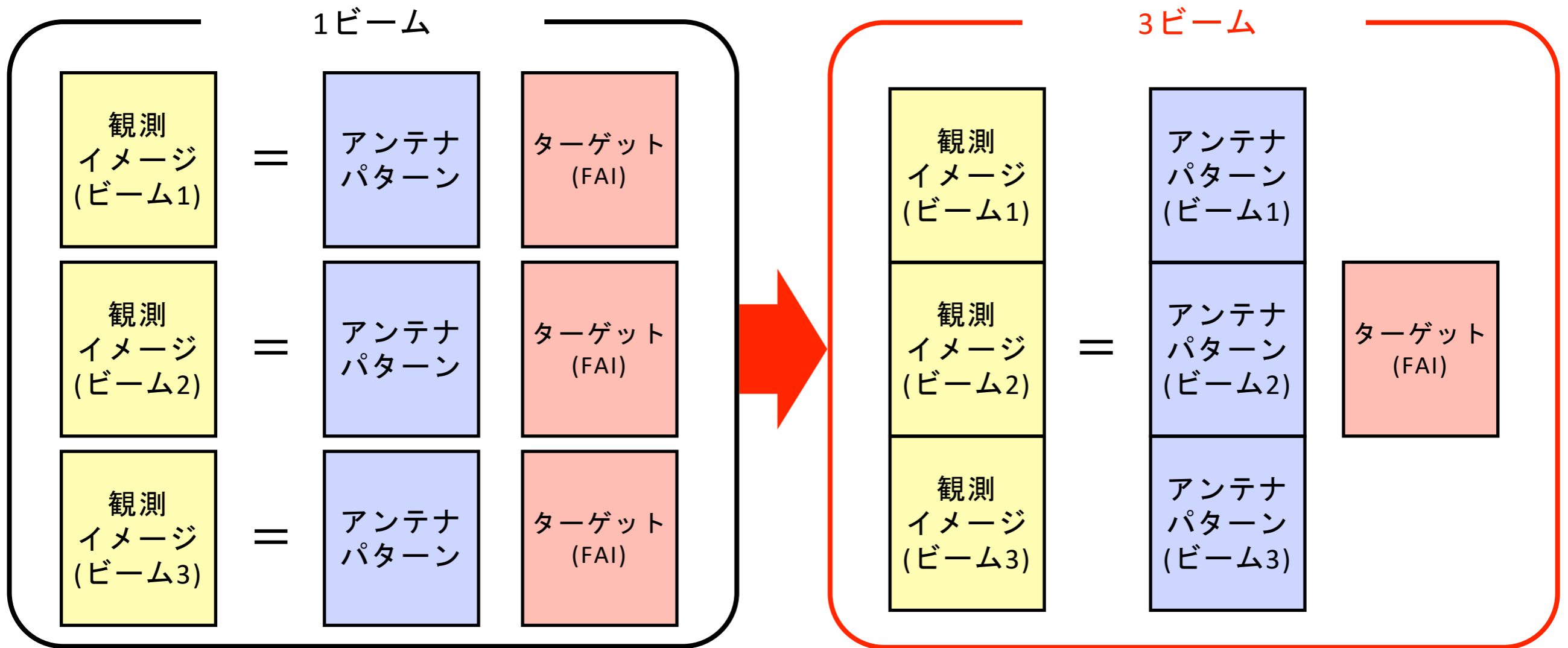
- FAIの真の空間構造を推定するため、アンテナパターンの影響を抑圧しつつ高分解能にイメージングできる手法を適用する
- PANSYレーダーでのFAI観測にはFAIアレイと流星アレイを用いることができるが、**アンテナ素子間隔が大きくグレーティングローブが発生するため、FAIの空間構造推定に不確実性が生じる**
- まず**CLEAN法**という、観測イメージの最大強度の点に着目したデコンボリューションを行ったが、グレーティングローブ等のアンテナパターンの影響を抑圧しきれず、FAIの空間構造を正しく推定できなかった
- **逆問題の定式化**を行い、**マッチング追跡**という手法を採用したため、本発表ではそのシミュレーション結果、および観測で得られた実データへの適用結果を示す

逆問題の定式化

観測イメージから FAI 空間構造を推定する逆問題において、サイドローブ形状の異なる3つの送信ビーム全てで一貫する解を探索することで、偽像を防ぐことができる

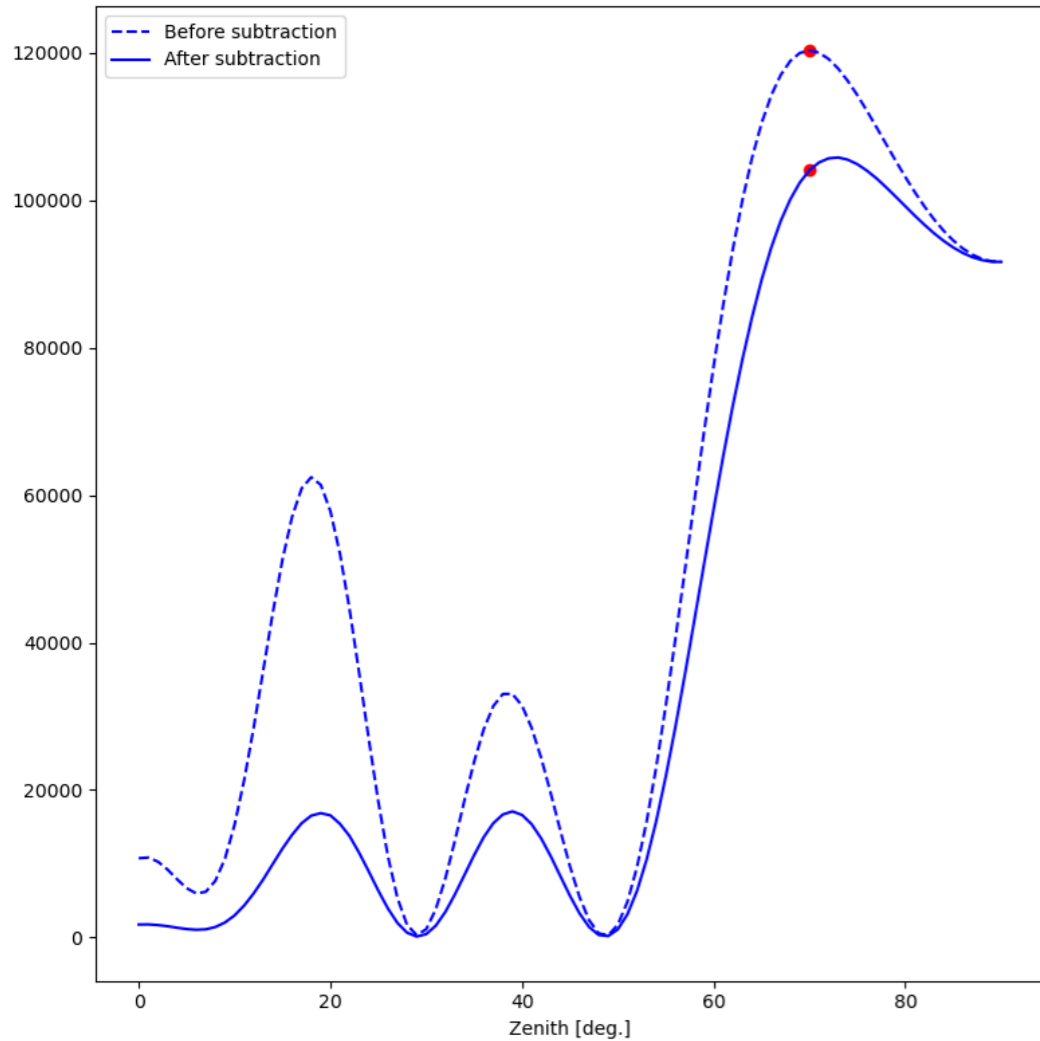
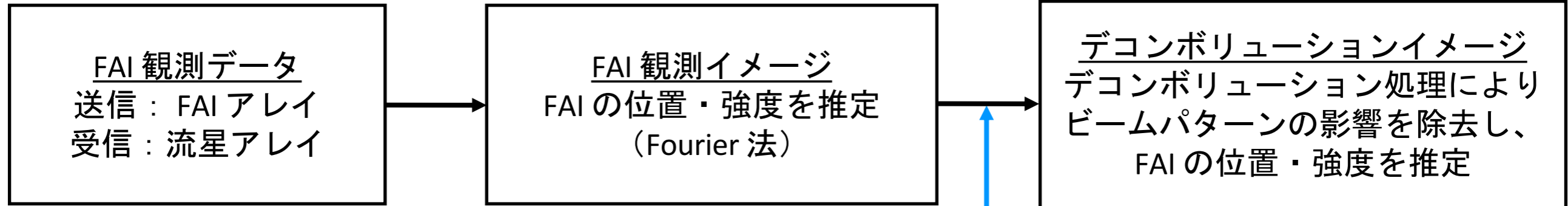
$$y = Hx$$

観測イメージ (既知) アンテナパターン (既知) ターゲット (未知)



手法：マッチング追跡

デコンボリューション処理手順



マッチング追跡における、観測イメージ（点線）と送受パターンの積を差し引いた後の残差イメージ（実線）
（●：ターゲット位置）

CLEAN 法では、
観測イメージ上で
最大の点を同定する

マッチング追跡

- 送信 3 ビーム全てで一貫するように、以下①・②の相関係数が最大である点を一つ同定
 - 各送信ビームの観測イメージ
 - (2) で差し引く送受パターンの積
- 送受パターン（以下③・④）の積を FAI 観測イメージから差し引き、残差イメージを作成する。
 - FAI アレイの送信パターン（送信ビームごとに異なる）
 - 流星アレイの (1) で同定した点に向けた受信パターン（送信ビームに拘らず一つ）
- (2) で作成した残差イメージに対して、(1) → (2) の処理を繰り返す

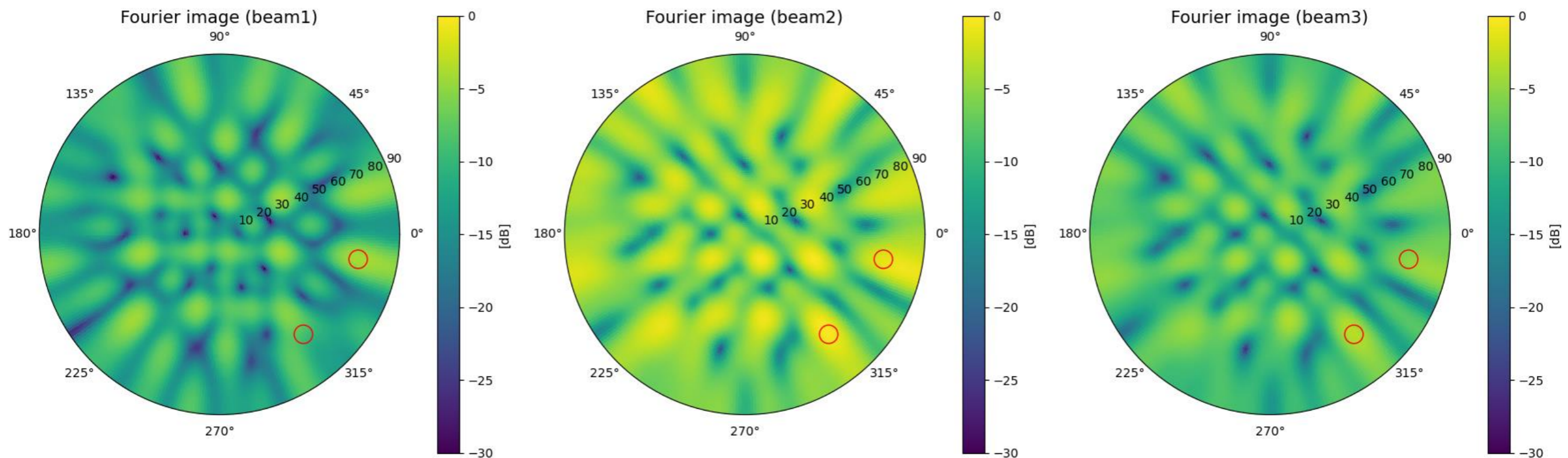
シミュレーション

- 各送信ビームに対して、Fourier 法によりターゲットの位置・強度を推定する
- Fourier イメージに対してマッチング追跡によりデコンボリューション処理を行い、アンテナパターンの影響を抑圧してターゲットの位置・強度を推定する

シミュレーション条件

FAI アレイ 送信ビーム方向	Beam1 : $(\phi, \theta) = (-40^\circ, 60^\circ)$ Beam2 : $(\phi, \theta) = (-30^\circ, 60^\circ)$ Beam3 : $(\phi, \theta) = (-20^\circ, 60^\circ)$
分解能	$\Delta\phi = \Delta\theta = 1^\circ$
ターゲット形状	点ターゲット (ϕ, θ)

ϕ : Azimuth, θ : Zenith



Fourier 法による Zenith-Azimuth-Intensity プロット (○: ターゲット位置)

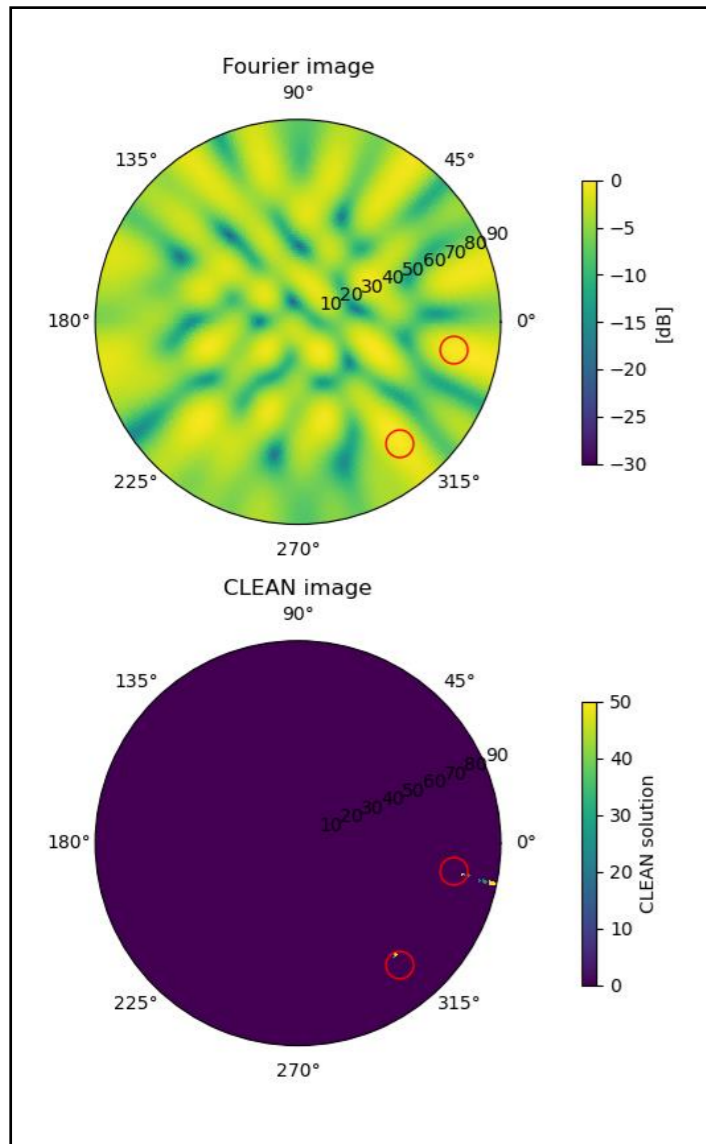
シミュレーション結果

CLEAN 法による結果（左）とマッチング追跡による結果（右）。（○：ターゲット位置）

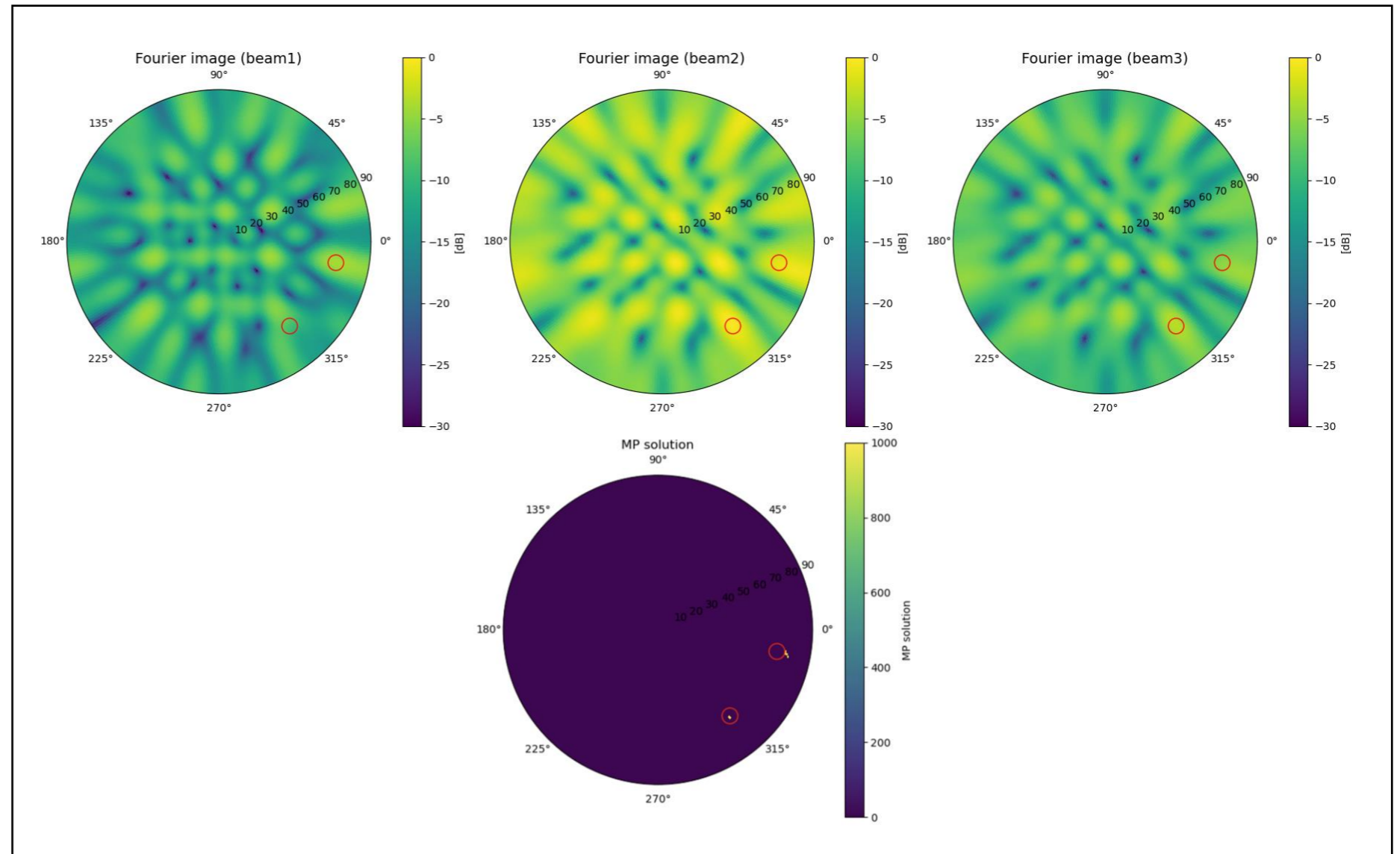
CLEAN 法ではターゲットの位置以外においても解が検出されていた。

一方、マッチング追跡では概ねターゲットの位置において解が検出され、ターゲット位置推定の精度が向上したことがわかる。

CLEAN 法

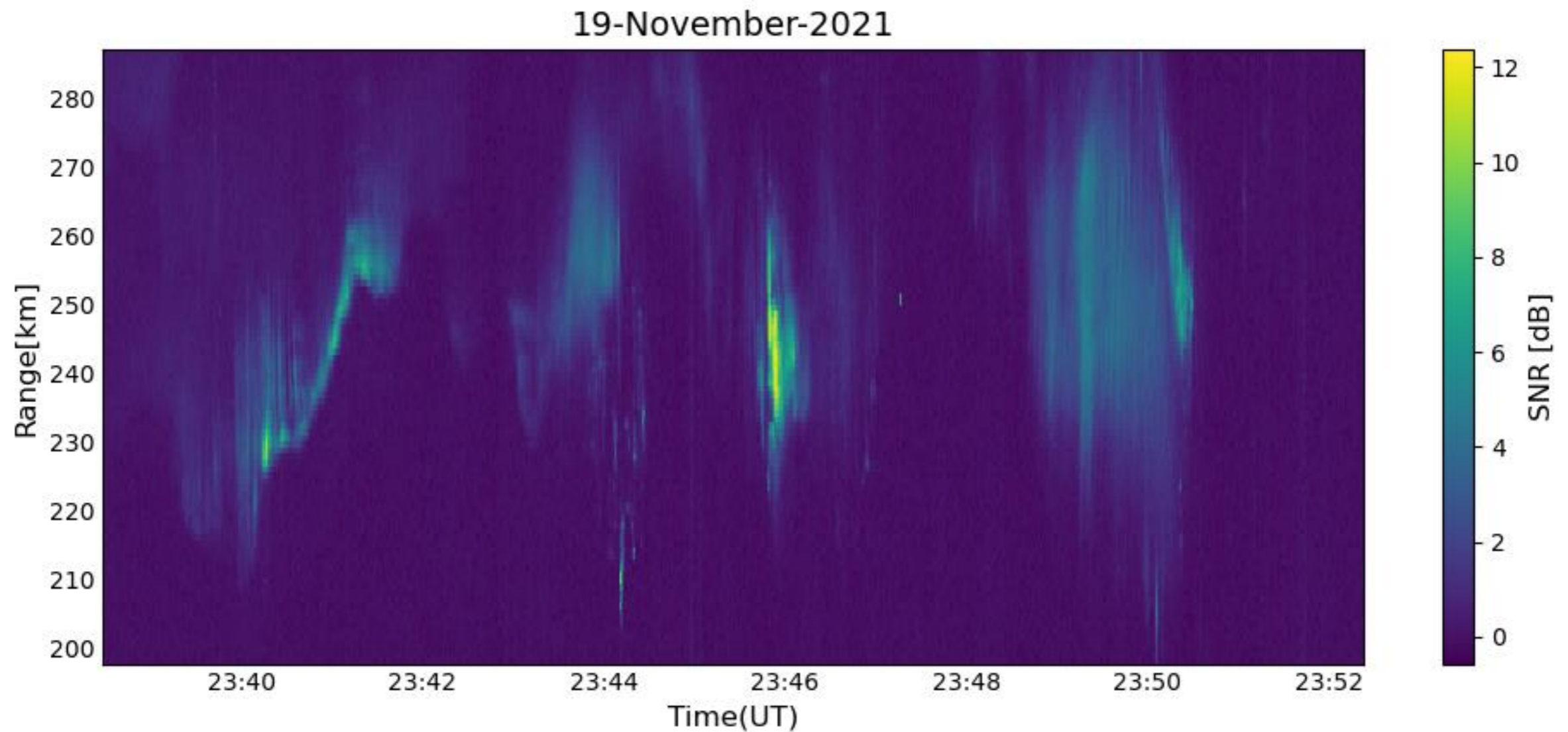


マッチング追跡



観測データ

PANSY レーダーによる FAI 観測が行われた（2021 年 11 月 19 日 23:28UT ~ 23:52UT）。観測期間中、E 領域 FAI が検出された。また、観測された FAI の中には、時間とともにレンジ方向に変化するものが見られた。



PANSY レーダーによる FAI 観測の Range-Time-Intensity プロット

観測データへの手法適用結果

得られた実データに対してマッチング追跡を適用した。

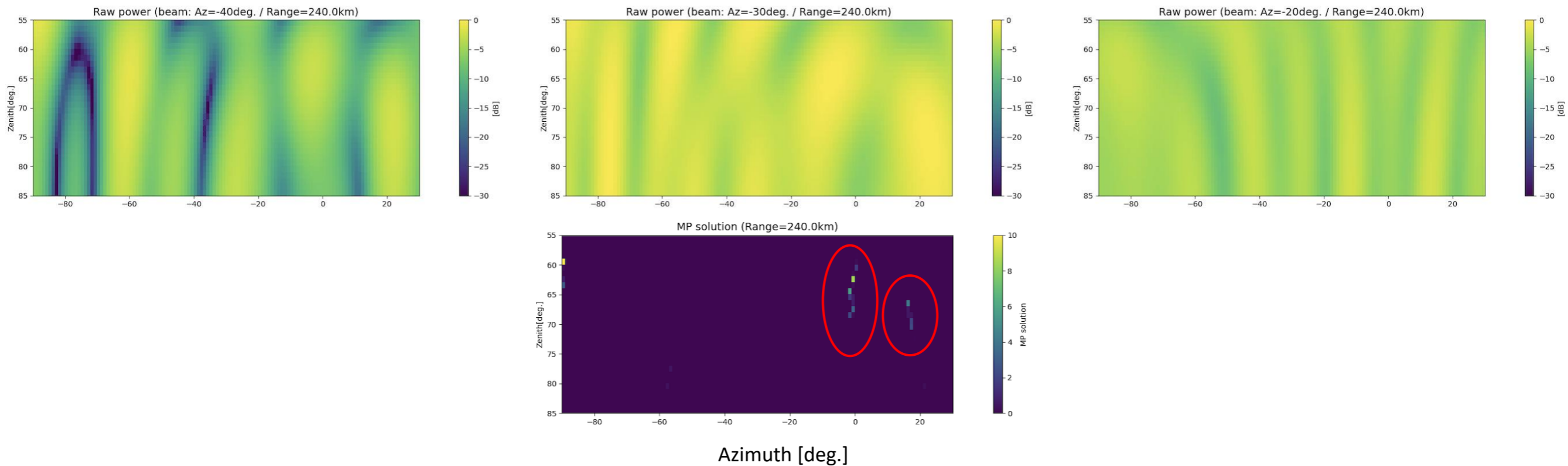
レンジ・時間ごとに、Zenith-Azimuth 断面に対してマッチング追跡を行ったところ、FAI の解を得ることができた。

また、時間方向にも同様に推定すると、FAI の解は空間的に連続であったため、得られた解は妥当であると考えられる。

FAI アレイ 送信ビーム方向	Beam1 : $(\phi, \theta) = (-40^\circ, 60^\circ)$ Beam2 : $(\phi, \theta) = (-30^\circ, 60^\circ)$ Beam3 : $(\phi, \theta) = (-20^\circ, 60^\circ)$
分解能	$\Delta\phi = \Delta\theta = 1^\circ$

ϕ : Azimuth, θ : Zenith

2021 年 11 月 19 日 23:42:23UT (Range = 240km)



PANSY レーダーによる FAI 観測の Zenith-Azimuth-Intensity プロット (上 : 実データ / 下 : マッチング追跡適用結果)

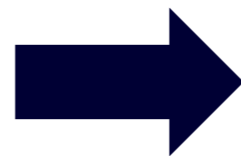
計算効率改善に関する課題

ADMMによる基底追跡への変更

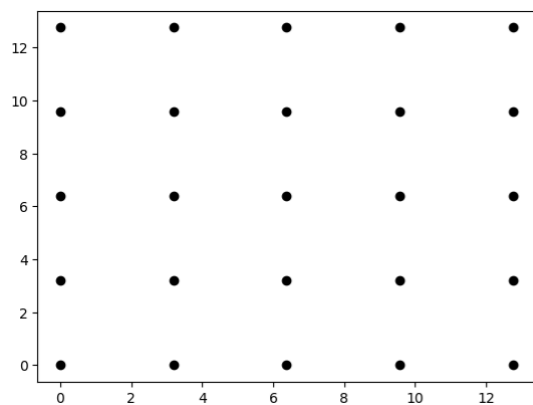
- CLEAN、マッチング追跡 (Matching Pursuit; MP) は、Fourier法イメージからビームパターンを差し引く方式のため、計算コストが高い (相関を計算するMPで顕著)
- 凸最適化問題の効率的な解法であるAlternating Direction Method of Multipliers (ADMM) による基底追跡 (Basis Pursuit; BP) へ変更を検討
- Python→Mojoへの移行 (コンパイル、GPUの利用)
- シミュレーションによる動作確認を実施中

$$A^\dagger = A^H (AA^H)^{-1}$$

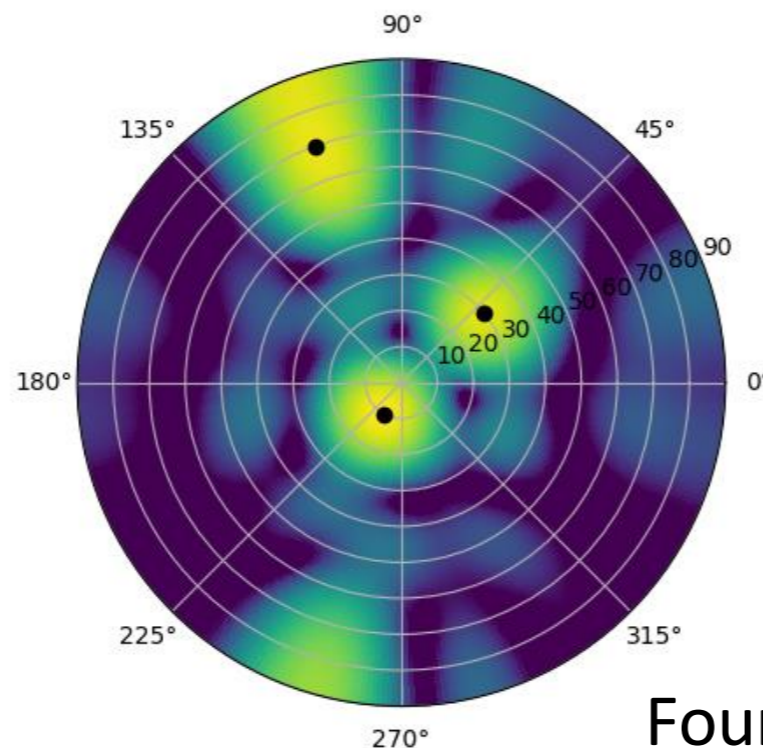
$$\begin{aligned} & \underset{x}{\text{minimize}} \quad \|x\|_1 \\ & \text{subject to} \quad y = Ax \end{aligned}$$



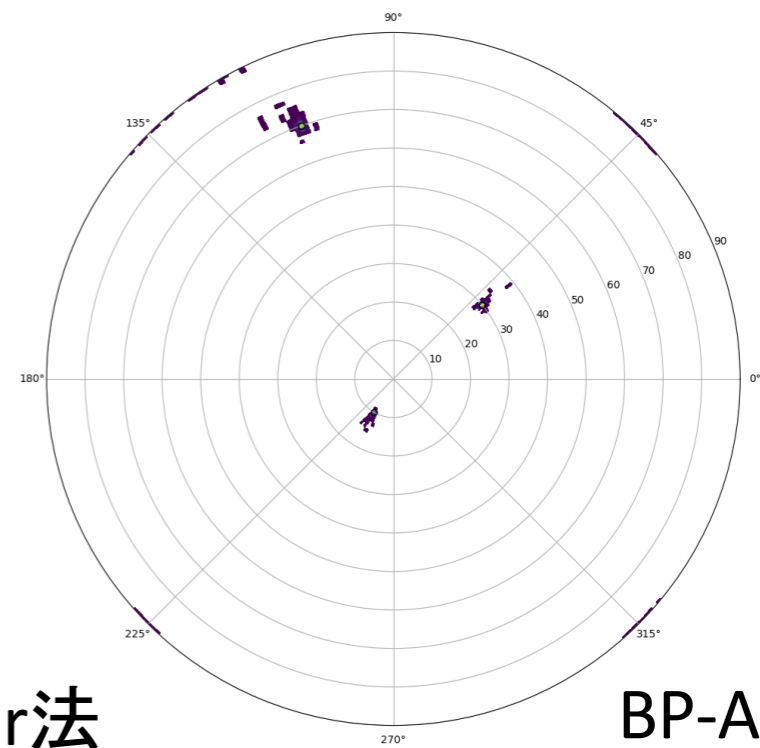
$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A^\dagger y + (I - A^\dagger A)(z_k - u_k) \\ z_{k+1} &= S_\lambda(x_{k+1} + u_k) \\ u_{k+1} &= u_k + (x_{k+1} - z_{k+1}) \end{aligned}$$



アンテナ配置



Fourier法



BP-ADMM

まとめ

- 本研究の目的は、PANSY レーダーによる E 領域 FAI のイメージング観測を行い、FAI の発生・消滅、また空間構造について調べることである。
- しかし、使用アレイのアンテナ配置ではグレーティングローブが生じるため、空間構造の推定に不確定性が発生するという課題がある。
- これまでは CLEAN 法に基づき観測イメージの強度が最大となる点のみに着目していたが、アンテナパターンに起因する偽像を抑圧しきれなかった。
- 本発表では、観測イメージと最も相関係数の大きい送受パターンの積を差し引く **マッチング追跡**に基づいたデコンボリューションを行った。
- その結果、シミュレーションにより偽像を抑圧し、かつ高分解能に FAI の空間分布を推定できることを確認した。また、実データにも手法を適用し、妥当な推定結果が得られた。
- 今後は実データから、レンジ方向にも拡張した FAI の空間構造変化を調べる。しかし、現状はマッチング追跡の計算コストが大きいという課題があるため、計算効率を向上させる検討を行う。