

海洋レーダにおける移動目標検出に関する実験報告

松田 暁^[1] 山田 寛喜^[1] 藤井 智史^[2] 長名 保範^[3] 有馬 卓司^[4] 宇野 亨^[4]

^[1]新潟大学大学院 自然科学研究科

^[2]琉球大学 工学部

^[3]熊本大学 半導体・デジタル研究教育機構

^[4]東京農工大学大学院 工学研究院

1. 研究背景

2. 研究目的

3. キャリブレーション

3. 1 計測方法(水平, 垂直)

3. 2 計測・解析結果(水平, 垂直)

4. Beamformer法による到来方向推定

4. 1 解析方法

4. 2 計測方法(航空目標, 船舶目標)

4. 3 計測・解析結果(航空目標, 船舶目標)

5. まとめ

海洋観測のための研究

■海象計やGPS波高計を用いて、自然環境の変化に伴う災害に対応するために観測が行われているが、点計測であるため、海域の情報を空間で把握することは困難である。

■海洋レーダは海域を空間で把握することできる利点から、海域観測を行う研究に利用されている。

[1] 土木学会海岸工学委員会編, 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 土木学会、2001 年

移動目標検出用レーダとしての研究

■地表波及び電離層反射波を利用した見通し外領域の移動目標の検出

[2]Giuseppe Aureliano Fabrizio,” High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications” Chapter4 Conventional Processing 2013

■既存の海洋レーダを用いた移動目標の検出に関する研究

[3]宇野亨, 山田寛喜, 藤井智史, 赤井秀樹”既存海洋レーダを用いた航空機検知の調査検討”海洋レーダ研究集会2015



■海洋レーダは、広い海域を観測しつつ、航空機等の移動目標を検出できるマルチユース化が期待できる。海洋レーダは長時間の積分を行っているため、加減速する移動目標の信号は、R-Dmap上でドップラ方向に拡がるため検出性能が低下する。

2. 研究目的

3/18

■海洋レーダは、広い海域を観測しつつ、航空機等の移動目標を検出できるマルチユース化が期待できる。しかしながら、海洋レーダは長時間の積分を行っているため、加減速する移動目標は、R-Dmap上では信号がドップラ方向に拡がるため検出性能が低下する。



■到来方向推定によるR-DOAmapを求めることにより、移動目標検出の性能向上に関する検討を行う。

3. 1 計測方法

4/18



外観



新潟大学工学部棟屋上に海洋レーダを設置



素子配置



- ・海に近く, 波浪情報の観測が可能
- ・航空機が頻繁に往来
- ・多数の船舶が付近を航行

3. 1 計測方法(水平偏波)

5/18

実験諸元

ULA : Uniform Linear Array

観測日時, 場所	2023年9月23日6時34分 新潟大学工学部棟
アレー形状	ULA
受信素子数	4
中心周波数	24.515 MHz
素子間隔	6.3 m (約 0.52λ)
掃引周波数	100 kHz
掃引時間	0.5 sec.
総掃引回数	1152(解析:100)
観測時間	約10 min.



送信素子



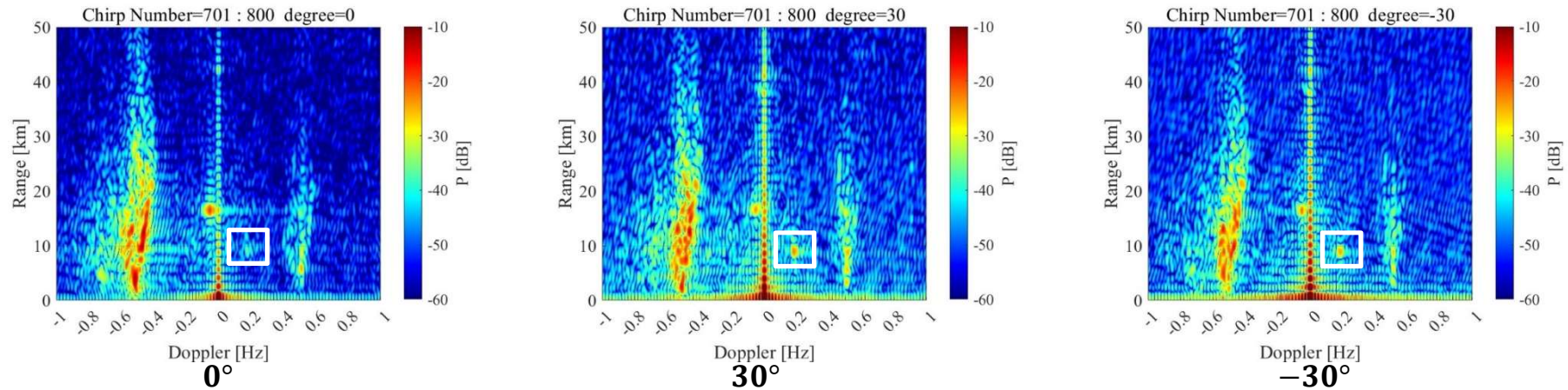
受信素子

- ・送信エレメントを45°傾けた直線偏波送信
- ・垂直4素子, 水平4素子の同時偏波 8chで観測可能

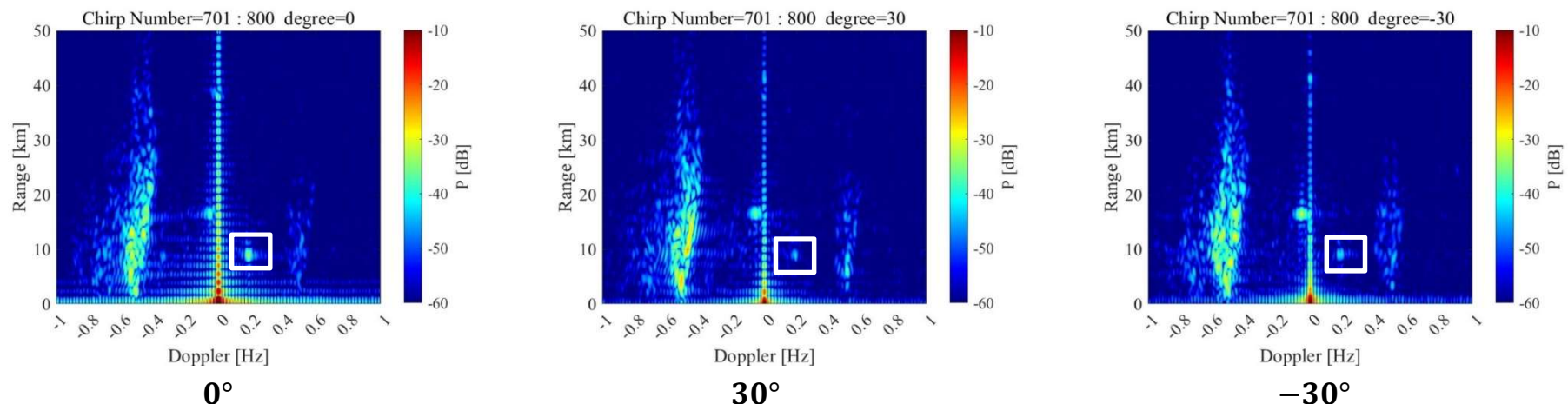
3. 2 計測・解析結果(水平偏波)

6/18

■キャリブレーション前のR-DMAP



■キャリブレーション後のR-DMAP



■キャリブレーションにより0°方向にビームを指向したときの船舶目標の信号が高くなることが確認できる。

3. 1 計測方法(垂直偏波)

7/18

実験諸元

ULA : Uniform Linear Array

観測日時, 場所	2023年9月23日5時9分 新潟大学工学部棟
アレー形状	ULA
受信素子数	4
中心周波数	24.515 MHz
素子間隔	6.3 m (約 0.52λ)
掃引周波数	100 kHz
掃引時間	0.5 sec.
総掃引回数	1152(解析:100)
観測時間	約10 min.



送信素子



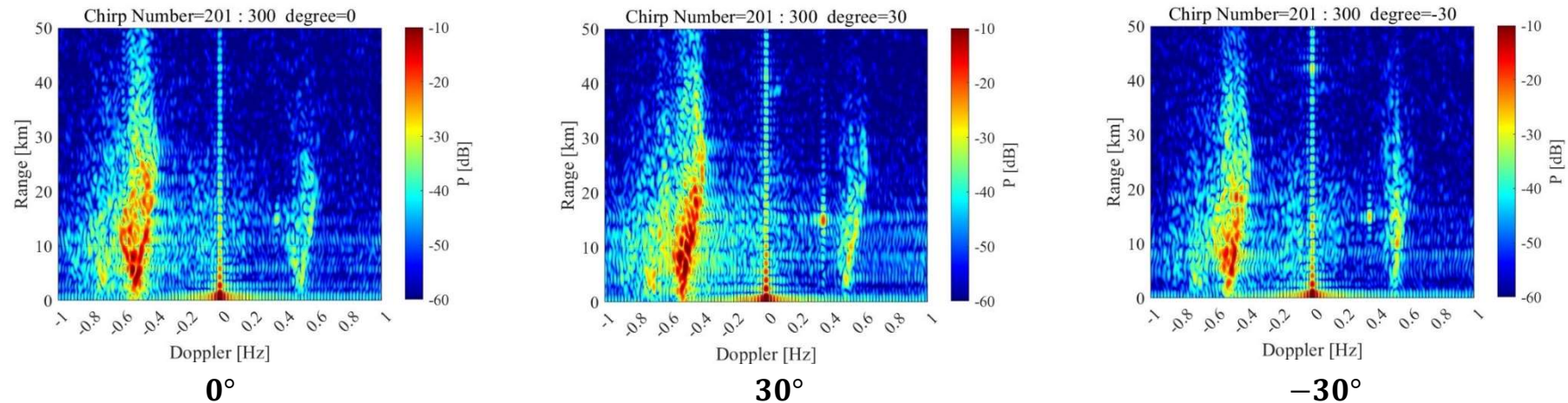
受信素子

- ・送信エレメントを45°傾けた直線偏波送信
- ・垂直4素子, 水平4素子の同時偏波 8chで観測可能

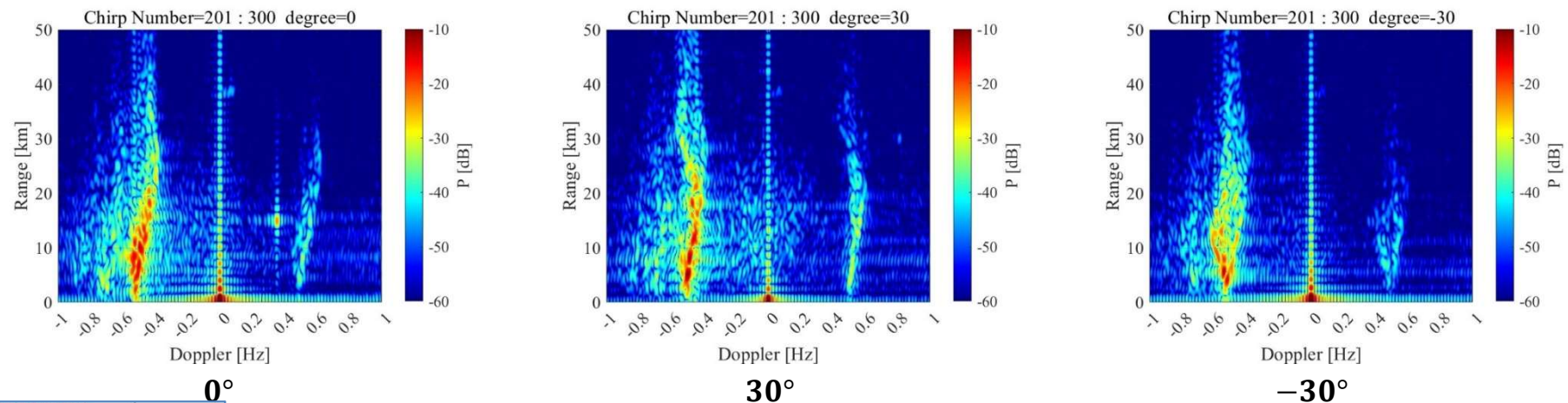
3. 2 計測・解析結果(垂直偏波)

8/18

■キャリブレーション前のR-DMAP



■キャリブレーション後のR-DMAP



■キャリブレーションにより0°方向にビームを指向したときの船舶目標の信号が高くなることを確認できる。

4. 1 解析方法

9/18

■受信信号(ビート信号)



ファストタイム方向に
フーリエ変換

■レンジ・チャープ列のマトリクス



■KR(Khatri-Rao)積 仮想アレー処理



Beamformer 法により
DOA推定

■R-DOAmap(DOA推定)

KR積拡張受信信号

受信相関行列

$$\mathbf{R}_{xx} = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} \mathbf{x}(t_k) \mathbf{x}(t_k)^H, \mathbf{x} = [x_1 \quad \cdots \quad x_4]^T$$

対角要素を平均化することにより誤差の低減

$$\bar{\mathbf{R}}_{xx} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{1,1} & \cdots & \bar{x}_{1,4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{4,1} & \cdots & \bar{x}_{4,4} \end{bmatrix}, \bar{x}_{m,n} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^4 x_i x_i^*}{4} \\ \frac{\sum_{i=m}^{4-n+1} x_i x_{i-m+1}^*}{4-n+1} \\ \frac{\sum_{i=n}^{4-m+1} x_{i-n+1} x_i^*}{4-m+1} \end{cases}$$

ベクトル化演算を行うと

$$\mathbf{z} = \text{vec}(\bar{\mathbf{R}}_{xx})$$

重複要素を削除しULAと同様の素子配置に合わせて順序を変更すると

$$\hat{\mathbf{z}} = [\bar{x}_{1,4} \quad \bar{x}_{1,3} \quad \bar{x}_{1,2} \quad \bar{x}_{1,1} \quad \bar{x}_{2,1} \quad \bar{x}_{3,1} \quad \bar{x}_{4,1}]^T$$

\mathbf{R}_{xx} : 受信データの相関行列, N_s : サンプル数, $\mathbf{x}(t_k)$: 時刻 t_k にサンプルされた受信データ
 $[\cdot]^H$: エルミート転置, $[\cdot]^T$: 転置

4. 1 解析方法

10/18

■受信信号(ビート信号)



ファストタイム方向に
フーリエ変換

■レンジ・チャープ列のマトリクス



■KR(Khatri-Rao) 積仮想アレー処理



Beamformer 法により
DOA推定

■R-DOAmap(DOA推定)

アレーアンテナのメインローブを走査することで、
出力電力が大きくなる方向を探す手法

空間スペクトラム $P_{BF}(\theta)$

$$P_{BF}(\theta) = \frac{\hat{\mathbf{a}}(\theta)^H \hat{\mathbf{R}}_{zz} \hat{\mathbf{a}}(\theta)}{\hat{\mathbf{a}}(\theta)^H \hat{\mathbf{a}}(\theta)}$$

$$\hat{\mathbf{R}}_{zz} = \sqrt{\mathbf{R}_{zz}}, \mathbf{R}_{zz} = \hat{\mathbf{z}}(t_k) \hat{\mathbf{z}}(t_k)^H$$

$$\hat{\mathbf{z}} = [\bar{x}_{1,4} \quad \bar{x}_{1,3} \quad \bar{x}_{1,2} \quad \bar{x}_{1,1} \quad \bar{x}_{2,1} \quad \bar{x}_{3,1} \quad \bar{x}_{4,1}]^T$$

拡張モードベクトル $\hat{\mathbf{a}}(\theta)$

$$\mathbf{a}^* \square \mathbf{a} = \text{vec} \begin{bmatrix} 1 & \dots & e^{j\frac{2\pi}{\lambda}3d \sin\theta} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}3d \sin\theta} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$



非重複要素の1行目と1列目を抽出

$$\hat{\mathbf{a}}(\theta) = \left[e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}3d \sin\theta}, \dots, 1, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}4d \sin\theta} \right]^T$$

$$\mathbf{a}(\theta) = \left[1, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}3d \sin\theta} \right]^T$$

\mathbf{R}_{xx} : 受信データの相関行列, N_s : サンプル数, $x(t_k)$: 時刻 t_k にサンプルされた受信データ, $[\cdot]^H$: エルミート転置, $[\cdot]^T$: 転置, d : アンテナ素子間隔, $\mathbf{a}(\theta)$: 反射波のモードベクトル, \square : KR積の演算子, 列ごとのクロネッカー積

4. 2 計測方法(航空目標)

11/18

実験諸元

ULA : Uniform Linear Array

観測日時, 場所	2023年9月23日7時59分 新潟大学工学部棟
アレー形状	ULA
受信素子数	4(水平)
中心周波数	24.515 MHz
素子間隔	6.3 m (約 0.52λ)
掃引周波数	100 kHz
掃引時間	0.5 sec.
総掃引回数	1152(解析:100)
観測時間	約10 min.



送信素子

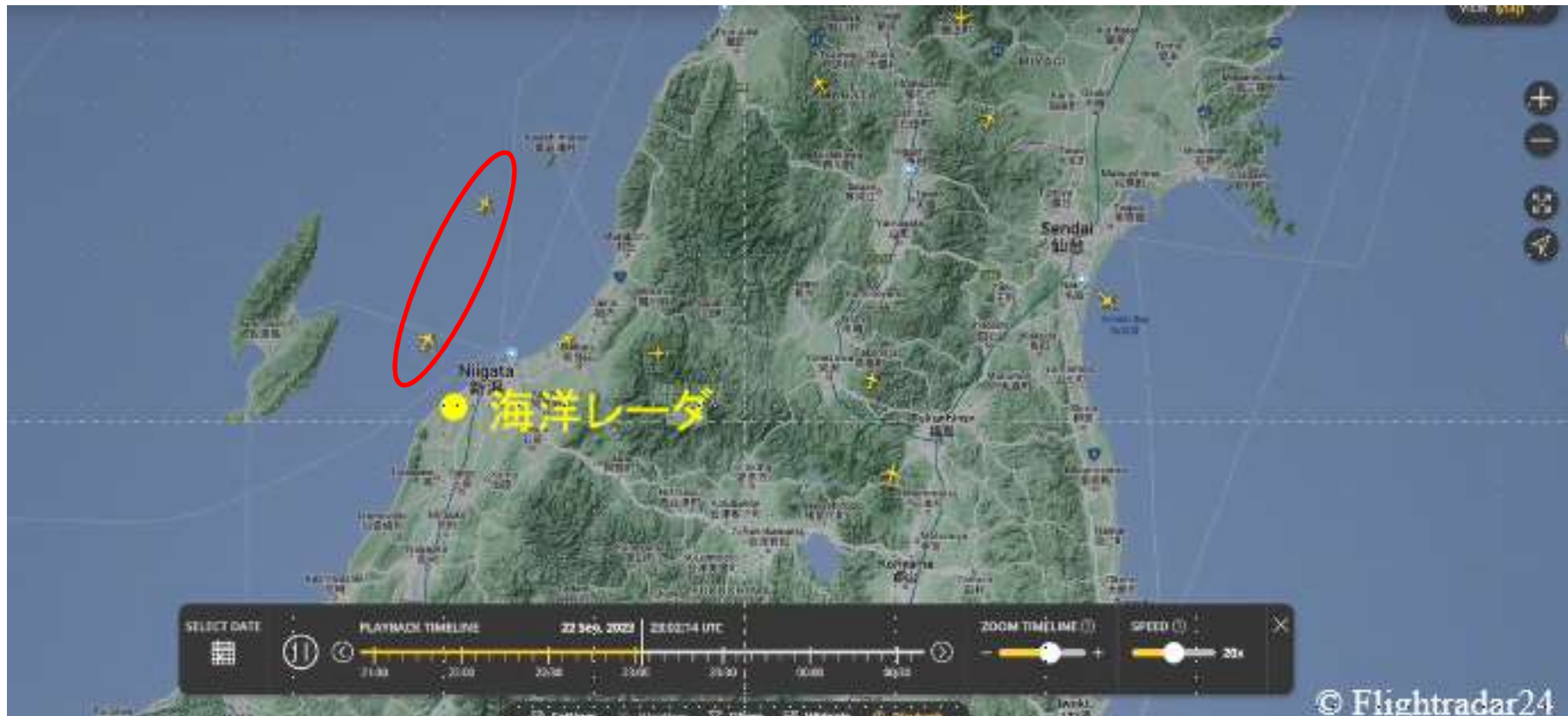


受信素子

- ・送信エレメントを45°傾けた直線偏波送信
- ・垂直4素子, 水平4素子の同時偏波 8chで観測可能

4. 2 計測方法(航空目標(ADS-B))

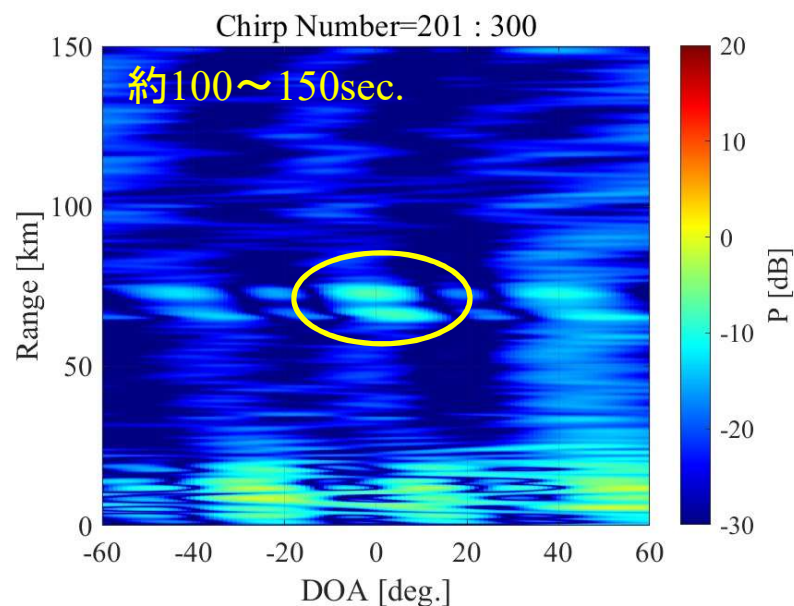
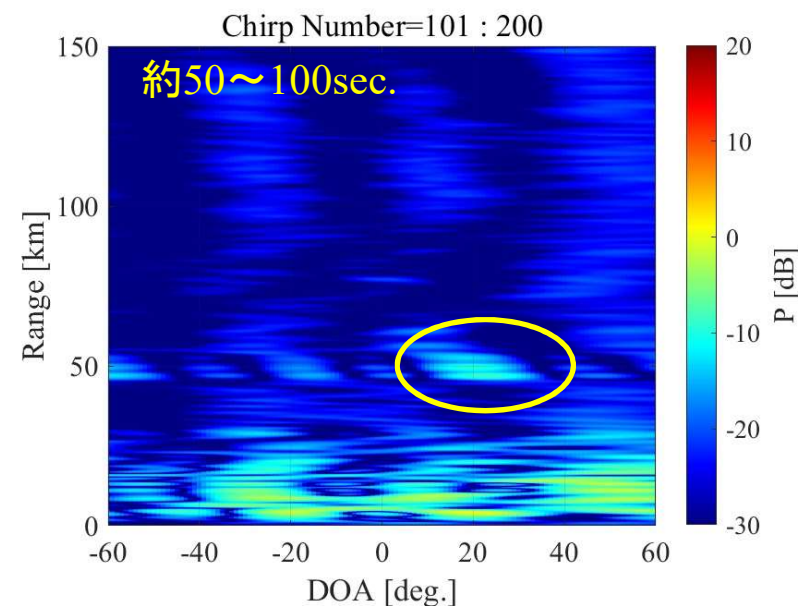
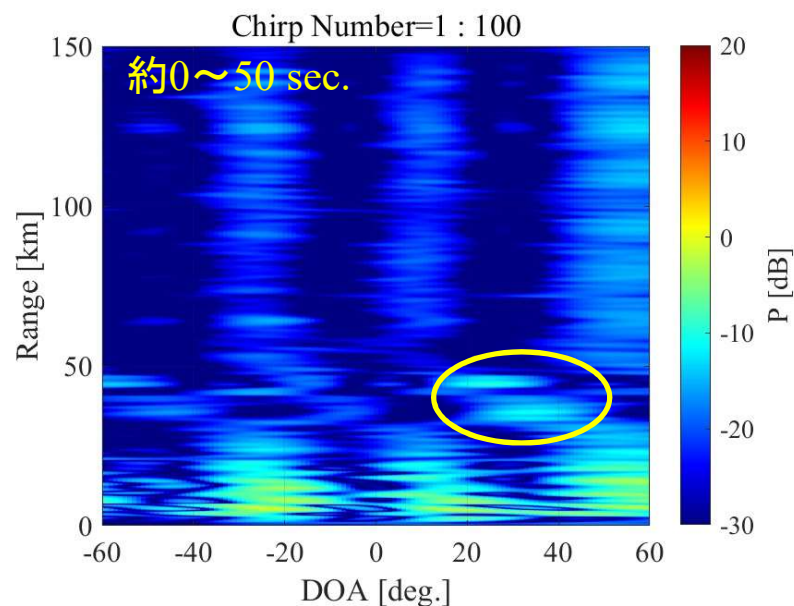
12/18



- 観測時間中に2機の航空目標が海洋レーダの観測範囲を飛行
- プラスからマイナスの方位方向へ離隔しながら飛行

4. 3 計測・解析結果(航空目標)

13/18

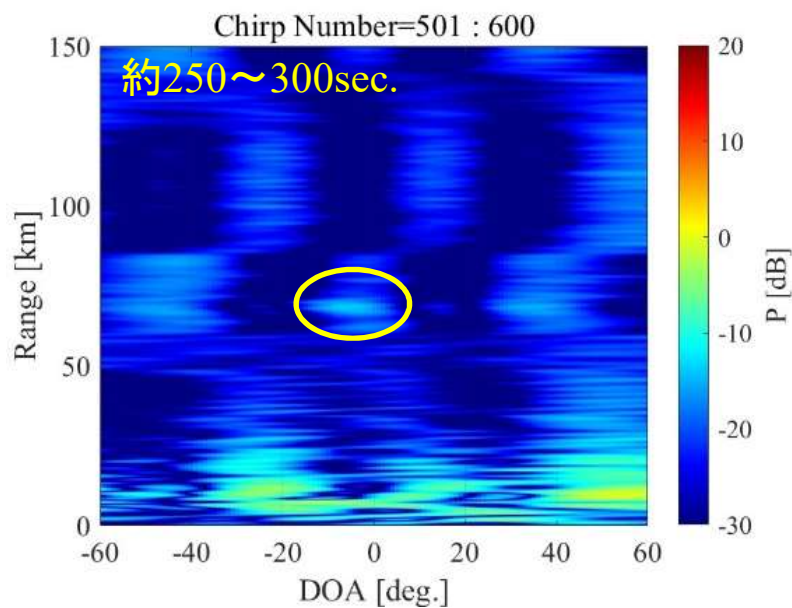
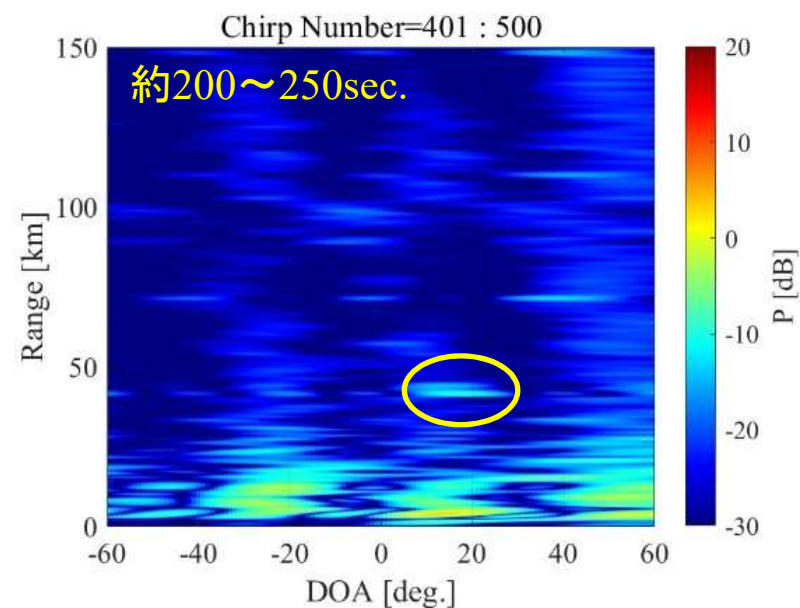
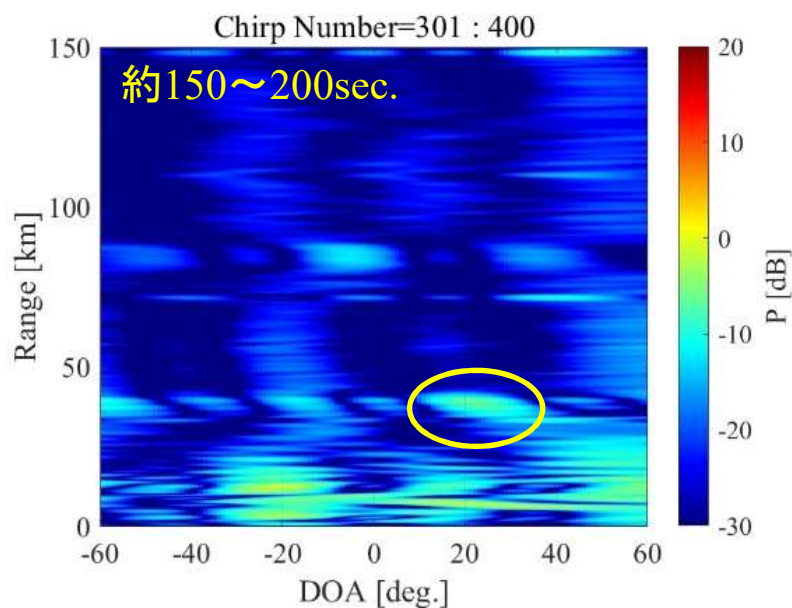


■ 航空機の信号の拡がりは抑えられている。

■ プラスからマイナスの方位方向へ離隔する移動目標が確認できる。

4. 3 計測・解析結果(航空目標)

14/18



■ 航空機の信号の拡がりは抑えられている。

■ プラスからマイナスの方位方向へ離隔する移動目標が確認できる。

4. 2 計測方法(船舶目標)

15/18

実験諸元

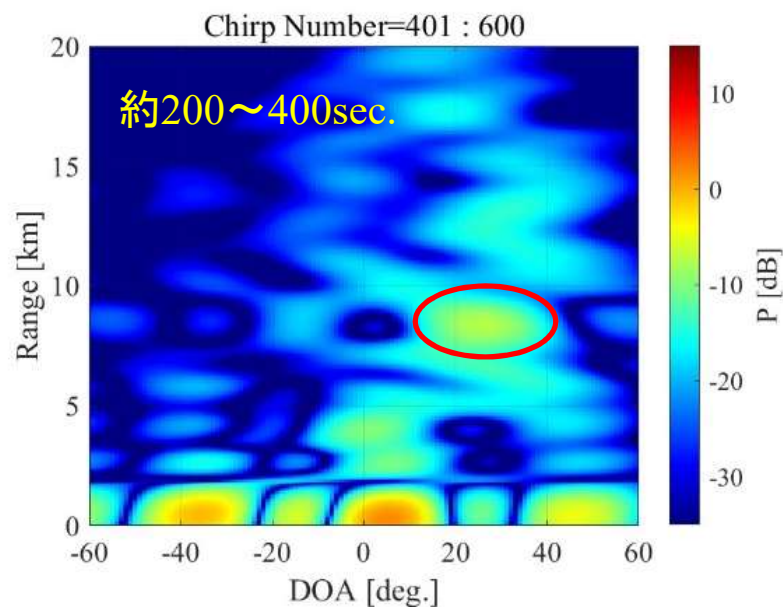
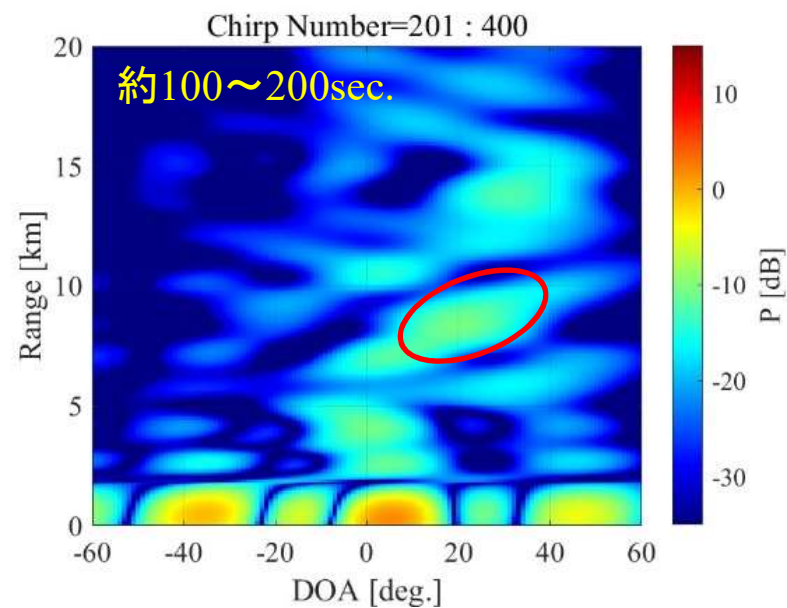
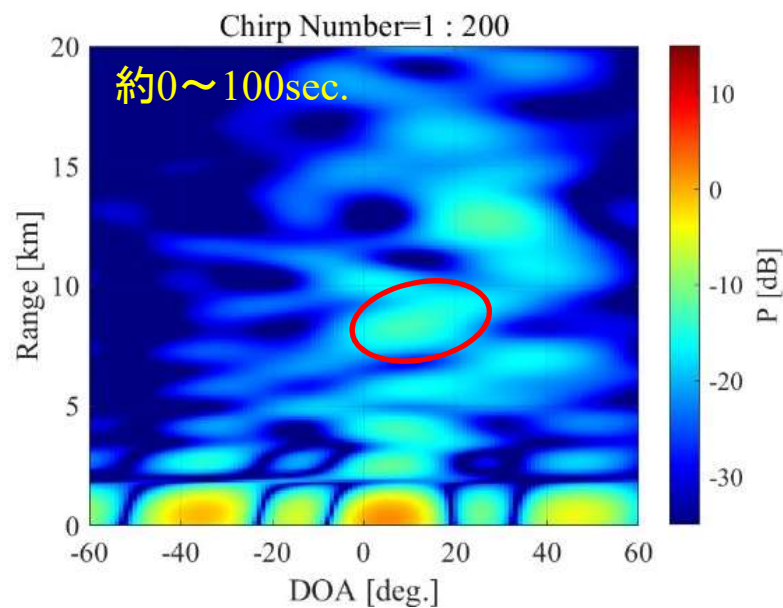
ULA : Uniform Linear Array

観測日時, 場所	2023年9月23日0時44分 新潟大学工学部棟
アレー形状	ULA
受信素子数	4(垂直)
中心周波数	24.515 MHz
素子間隔	6.3 m (約0.52 λ)
掃引周波数	100 kHz
掃引時間	0.5 sec.
総掃引回数	1152(解析:200)
観測時間	約10 min.



4. 3 計測・解析結果(船舶目標)

16/18

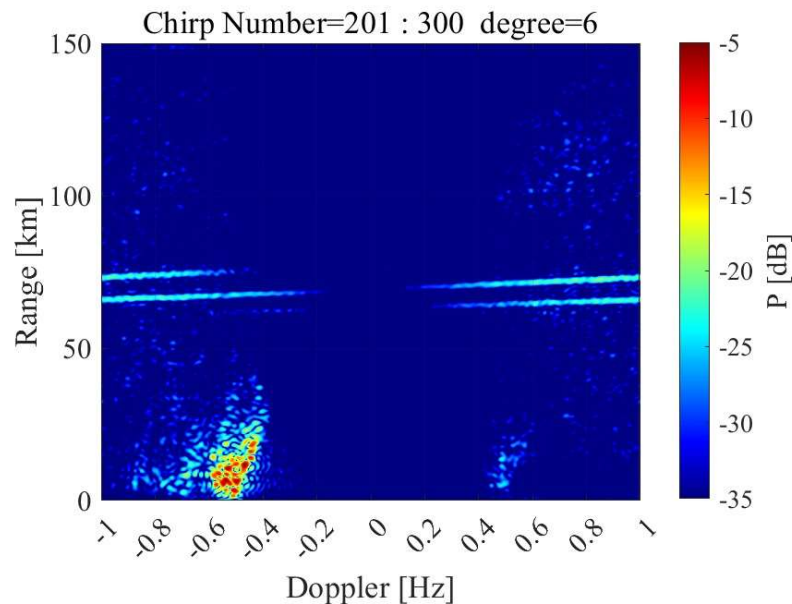


■ マイナスからプラスの方位方向へ離隔する移動目標が僅かに確認できる.

4. 3 計測・解析結果

17/18

Range-Doppler Map (航空機)



航空目標

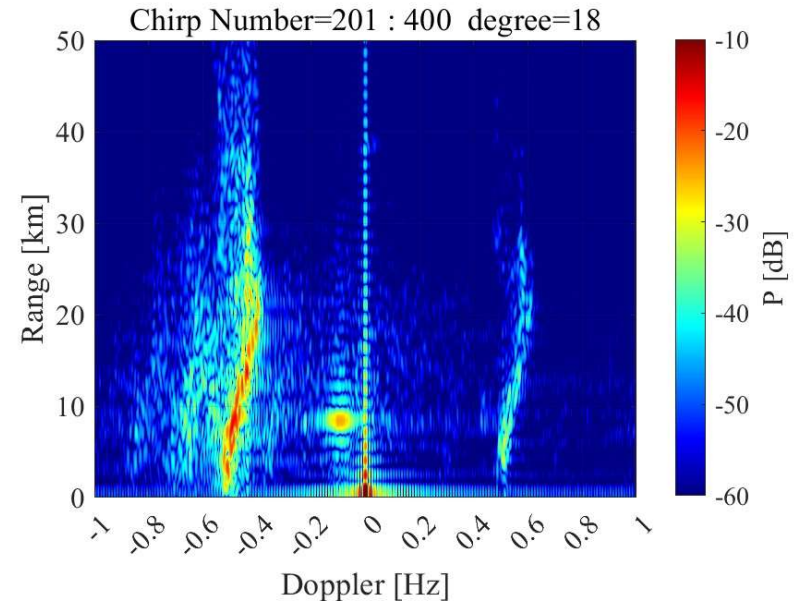
■ 波浪信号と航空目標信号の距離が離れているため、信号の検出が可能である。

船舶目標

■ 波浪信号と等しい距離にあるため、波浪信号に埋もれる。

■ MTIを適用できないため、DC成分の信号に埋もれる。

Range-Doppler Map (船舶)

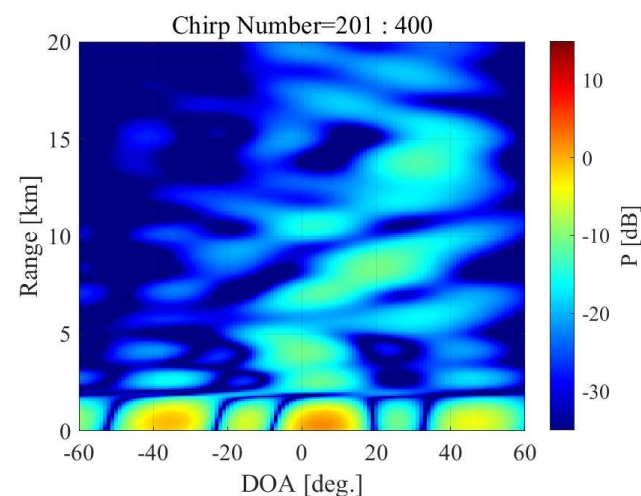
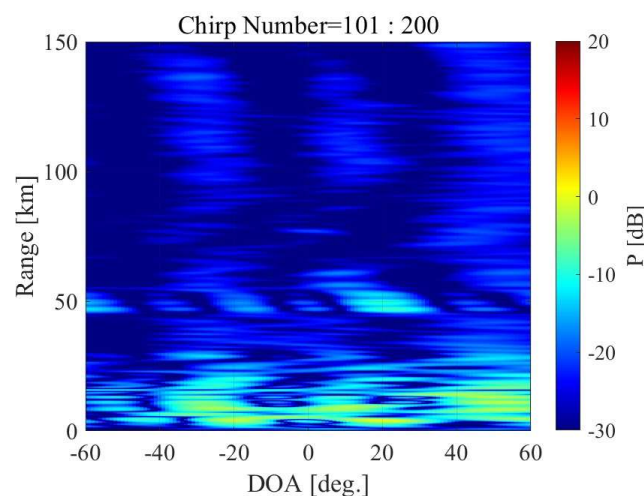


5. まとめ

18/18

■ Beamformer法による到来方向推定により、航空目標を検出することができる.

■ 船舶目標については、波浪信号及びDC成分の信号に埋もれるため、検出することは困難である.



■ 今後の検討

R-Dmap及びR-DOAmapを組み合わせることによる移動目標検出性能の向上