



Khatri-Rao積拡張アレー処理を用いた海洋レーダの 計算機シミュレーションによる特性評価

小沢 直輝¹, 山田 寛喜¹, 山口 芳雄¹, 平野 圭蔵², 伊藤 浩之²

¹新潟大学大学院自然科学研究科

²長野日本無線株式会社

Naoki OZAWA¹, Hiroyoshi YAMADA¹, Yoshio YAMAGUCHI¹,
Keizo HIRANO², Hiroyuki ITO²

¹Graduate School of Science & Technology, Niigata University

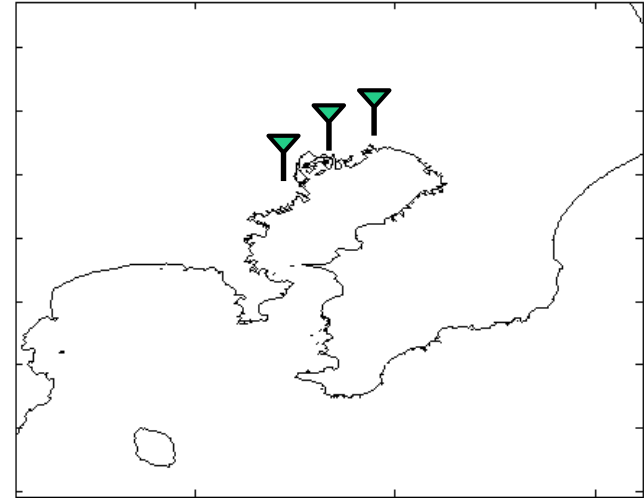
²Nagano Japan Radio Co., Ltd.

研究背景

海表面観測

- 地上設置型海洋レーダ
- 波高計
- 流速計

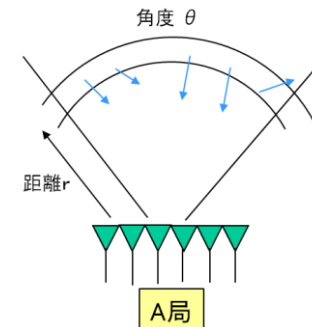
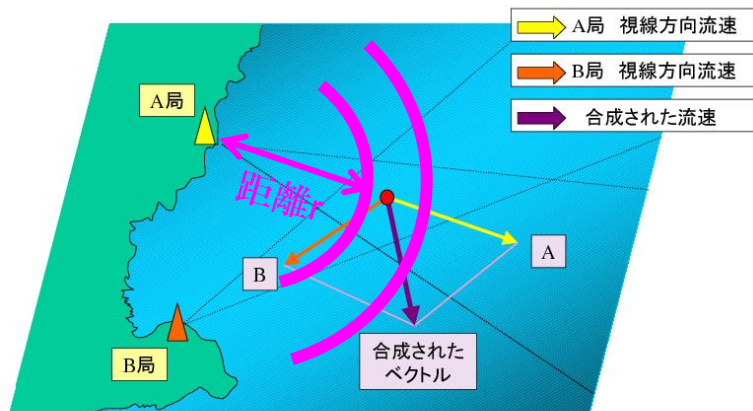
etc.



海洋レーダで得られる情報

- 到来方向 : アレーアンテナを利用したDigital Beam Forming
- 距離, 流速 : Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave (FMICW) レーダ方式
- 進行方向 : 2つのレーダを用いてビームを交差し, ベクトル合成

etc.



本発表では1方向のレーダについて考える

研究目的

海洋レーダにおける角度分解能・ドップラ周波数特性の改善

問題点

- 角度分解能改善するためには・・・アレー開口長を広げる必要
 - アンテナ数を増やすために広大な用地が必要（実例：10m×70m）
- ➡ **用地の確保が難しい**

Khatri-Rao (KR) 積拡張アレー処理[1]

- **アンテナ素子数を変えずに分解能向上可能な手法**
- 海洋レーダにより得られるアレーモードベクトルをKR積を用いて拡張し、仮想的にアレー素子数を増やすことで角度分解能を向上[2]

本発表

実測データ解析においてKR積拡張アレー処理を用いた場合の有効性を確認するために計算機シミュレーションにより特性を評価

[1] W. K. Ma, T. H. Hsieh, and C. Y. Chi, "DOA estimation of quasi-stationary signals with less sensors than sources and unknown spatial noise covariance: A Khatri-Rao subspace approach," IEEE Trans. Signal Process., vol.58, no.4, pp.2168-2180, April 2010.

[2] 小沢直輝, 山田寛喜, 山口芳雄, "Khatri-Rao 積拡張アレー処理による海洋レーダ分解能特性改善に関する検討", 信学技報, Vol.SANE2012-136, Jan. 2013. 2

受信信号モデル

海洋レーダで取得された受信データ（距離，速度，到来方向）

距離ごとの情報に分離

2次元受信信号データ（速度，到来方向）

速度推定（素子ごとにFFT）

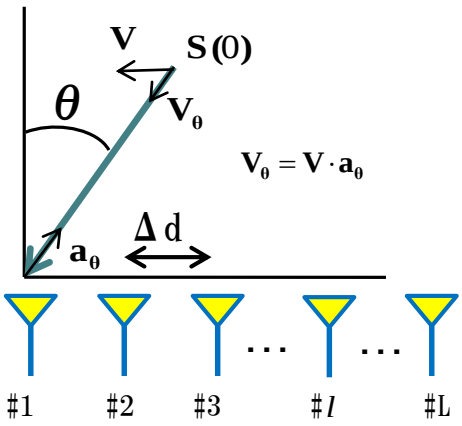
受信信号データ（到来方向）

受信信号

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{a}(\theta_k) S_{rk}(0) + \mathbf{n}$$

受信相関行列

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{xx} &= E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] \\ &= \mathbf{A}\mathbf{S}_r\mathbf{A}^H + \mathbf{R}_N \end{aligned}$$



$$= \sum_{k=1}^K \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\Delta d \sin\theta} \\ \vdots \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(L-1)\Delta d \sin\theta} \end{bmatrix} S_{rk}(0) + \mathbf{n} = \mathbf{A}\mathbf{S}_r + \mathbf{n}$$

L: 素子数
 θ : 入射角
 $\mathbf{a}_0$: θ 方向の単位ベクトル

Δd : 素子間隔
 $\mathbf{V}_0$: ターゲットのアンテナ方向の速度
 $\mathbf{V}$: ターゲットの実際の進行方向の速度

$\bar{f}_d$: 正規化ドップラ周波数
 $[\cdot]^H$: 複素共役転置
 $E[\cdot]$: アンサンブル平均

Khatri-Rao積拡張アレー処理

KR積拡張アレー処理とは[1]

- 仮想的にアレー素子数, 実効開口長, アレー自由度を増加させる信号処理
- L素子Uniform Linear Array(ULA)に用いた場合2L-1素子ULA相当となる
- 無相関波到来時に使用可能

受信相関行列

$$\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H]$$



KR積拡張受信信号

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

$$= \text{vec}(\mathbf{A}\mathbf{S}_r\mathbf{A}^H) + \text{vec}(\mathbf{R}_N)$$

$$= (\mathbf{A}^* \boxtimes \mathbf{A})\mathbf{s}_r + \text{vec}(\mathbf{R}_N)$$

$$= \hat{\mathbf{A}}\mathbf{s}_r + \text{vec}(\mathbf{R}_N)$$

拡張モードベクトル

$$(\mathbf{A}^* \boxtimes \mathbf{A})$$

$$= \text{vec} \begin{bmatrix} 1 & e^{j\omega} & \dots & e^{j(L-2)\omega} & e^{j(L-1)\omega} \\ e^{-j\omega} & 1 & & & \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ e^{-j(L-2)\omega} & & & 1 & \\ e^{-j(L-1)\omega} & & & & 1 \end{bmatrix}$$



非重複要素である1行目と1列目を抽出

$$\hat{\mathbf{A}} = [e^{j(L-1)\omega}, e^{j(L-2)\omega}, \dots, 1, \dots, e^{-j(L-2)\omega}, e^{-j(L-1)\omega}]^T$$

拡張受信相関行列

$$\mathbf{R}_{zz} = E[\mathbf{z}\mathbf{z}^H]$$

$$\hat{\mathbf{R}}_{zz} = \sqrt{\mathbf{R}_{zz}}$$

$\boxtimes$: KR積の演算子, 列ごとのKronecker積

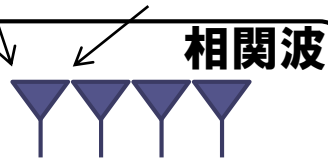
vec : 引数の各列をスタックし, ベクトル化する演算

$\boxtimes^*$: 複素共役

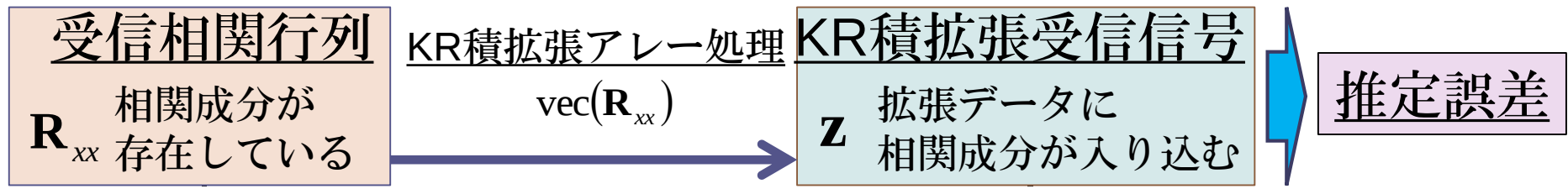
相関波到来時のKR積拡張アレー処理

◆ 相関波到来時のKR積拡張アレー処理

推定誤差が**増大**



相関波



相関2波到来時の相関行列

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_{xx} &= E[\mathbf{A}\mathbf{s}(t)\mathbf{s}(t)^H \mathbf{A}^H] = \begin{bmatrix} \mathbf{a}(\theta_1) & \mathbf{a}(\theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 & \boxed{\rho_{12}\sqrt{P_1P_2}} \\ \boxed{\rho_{21}\sqrt{P_1P_2}} & P_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}(\theta_1)^H \\ \mathbf{a}(\theta_2)^H \end{bmatrix} \\
 &= P_1\mathbf{a}(\theta_1)\mathbf{a}(\theta_1)^H + \underbrace{\rho_{21}\sqrt{P_1P_2}\mathbf{a}(\theta_2)\mathbf{a}(\theta_1)^H}_{\leftarrow \text{到来波以外の項が相関行列中に存在}} + \underbrace{\rho_{12}\sqrt{P_1P_2}\mathbf{a}(\theta_1)\mathbf{a}(\theta_2)^H}_{\leftarrow \text{到来波以外の項が相関行列中に存在}} + P_2\mathbf{a}(\theta_2)\mathbf{a}(\theta_2)^H \\
 &= P_1\mathbf{A}_{11} + P_2\mathbf{A}_{22} + \boxed{\bar{P}_{12}\bar{\mathbf{A}}_{12}} \leftarrow \text{到来波以外の項が相関行列中に存在}
 \end{aligned}$$

$\mathbf{A}_{ij} = \mathbf{a}(\theta_i)\mathbf{a}(\theta_j)^H, \rho_{12} = \rho_{21}^* = |\rho_{12}|e^{j\phi_{12}}$
 $\bar{\mathbf{A}}_{12} = \mathbf{A}_{12}e^{j\phi_{12}} + \mathbf{A}_{21}e^{-j\phi_{12}}, \bar{P}_{12} = |\rho_{12}|\sqrt{P_1P_2}$

KR積拡張受信信号

$\mathbf{z} = \text{vec}(\mathbf{R}_{xx})$ KR拡張データに相関項が混在

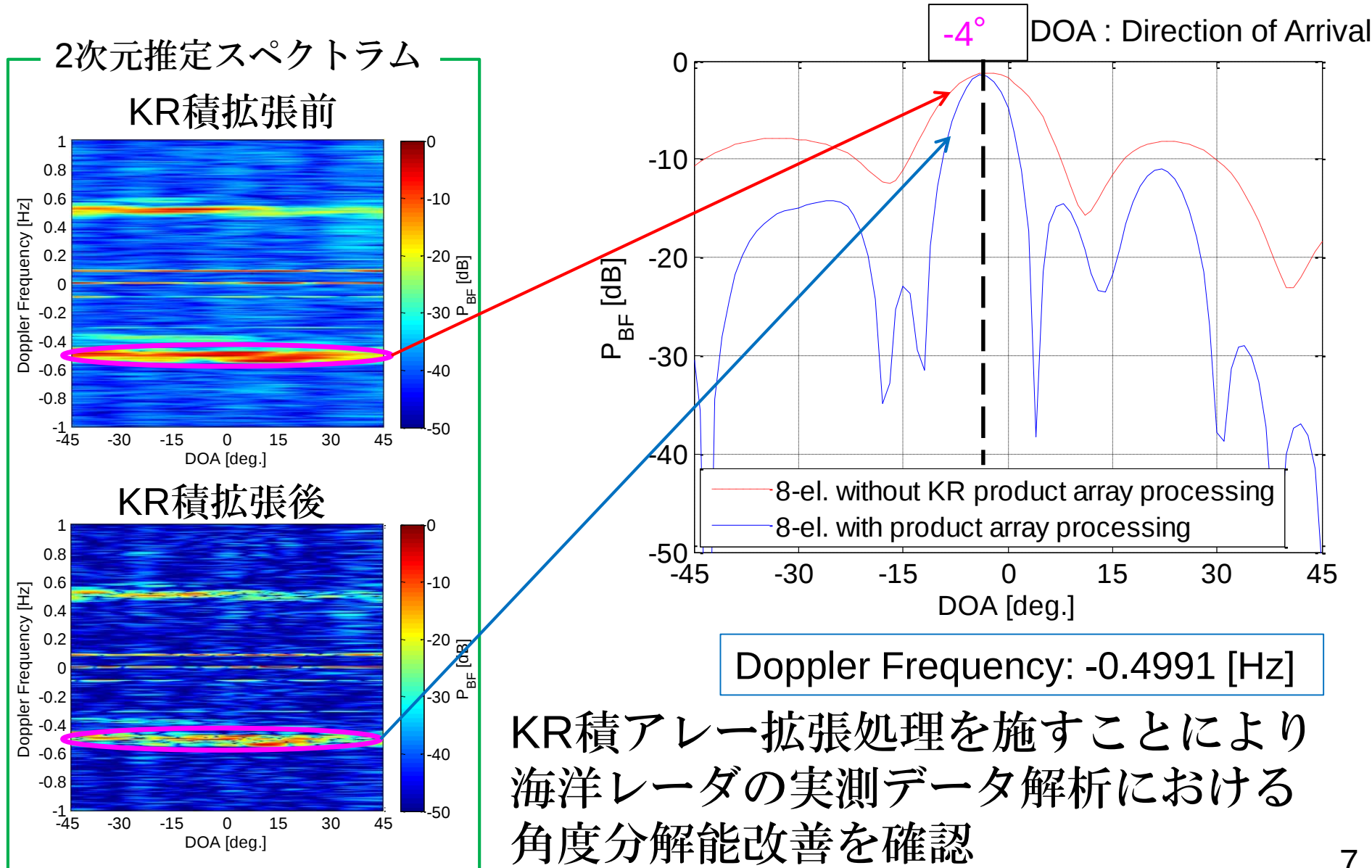
$= \text{vec}(\mathbf{A}_{11})P_1 + \text{vec}(\mathbf{A}_{22})P_2 + \underbrace{\text{vec}(\bar{\mathbf{A}}_{12})\bar{P}_{12}}_{\leftarrow \text{この成分が推定誤差原因}}$

実測データ解析 諸元

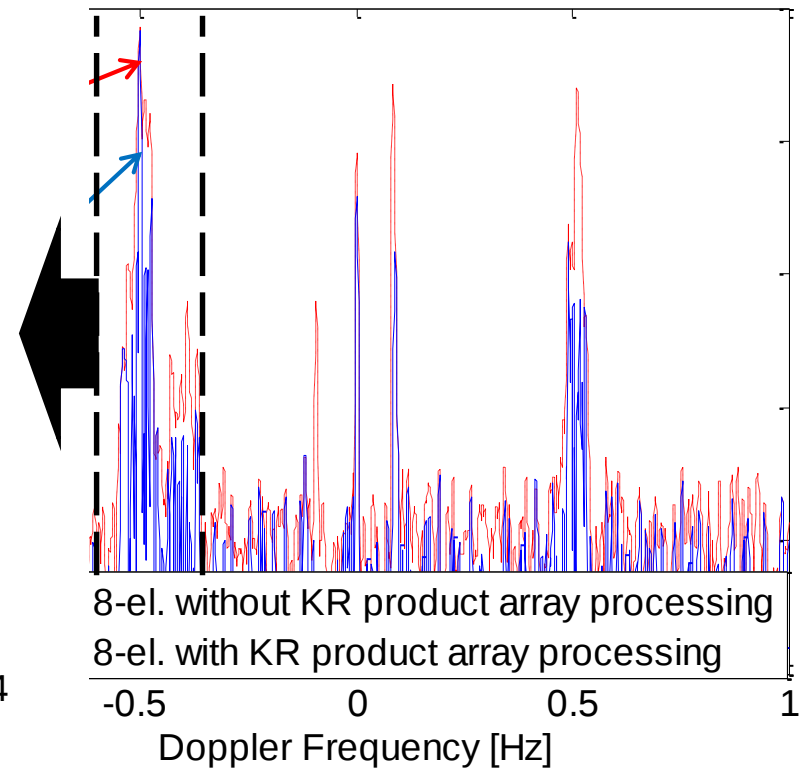
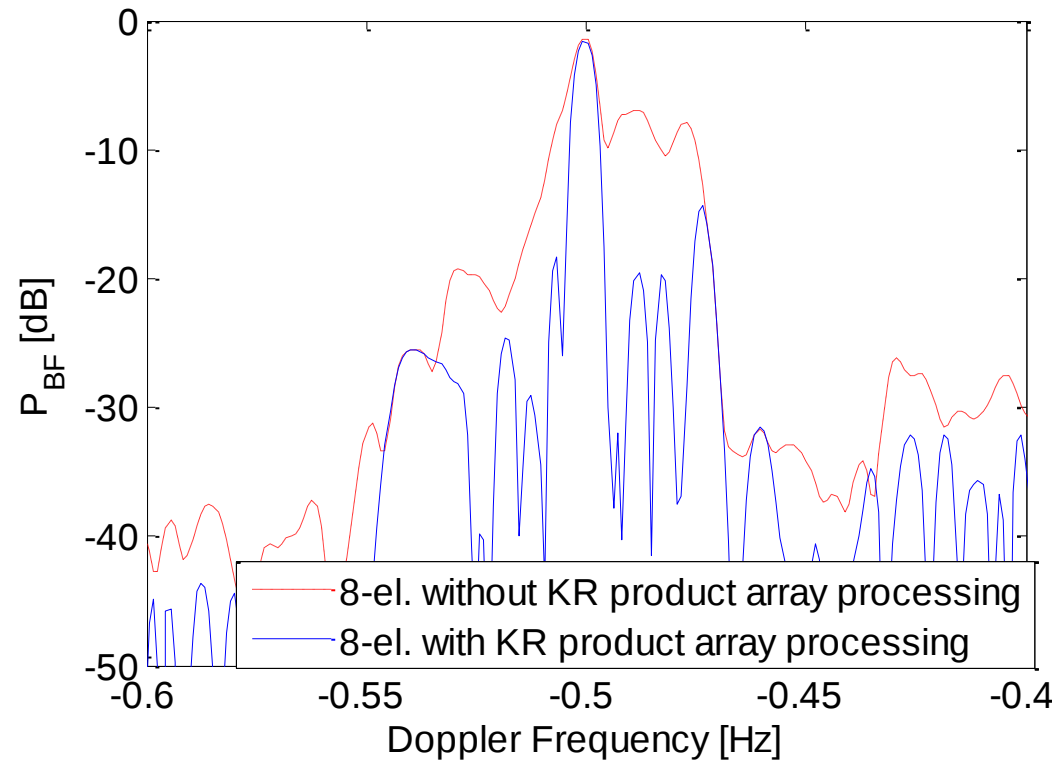
これまでに報告してきた実測データ解析

海洋レーダの諸元	
観測日	2006年10月22日
観測場所	有明海
アレー形状	Uniform Linear Array (ULA)
総掃引数	1024
アレーアンテナ素子数	8
中心周波数	24.515 [MHz] ($\lambda \doteq 12.26$ [m])
掃引周波数幅	100 [kHz]
アレー素子間隔	7 [m] (0.57λ [m])
掃引時間	500 [msec]
1掃引あたりの取得ポイント数	512
距離分解能	1.5 [km]
解析の諸元	
対象距離	15 [km]
到来方向推定手法	DBF

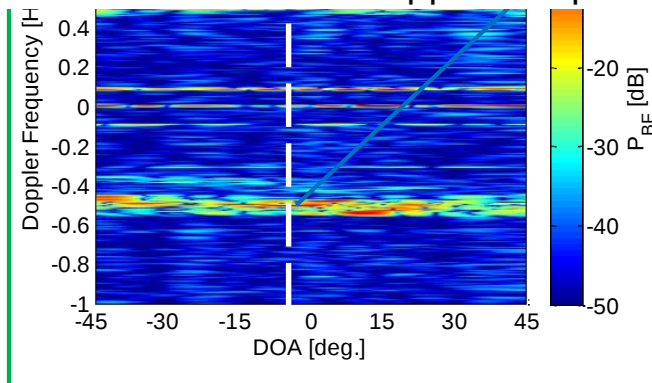
実測データ解析結果(DOA)(1/2)



実測データ解析結果(ドップラ)(2/2)



対象角度 -4°



角度分解能をKR積拡張処理によって改善することにより他方向からのドップラ成分が弱くなりビームが細くなった

海洋レーダにおけるKR積拡張アレー処理

海洋レーダの実測データ解析において角度分解能改善がみられた

アレー素子数Lに対して十分に多くの散乱点Kから波が到来する場合($K \gg L$)

受信信号

$$x(t) = \sum_{i=1}^K \mathbf{a}(\theta_i) s_i(t) + \mathbf{n}(t)$$

受信相関行列

$$\mathbf{R}_{xx} = E[x(t)x^H(t)] = \sum_i \mathbf{a}(\theta_i) \mathbf{a}(\theta_i)^H P_i + \underbrace{\sum_i \mathbf{a}(\theta_i) s_i(t) \sum_j \mathbf{a}(\theta_j) s_j(t)}_{\text{Cross terms}}$$

s_i, s_j がレイリー分布やワイブル分布



Kが十分に多い場合互いに打ち消し合い、スナップショット数が少ない場合でも相関項の影響が小さくなる (≈ 0)

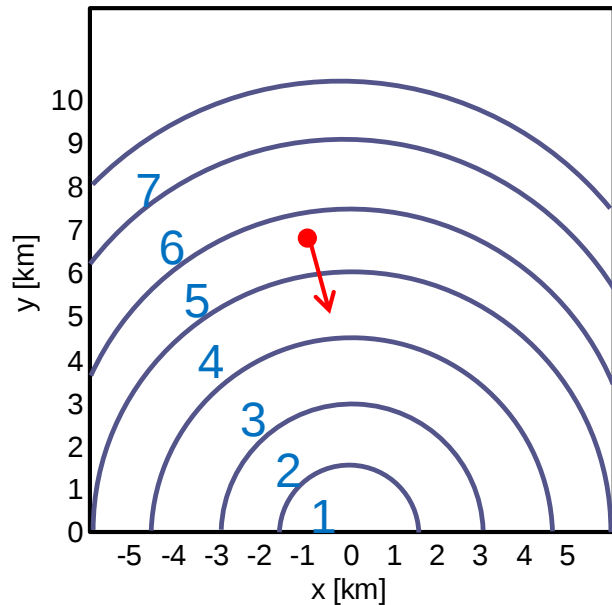
KR積拡張受信信号

$$\begin{aligned} \mathbf{z}' &= \text{vec}(\mathbf{R}_{xx}) \\ &= \sum_{i=1}^K \mathbf{a}^*(\theta_i) \otimes \mathbf{a}(\theta_i) P_i + \text{vec}(\mathbf{R}_N) \end{aligned}$$

計算機シミュレーション (1/2)

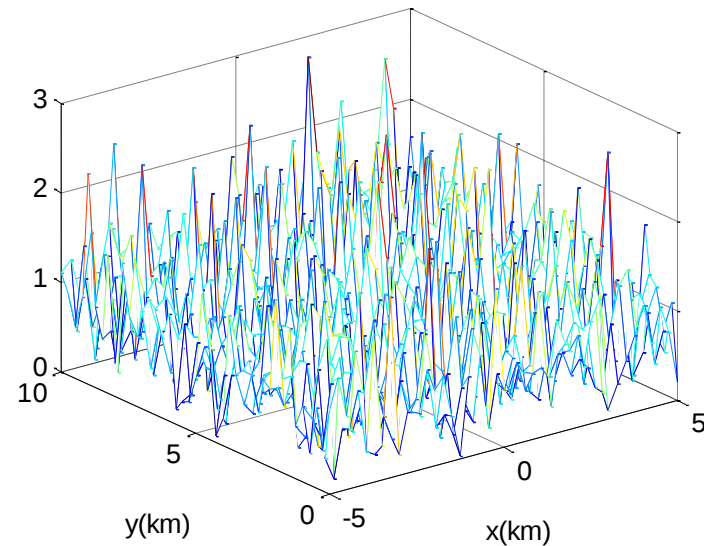
計算機シミュレーションにより海洋レーダにおける
KR積拡張アレー処理の有効性を確認する

簡単のためにマップは
x 軸±5km, y 軸0~10km,
面上の散乱点は41×41点を想定

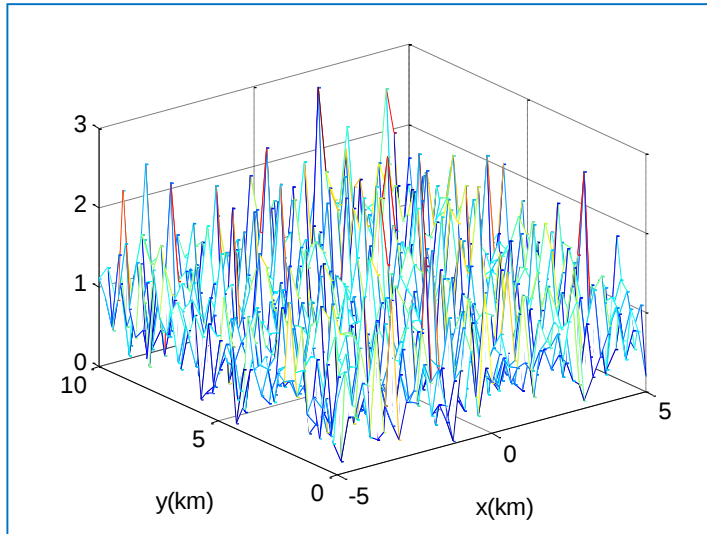


複素振幅

レイリー分布のワイブル乱数を配置



計算機シミュレーション(2/2)

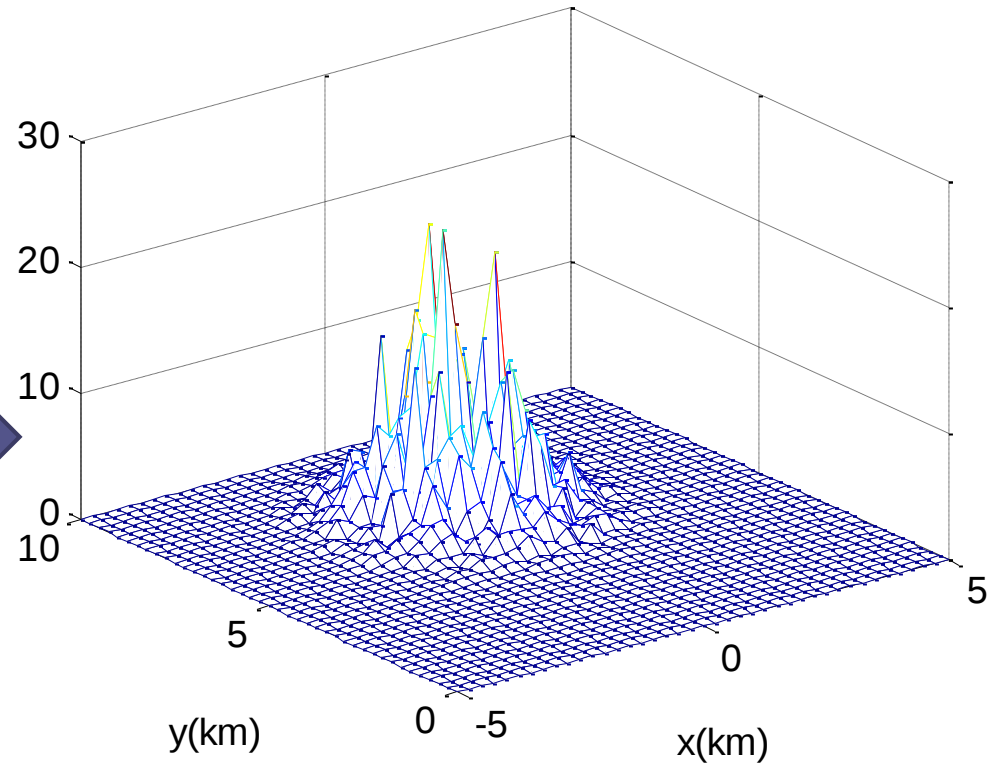
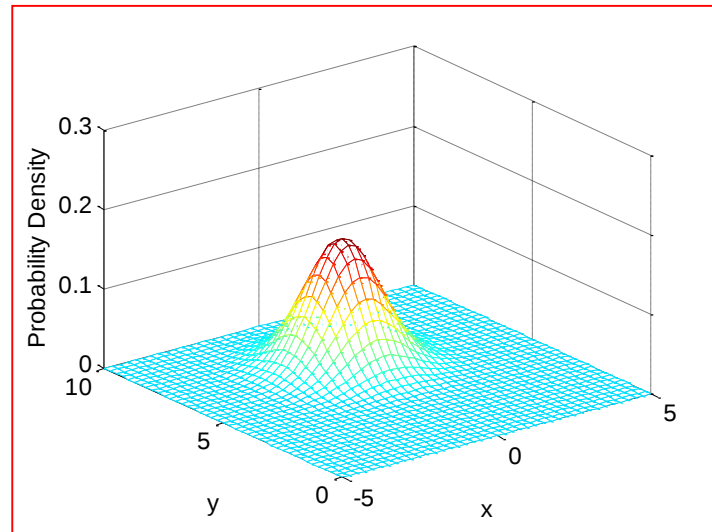


複素振幅

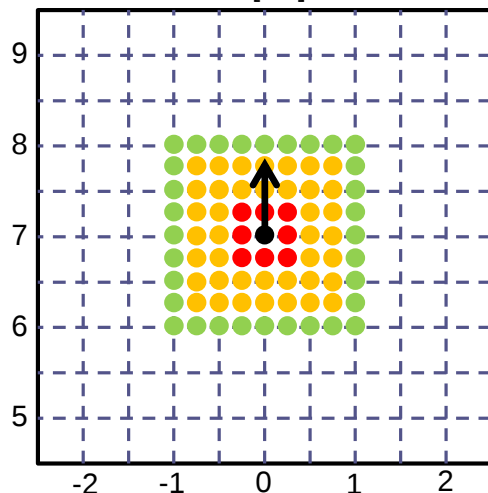
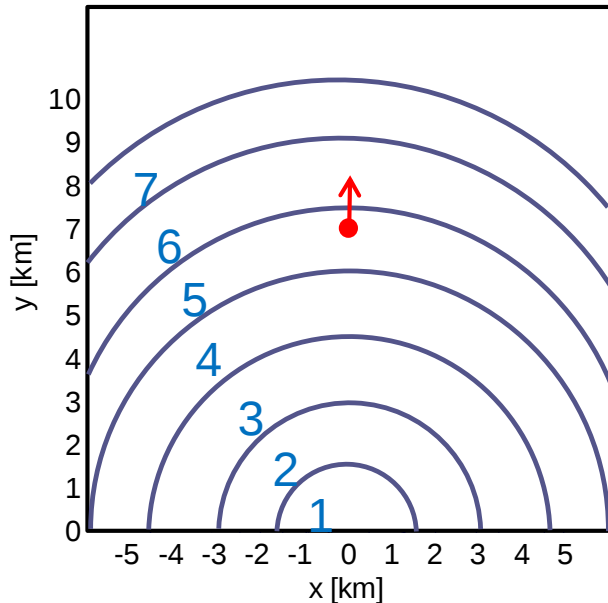
ガウス分布で重み付け後の信号電力

×

ガウス分布で
重み付け



シミュレーション諸元



ターゲット速度

- -3.06 [m/s]
- -3.06 [m/s]
- -3.01 [m/s]
- -2.96 [m/s]

諸元

アレーアンテナ素子数	8
アレー形状	Uniform Linear Array (ULA)
中心周波数	24.515 [MHz] ($\lambda \doteq 12.26$ [m])
掃引周波数	100 [kHz]
掃引時間	500 [ms]
総掃引回数	1024
アレー素子間隔	7 [m] (0.57λ [m])

波源の設定諸元

対象レンジビン	5(6.0~7.5 [km])
波源個数	41×41
指定波源個数	1
指定波源位置	(x,y)=(0 [km], 7 [km])
波源到来方向	0°
波源速度	-3.06[m/s](Doppler Frequency: -0.4991 [Hz])
SNR	20 [dB]

ドップラ周波数

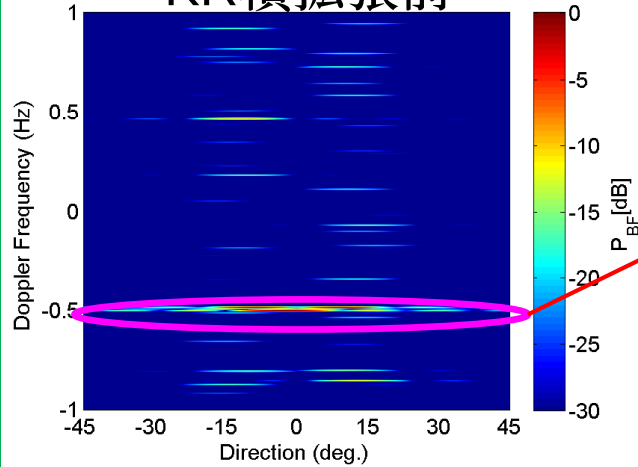
$$f_b = \frac{2v}{c} f_0$$

$v = -3.06$ [m/s] の場合
 $f_b = \frac{-3.06 \times 1 \times 24.515 \times 10^6}{3.0 \times 10^8}$
 $= -49.91 \times 10^{-2}$ [Hz]

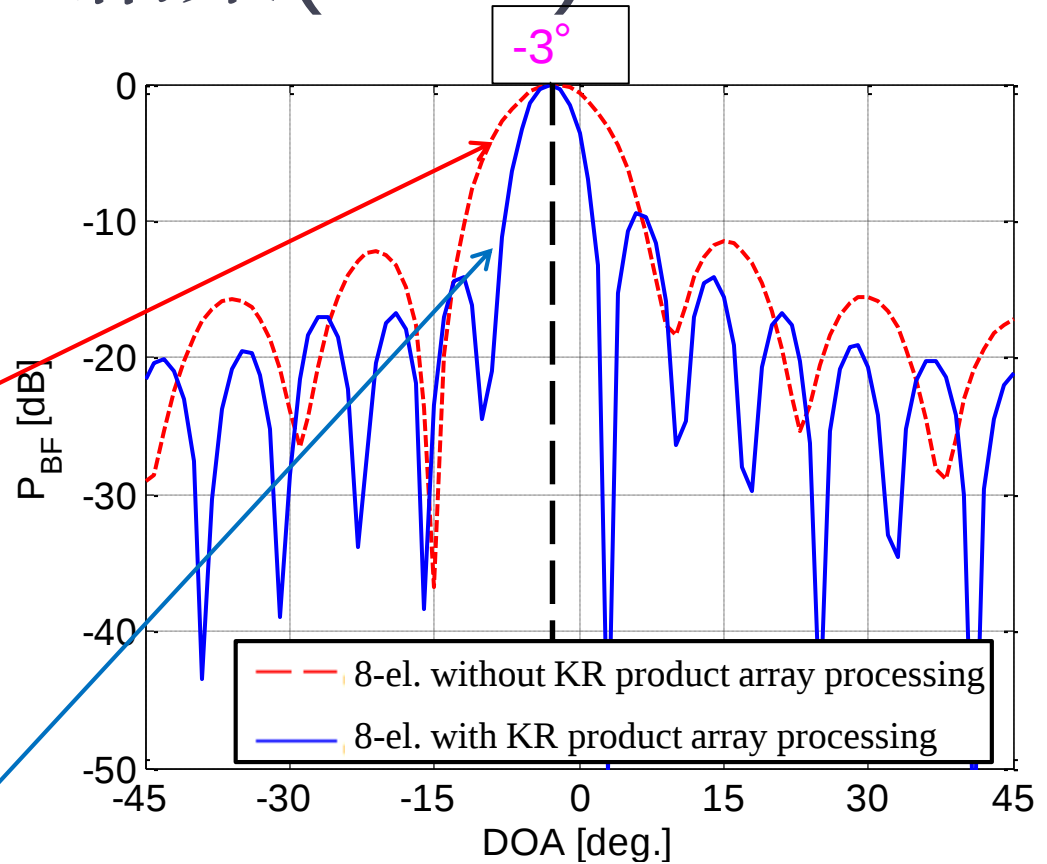
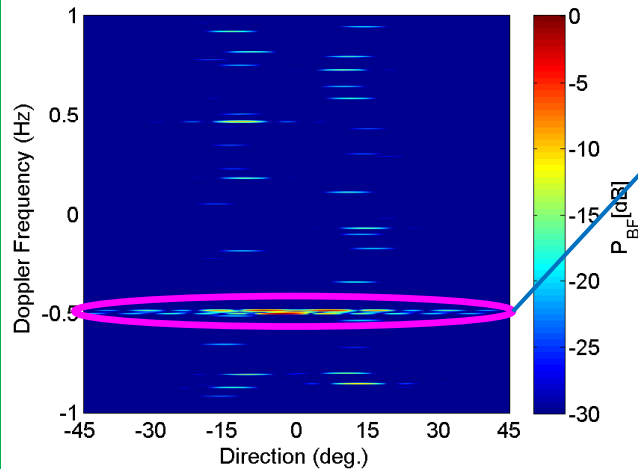
シミュレーション結果(DOA)

2次元推定スペクトラム

KR積拡張前



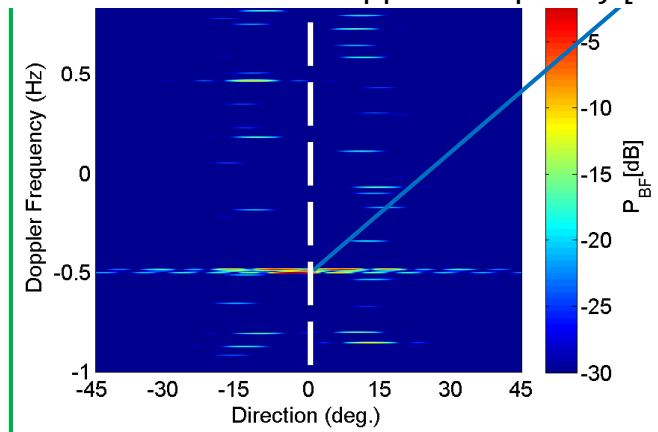
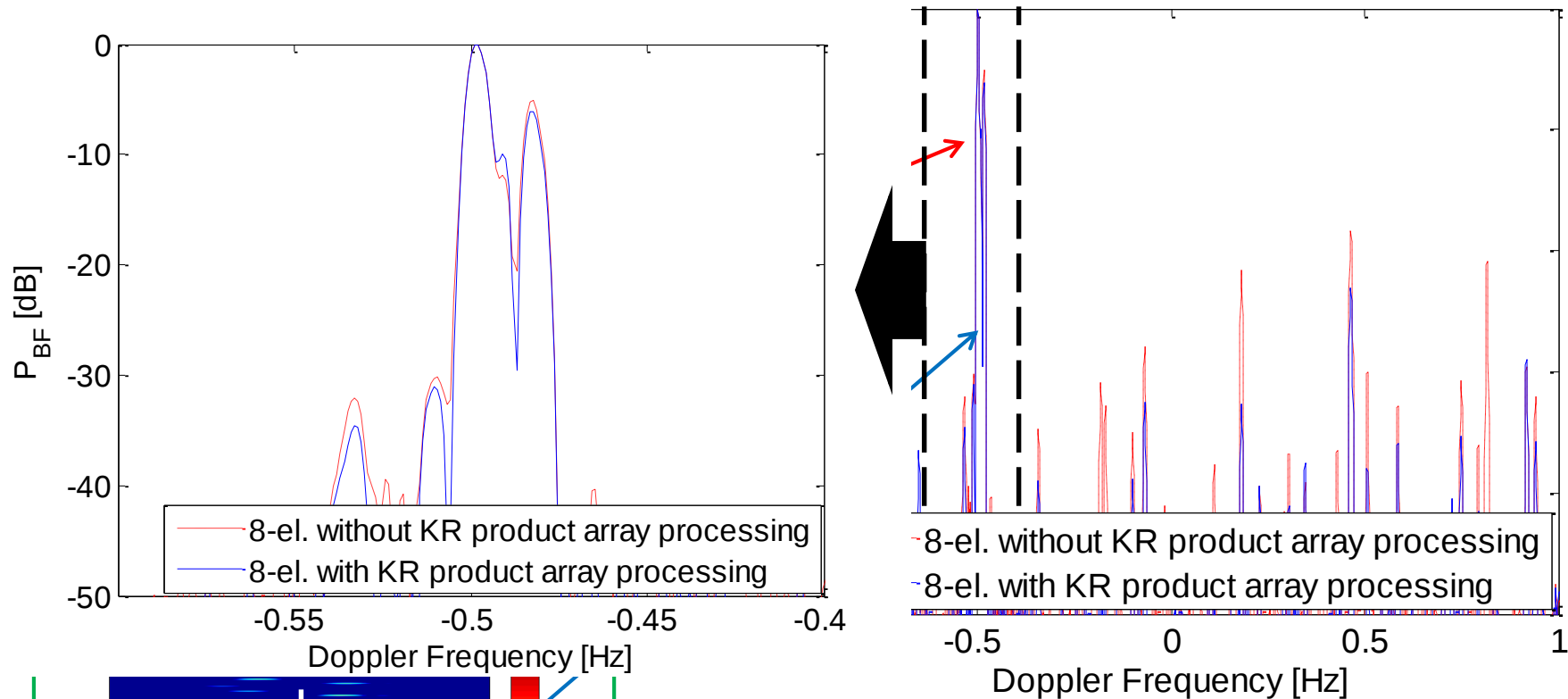
KR積拡張後



Doppler Frequency: -0.4991 [Hz]

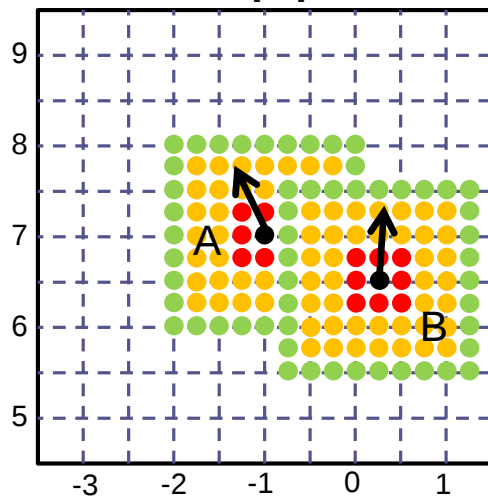
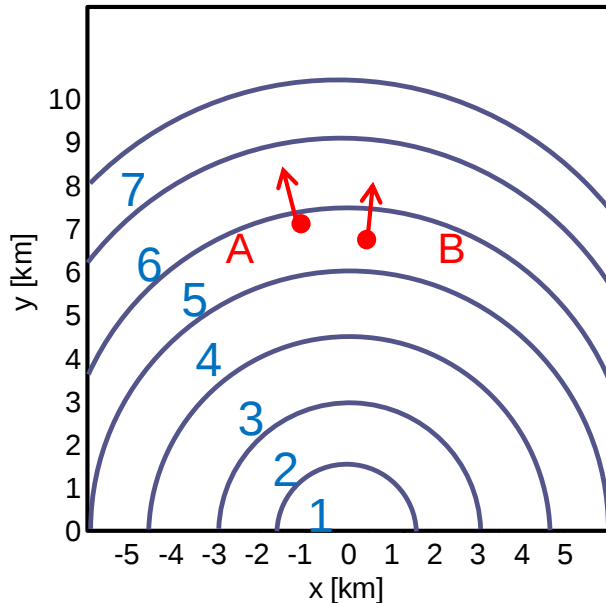
- KR積拡張アレー処理により
メインローブが鋭くなっている

シミュレーション結果(ドップラ推定)



対象角度 -3°

シミュレーション諸元



ターゲット速度

- -3.06 [m/s]
- -3.06 [m/s]
- -3.01 [m/s]
- -2.96 [m/s]

諸元

アレーアンテナ素子数	8
アレー形状	Uniform Linear Array (ULA)
中心周波数	24.515 [MHz] ($\lambda \doteq 12.26$ [m])
掃引周波数	100 [kHz]
掃引時間	500 [ms]
総掃引回数	1024
アレー素子間隔	7 [m] (0.57λ [m])

波源の設定諸元

対象レンジビン	5(6.0~7.5 [km])
波源個数	41×41
指定波源個数	2
指定波源位置	(x,y)=A(-1 [km], 7 [km]), B(0.25 [km], 6.5 [km])
波源到来方向	A(-8°), B(2°)
波源速度	A(-3.06[m/s]), B(-3.06[m/s])
SNR	20 [dB]

ドップラ周波数

$$f_b = \frac{2v}{c} f_0$$

$$v = -3.06 \text{ [m/s]} \quad f_b = \frac{-3.06 \times 1 \times 24.515 \times 10^6}{3.0 \times 10^8}$$

の場合

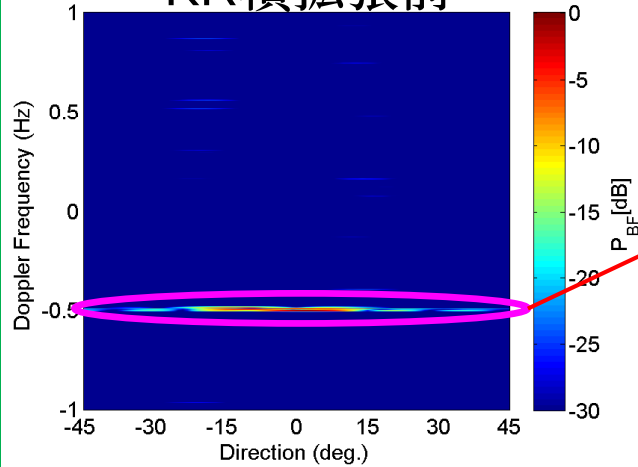
$$= -49.91 \times 10^{-2} \text{ [Hz]}$$

シミュレーション結果(DOA)

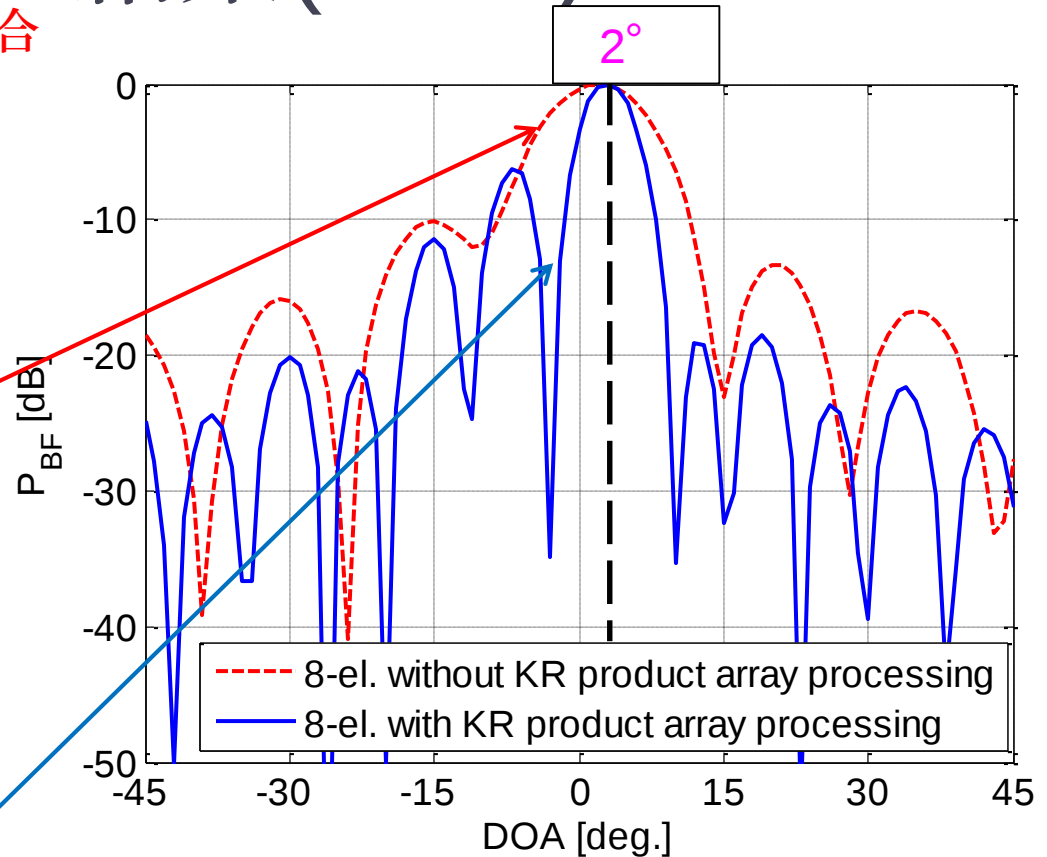
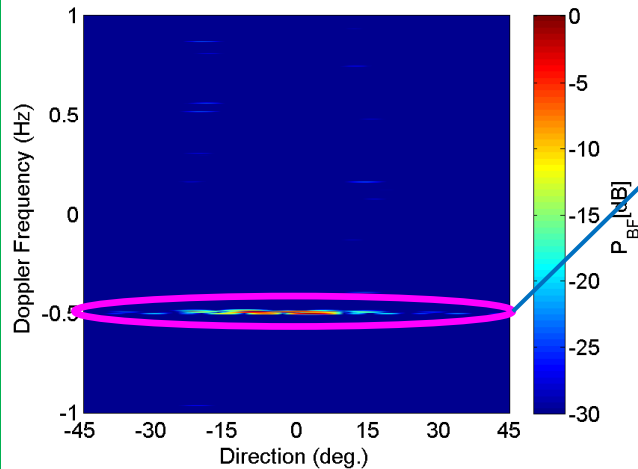
複素振幅の位相項がランダムの場合

2次元推定スペクトラム

KR積拡張前



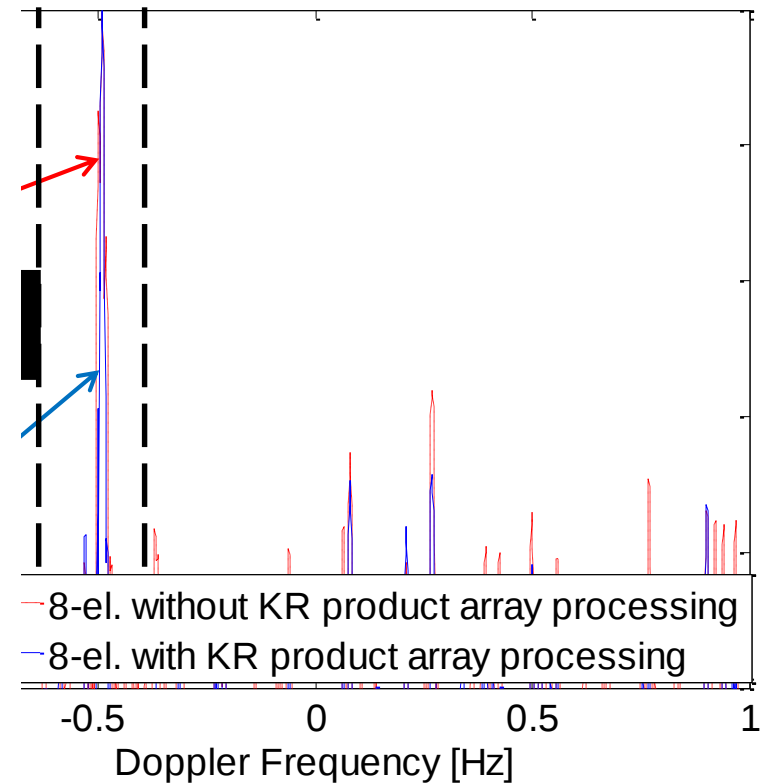
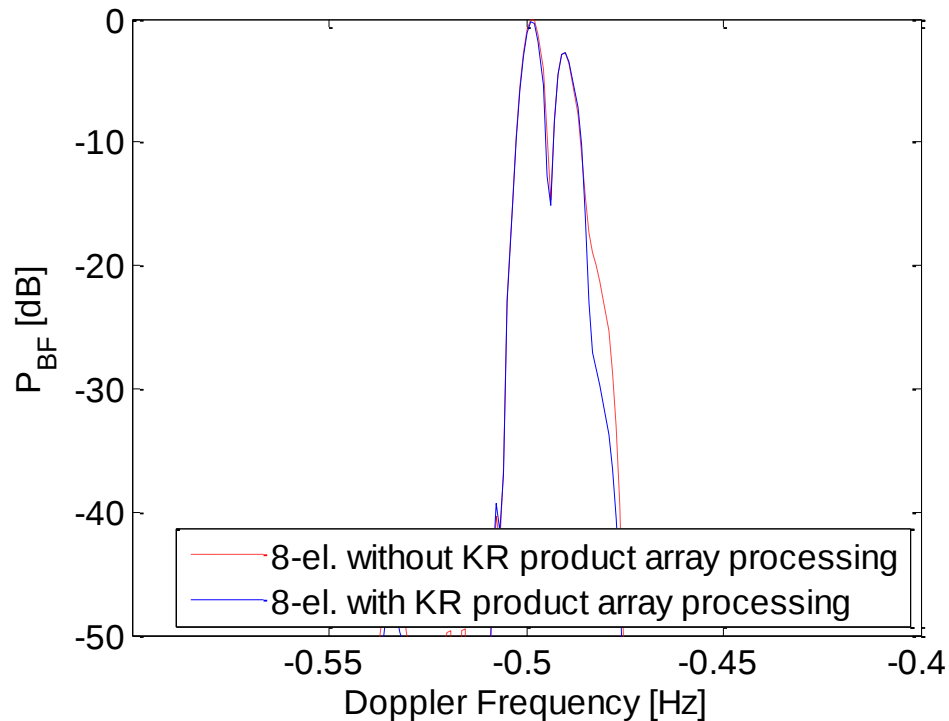
KR積拡張後



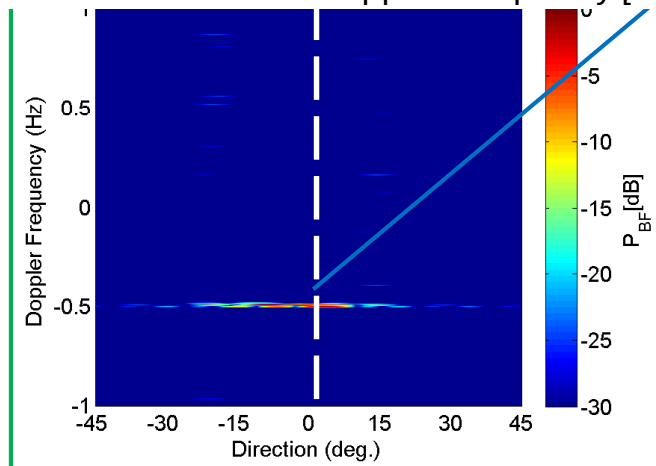
Doppler Frequency: -0.4990 [Hz]

KR積拡張アレー処理により
分離できていなかった 2° , -8° の方向の波を分離

シミュレーション結果(ドップラ推定)



対象角度 2°



まとめ

これまで報告では海洋レーダの実測データ解析において

- KR積拡張アレー処理による角度分解能改善の有効性を報告
- 他方向からのドップラ周波数成分の軽減を報告

K R 積拡張アレー処理

- 到来波が相関波の場合推定精度劣化
- 到来波が素子数に対して十分に多い場合互いに位相項成分を打ち消し合い相関項の影響軽減

今回の報告では計算機シミュレーションにおいて

- 流速マップを作成し，K R 積拡張アレー処理の有効性を報告
- 到来方向推定においてメインローブが鋭くなることを確認

今後の課題

- KR積拡張アレー処理による角度分解能改善後の精度を定量的に評価
 - ✓ より海面を模した流速マップにおいてシミュレーション

ご清聴ありがとうございました