



海洋レーダにおけるKhatri-Rao積拡張アレー処理を用いた 角度・ドップラ周波数分解能改善に関する検討

Angular/Doppler-Frequency Resolution Improvement
Using the Khatri-Rao Product Array Processing in Ocean Surface Current Radar

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.

発表の流れ

- 研究背景
- 研究目的
- 受信信号モデル
- Khatri-Rao積拡張アレー処理
- 実測データ解析
- Khatri-Rao積拡張アレー処理の妥当性確認
- まとめ

研究背景

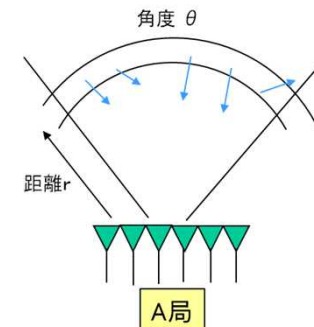
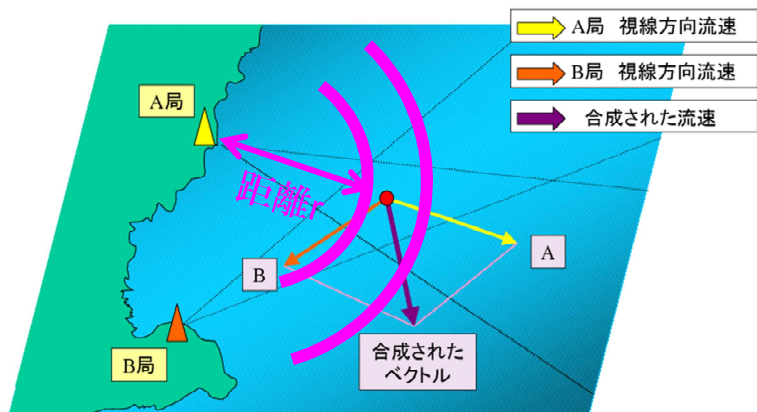
- 漁業
- レジャー
- 港湾建設
- 津波

海象情報を効率よく観測できる
海洋レーダが注目されている

沿岸部に設置する地上設置型の海洋レーダについて考える

海洋レーダで得られる情報

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



本発表では1方向のレーダについて考える

研究目的

地上設置型海洋レーダにおいて、角度・ドップラ分解能の改善を行う

問題点

- アレー開口長を広げるためにアンテナの設置数を増やす必要がある
- アンテナ数を増やすための広大な用地が必要（実例：10m×70m）

➡ **用地の確保が難しい**

Khatri-Rao (KR) 積拡張アレー処理

- 電波到来方向推定の分野ではKR積拡張アレー処理という
アンテナ素子数を変えずに分解能向上可能な手法が報告されている[1]
- アレーのモードベクトルをKR積を用いて拡張することにより
仮想的にアレー素子数を増やし、分解能を向上させることが可能[1]



本発表では

- KR積拡張アレー処理を陸上設置型海洋レーダに用いたときの
角度分解能改善における有効性を実測データの解析により検討
- 角度分解能向上によって到来波それぞれが互いに及ぼすと思われる
影響が減少すると考えられるためドップラ周波数分解能改善を検討

受信信号モデル

海洋レーダによる 3 次元受信データ (距離, 速度, 到来方向)

ビート信号ごとにフーリエ変換により
距離推定

2次元受信信号データ (速度, 到来方向)

素子ごとにフーリエ変換により速度推定

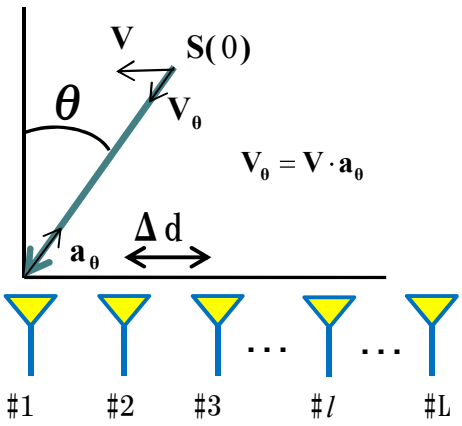
受信信号データ (到来方向)

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

- 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[1]

受信相関行列

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



拡張受信信号

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

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

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

$\odot$: 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
 $[]^*$: 複素共役

拡張モードベクトル

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

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



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

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

$$\dot{\mathbf{R}}_{xx} = \sqrt{\hat{\mathbf{R}}_{xx}}$$

実測データ解析 諸元

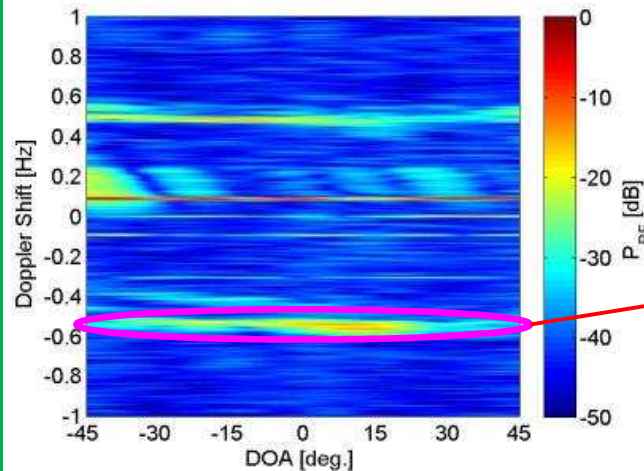
実測データ解析においてKR積拡張アレー処理の有効性を確認する

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	7.5 , 15 [km]
到来方向推定手法	DBF

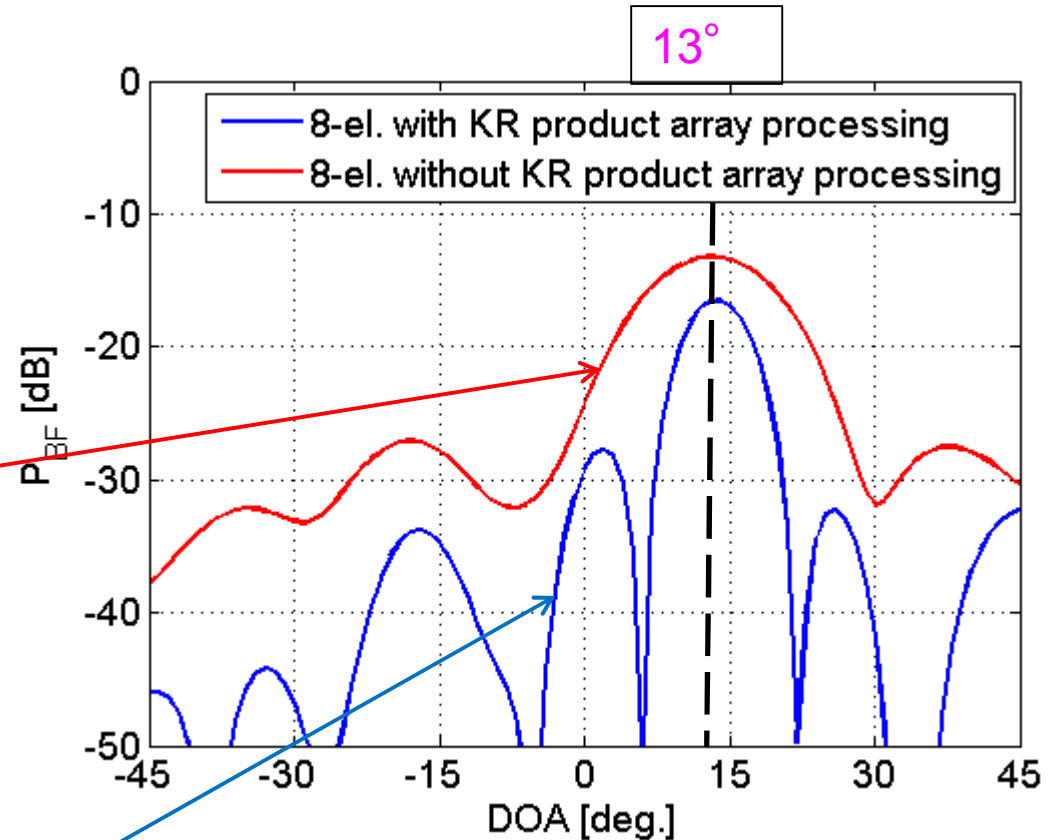
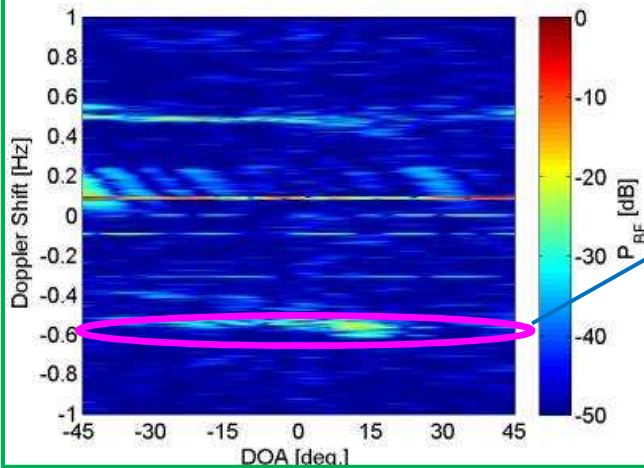
実測データ解析結果:対象距離 7.5km(1/2)

2次元推定スペクトラム

KR積拡張前



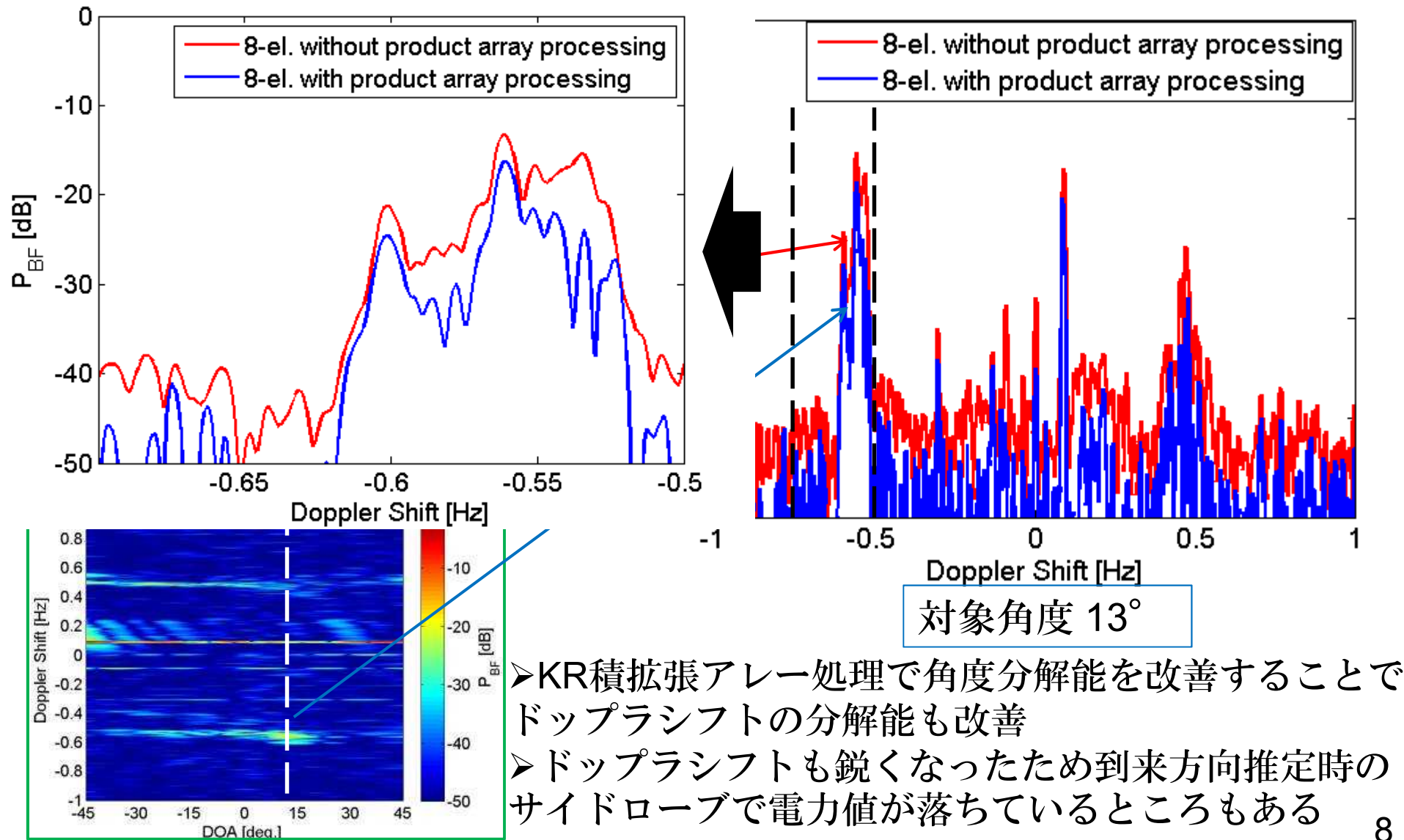
KR積拡張後



Doppler Shift : -0.5625 Hz

KR積アレー拡張処理を施すことにより
海洋レーダの実測データ解析における
角度分解能改善を確認

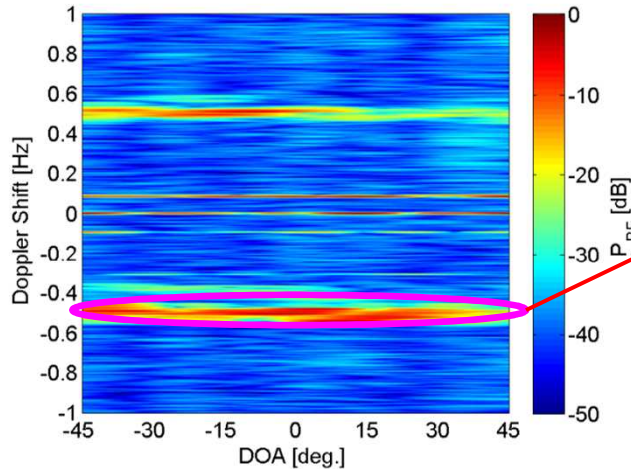
実測データ解析結果:対象距離 7.5km(2/2)



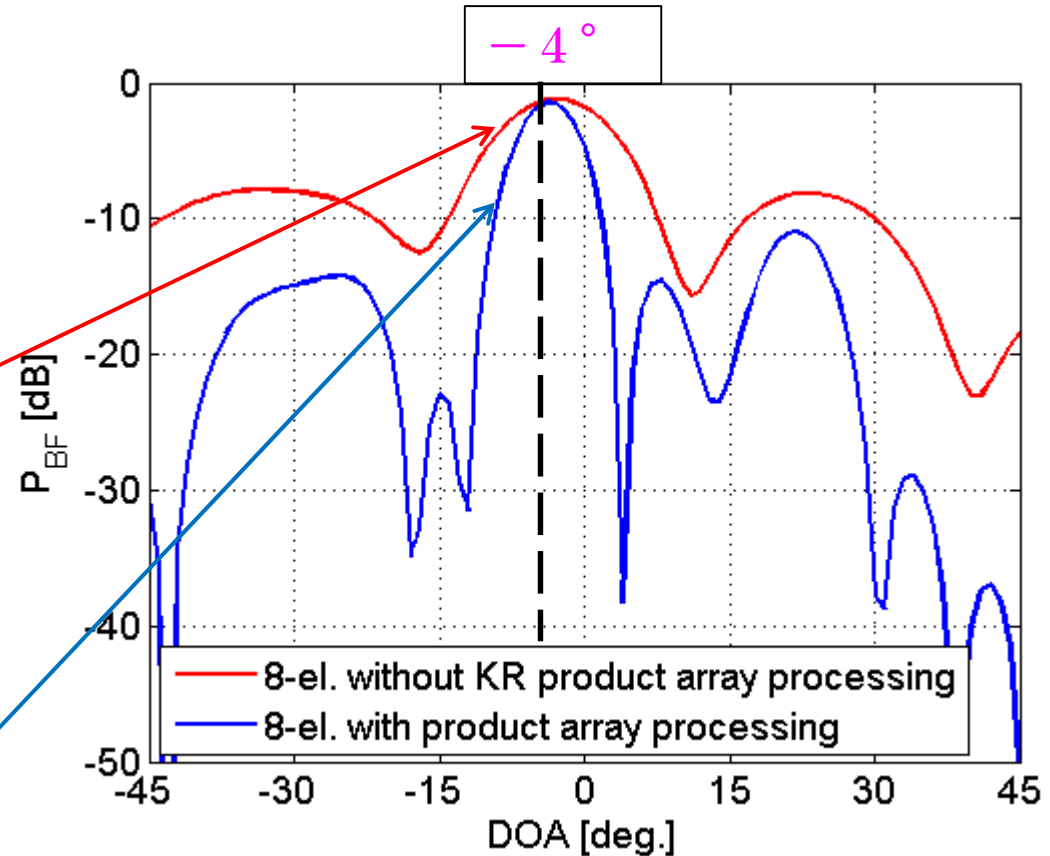
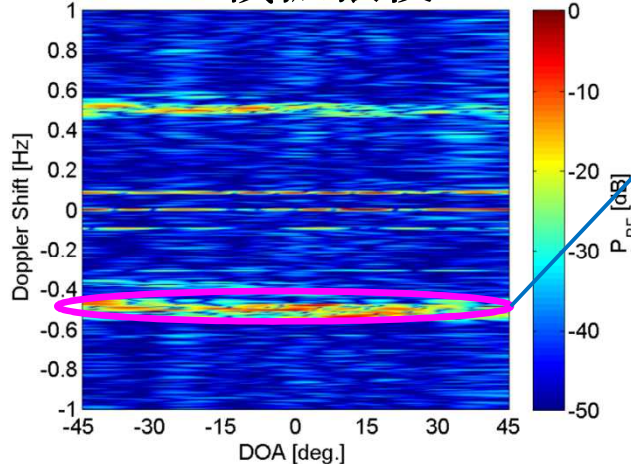
実測データ解析結果:対象距離 15km(1/2)

2次元推定スペクトラム

KR積拡張前



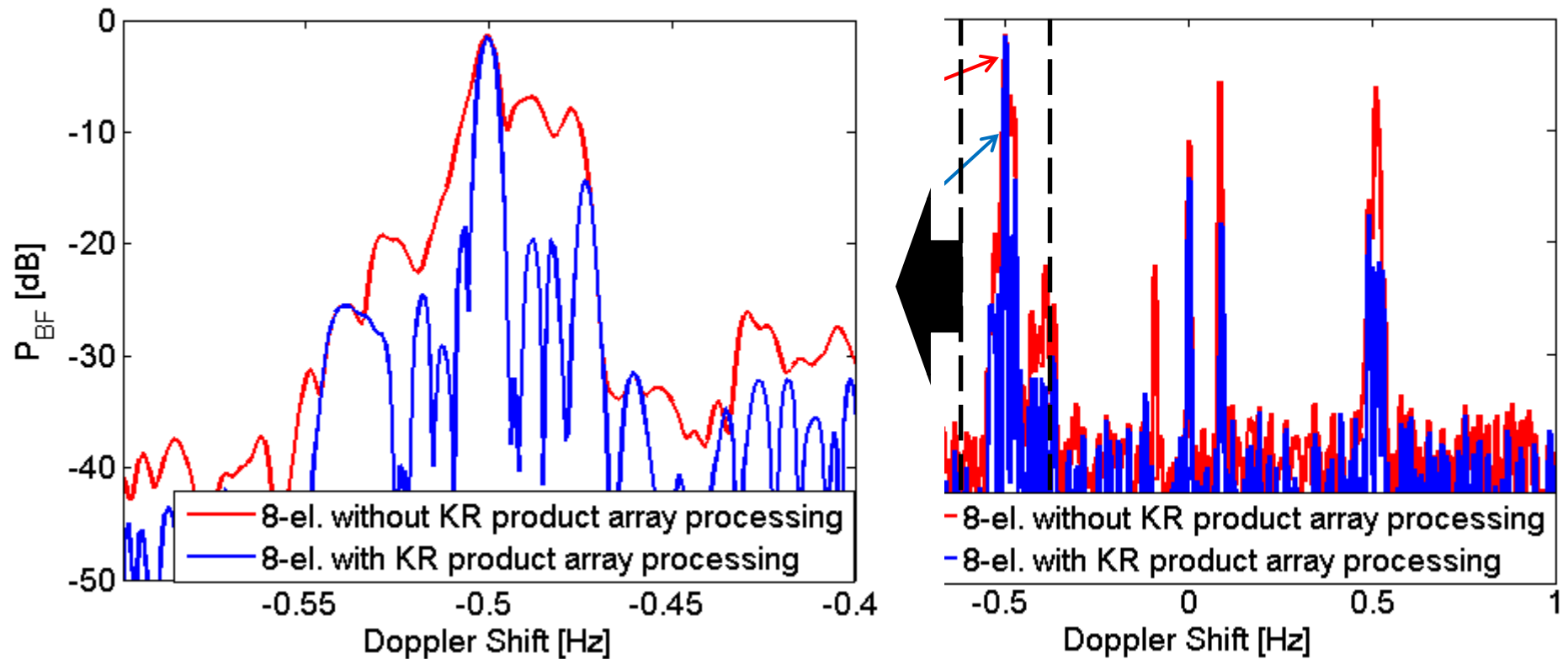
KR積拡張後



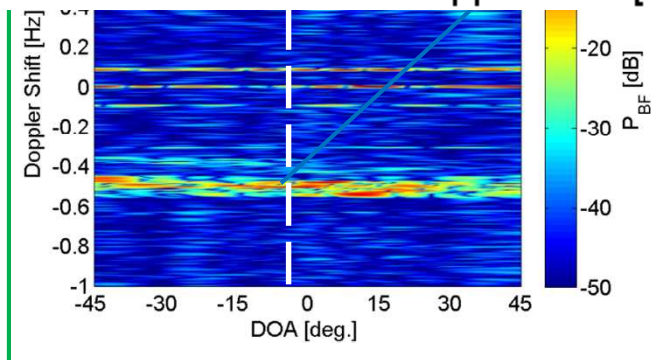
Doppler Shift : -0.4991 Hz

対象距離7.5km時と同様にKR積拡張処理を用いることにより角度分解能改善

実測データ解析結果:対象距離 15km(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ドップラ周波数分解能も改善

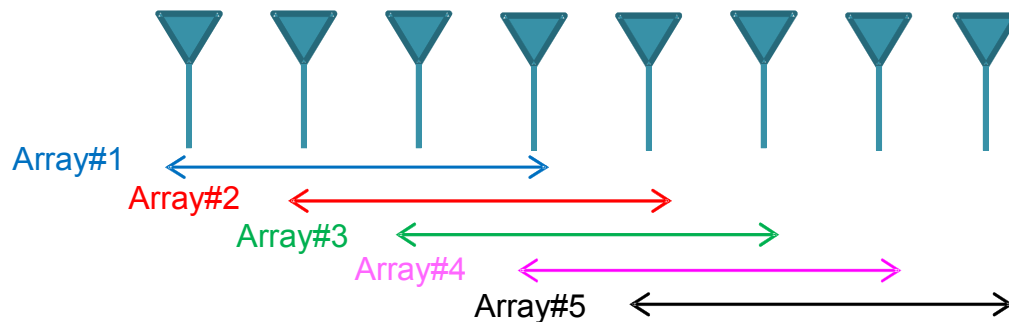
KR積拡張アレー処理の妥当性確認

L素子ULAにKR積拡張アレー処理を用いた場合
実効開口長は $(2L-2)\Delta d$ 素子相当となる

4素子ULA with
KR積拡張アレー

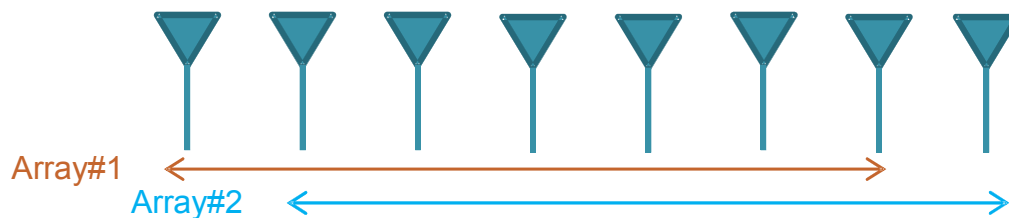
$\doteq$

7素子ULA



4素子選びかた

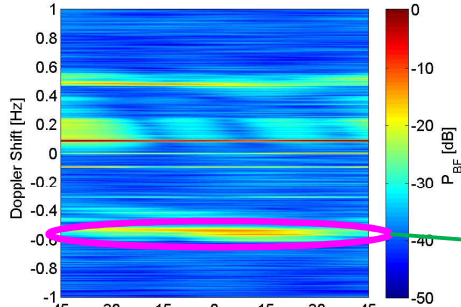
素子選択, 相互結合などの
誤差の影響を軽減するために
平均し, 比較



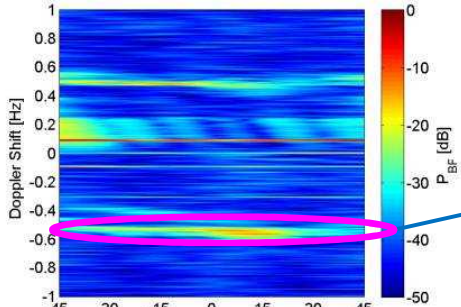
7素子選びかた

妥当性確認結果:対象距離 7.5km (1/2)

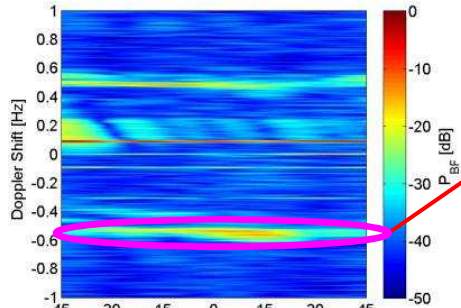
2次元推定スペクトラム



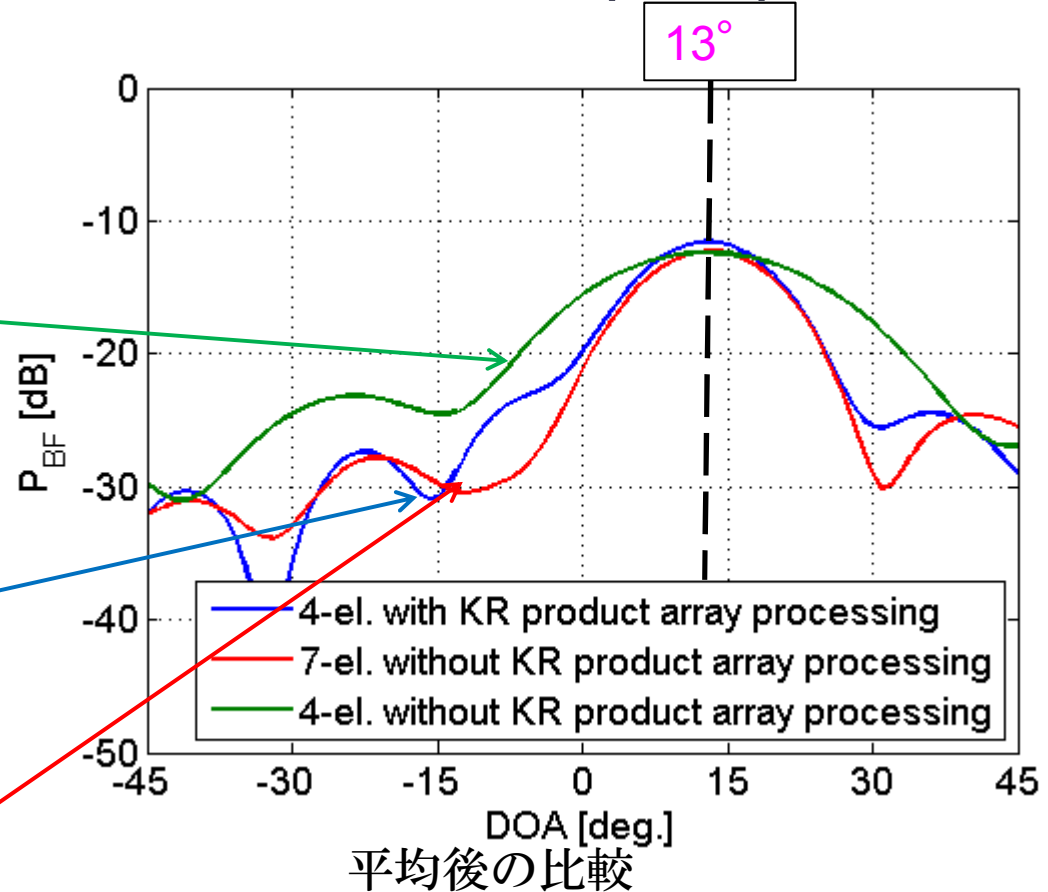
4素子KR積拡張前平均



4素子KR積拡張後平均



7素子KR積拡張前平均

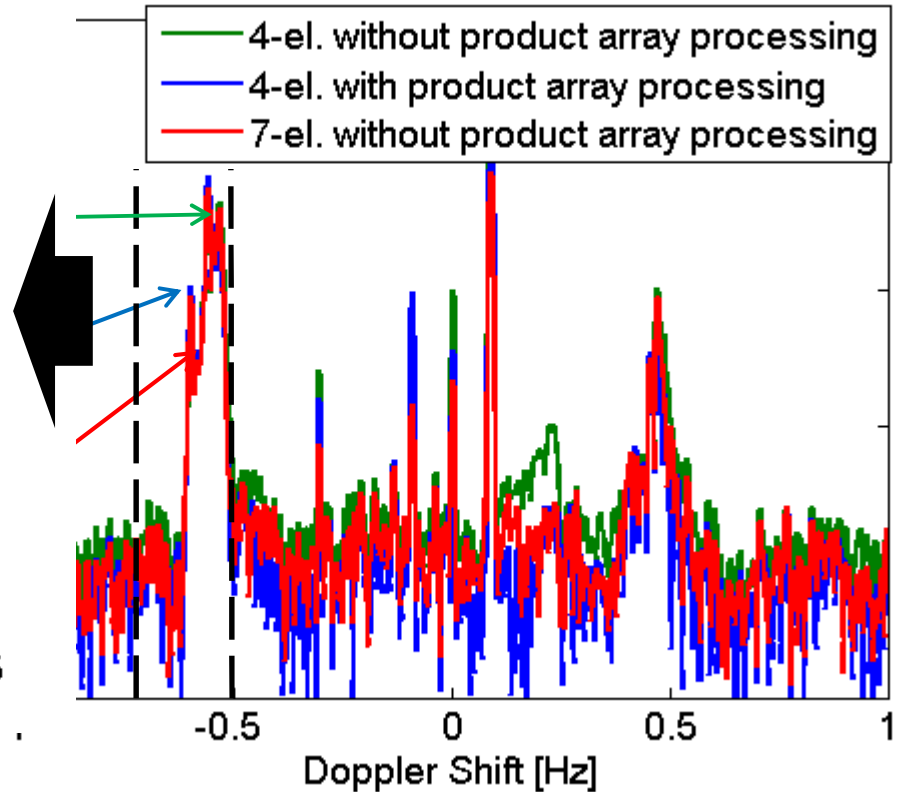
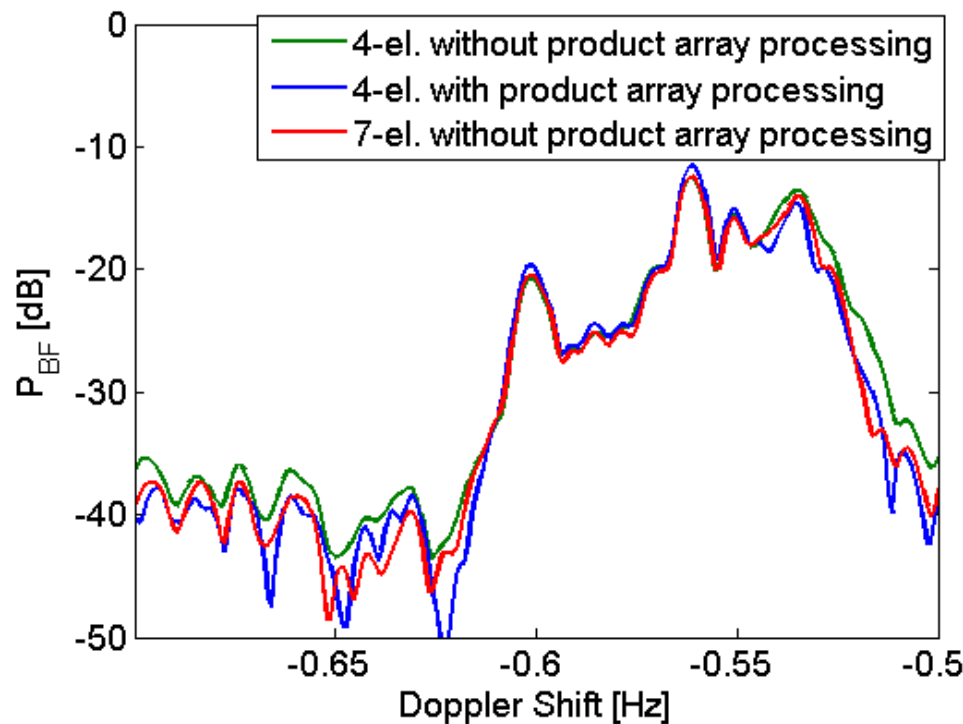


Doppler Shift : -0.5625 Hz

4素子でKR積拡張アレー処理を施した場合と7素子ULAではほぼ同程度の角度分解能を得られていることを確認

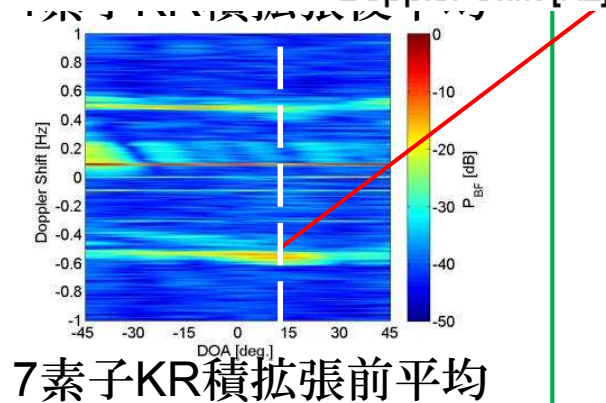
妥当性確認結果:対象距離 7.5km (2/2)

2次元推定スペクトラム



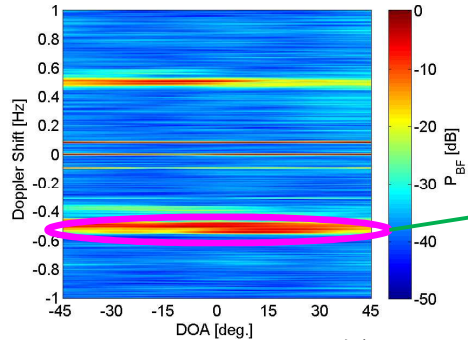
対象角度 13°

ドップラ周波数においても4素子でKR積拡張アレー処理を施した場合と7素子ULAではほぼ同程度の分解能を得られている

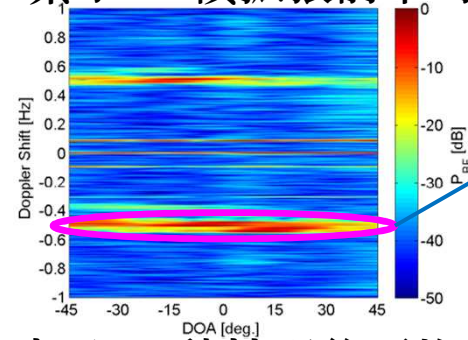


妥当性確認結果:対象距離 15km (1/2)

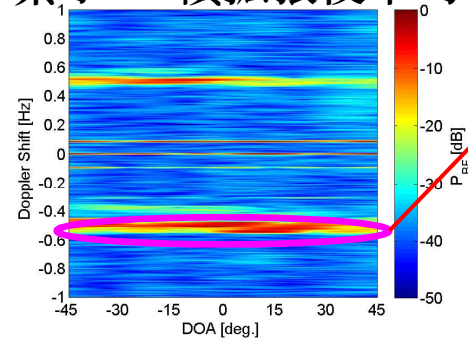
2次元推定スペクトラム



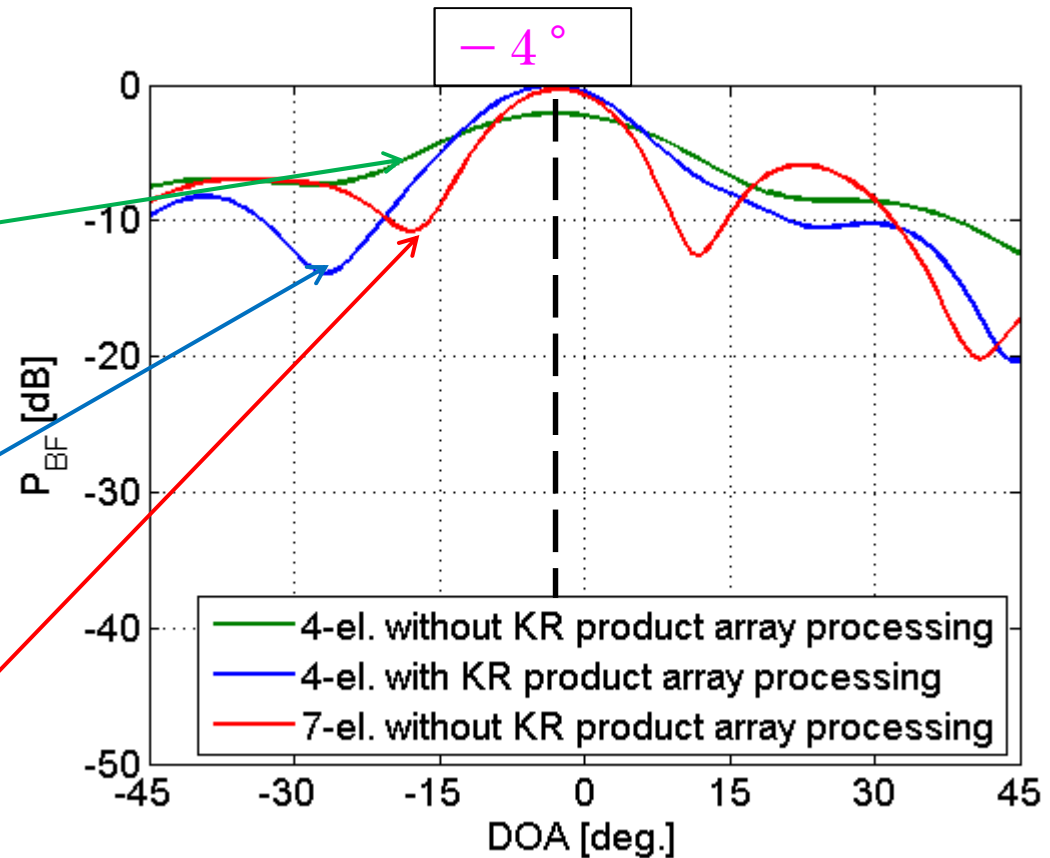
4素子KR積拡張前平均



4素子KR積拡張後平均



7素子KR積拡張前平均

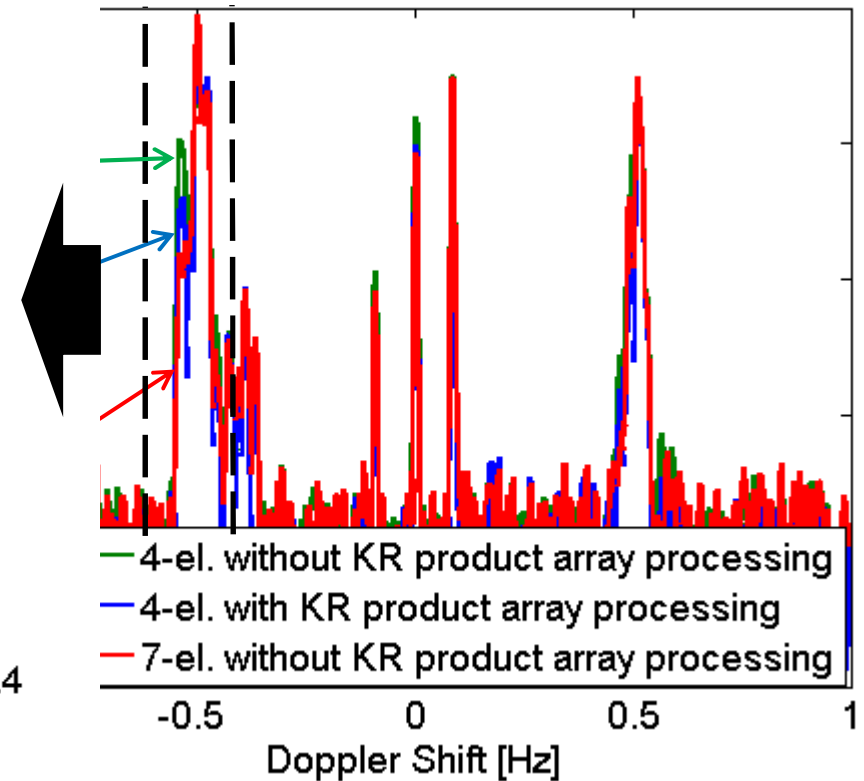
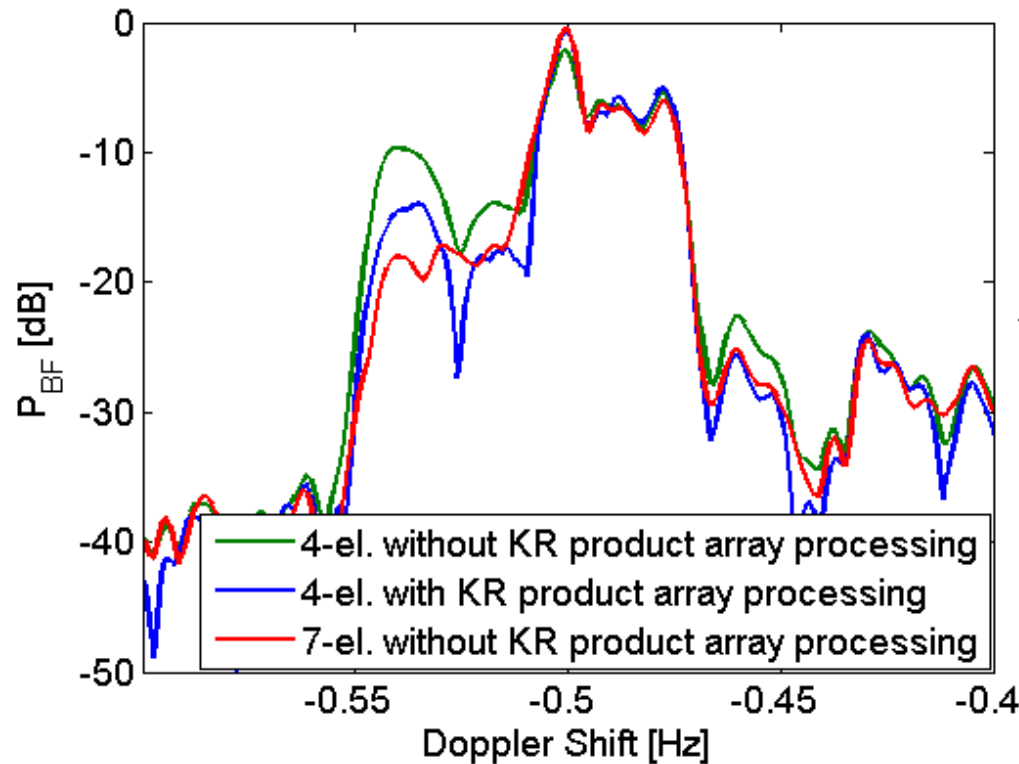


平均後の比較

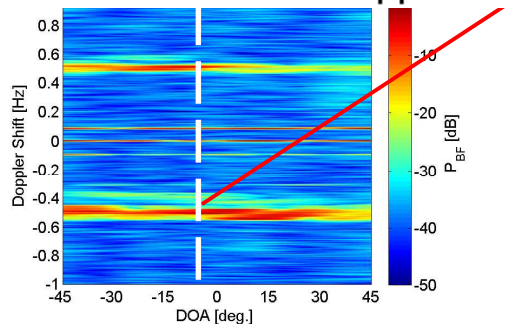
Doppler Shift : -0.4961 Hz

妥当性確認結果:対象距離 15km (2/2)

2次元推定スペクトラム



対象角度 -4°



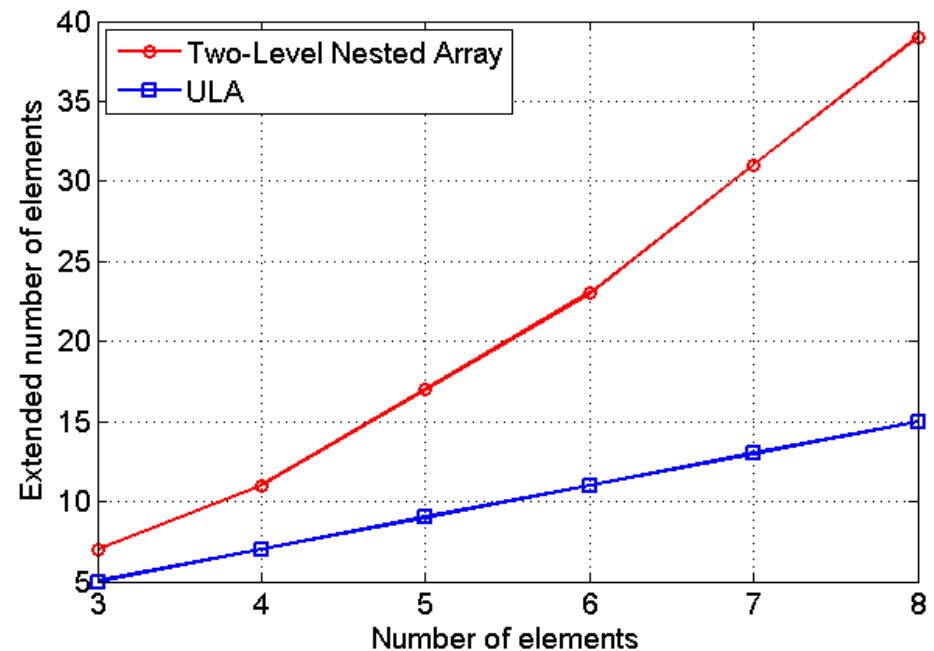
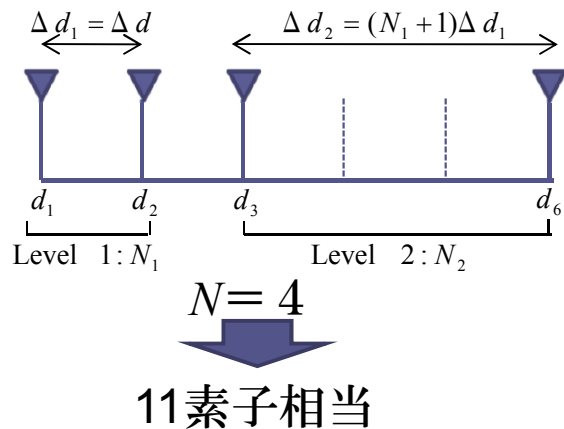
対象距離7.5kmの時と同様に4素子でKR積拡張アレー処理を施した場合と7素子ULAでほぼ同程度の結果が得られている

KR積拡張アレー処理時の素子配置

本発表ではULAを使用

Two-Level Nested Array [2]

アレーの素子間隔を工夫することによって
KR積拡張アレー処理を施す場合，効率的に実効開口長を拡張



利用できる土地がある場合，少ない素子数で効率的に実行開口長を拡張可能

まとめ

陸上設置型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
- ドップラ周波数分解能改善
- L素子ULAにKR積拡張アレー処理を施した場合，
(2L-1)素子相当の角度・周波数分解能が得られることを確認

Khatri-Rao積拡張アレー処理

- 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

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
 - ✓ 流速の2次元マップを作り，シミュレーション
- Two-Level Nested Arrayを用いた場合の分解能改善の検討

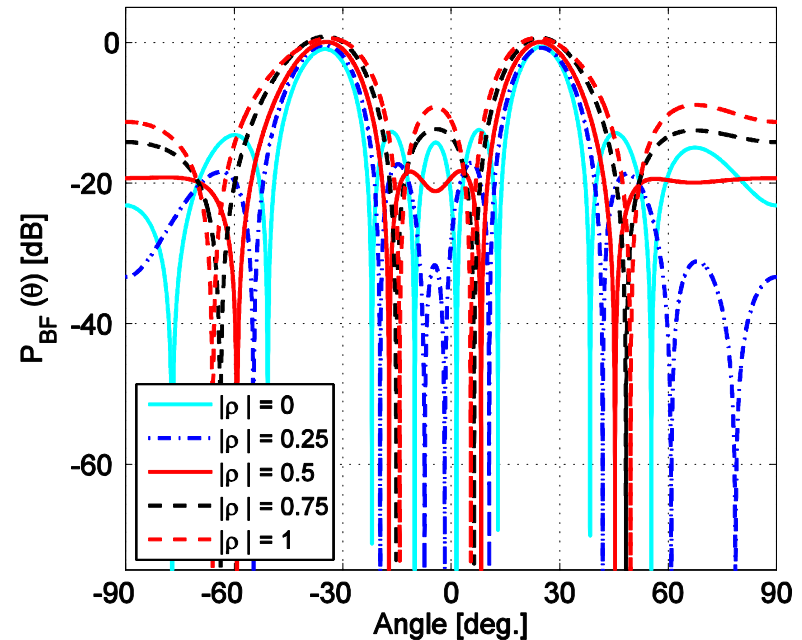
ご清聴ありがとうございました

KR積拡張アレー処理を使用した時のデメリット

相関係数を変化させたときの
KR積拡張アレー処理シミュレーション結果

到来方向	-35° , 25°
スナップショット数	1000
SNR	20 [dB]
到来波数	2
アレー形状	TLNA

完全相関波に近づくにつれて
到来方向推定の精度が劣化



相関係数を変化させたときの
ビームフォーマ空間スペクトラム