

アレイアンテナを用いた速度計測における到来 方向推定法の適用

琉球大学大学院 理工学研究科

永江要 藤井智史

発表内容

1. 研究背景
2. レーダによる海面測定
3. 到来方向推定法
4. シミュレーション
5. まとめおよび今後の課題

研究背景

海岸線長さ

- 1位 カナダ
- 2位 インドネシア
- 3位 グリーンランド
- 4位 ロシア
- 5位 フィリピン
- 6位 日本 約33400km
- 9位 アメリカ
- 11位 中国

<http://www.geocities.jp/wdbkwy/wdyhmfwys30.html>

↓ 海洋観測ブイ



↓ 海洋観測船

啓風丸



<http://www.zenilite.co.jp/product/kansoku.html#anko4>

https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/vessel_obs/description/vessels.html

Beamforming



八木アンテナ



Richard Bartz, Munich aka Makro Freak - 投稿者自身による作品, CC 表示-継承 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3822306>による

パラボラアンテナ



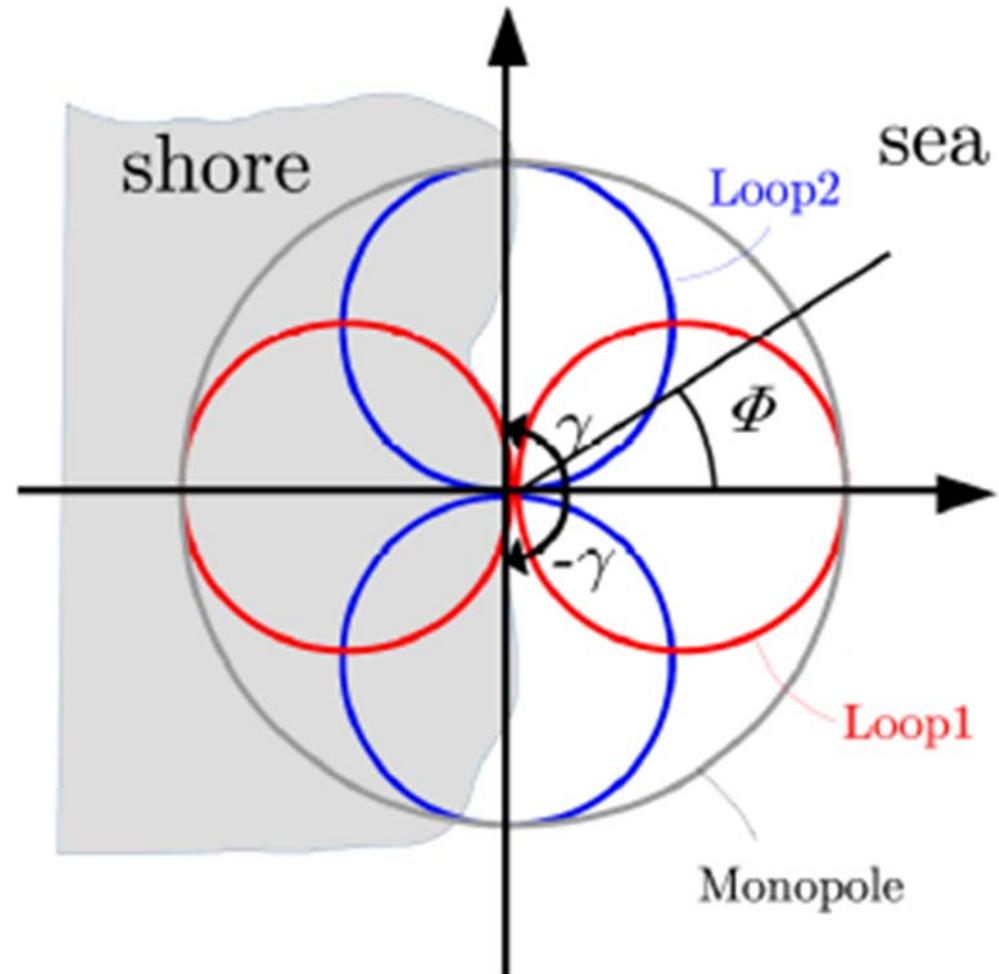
<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/oceanradar/>

アレイアンテナ

MUSIC

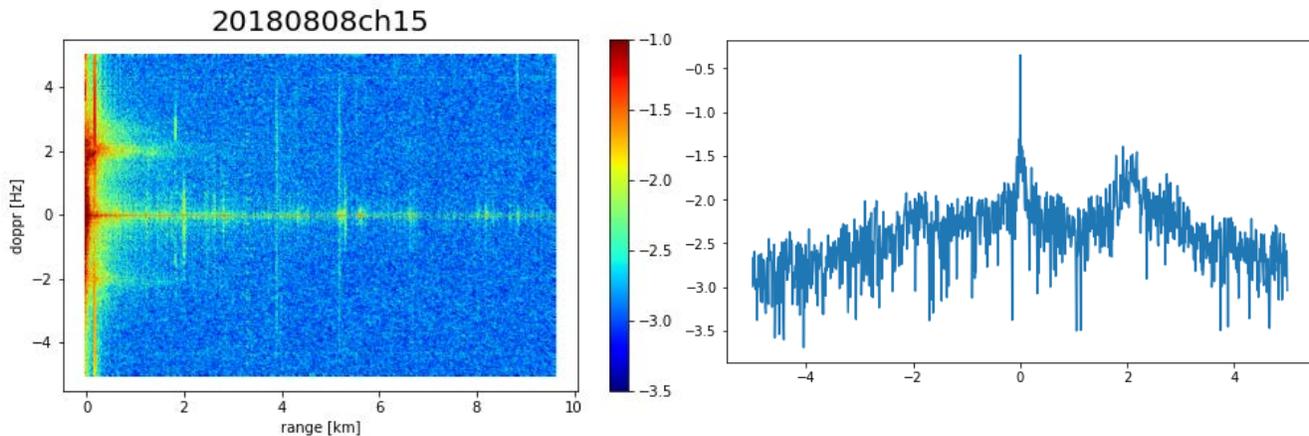


<http://www.s-vans.com/SV-SeaSonde/index.html>

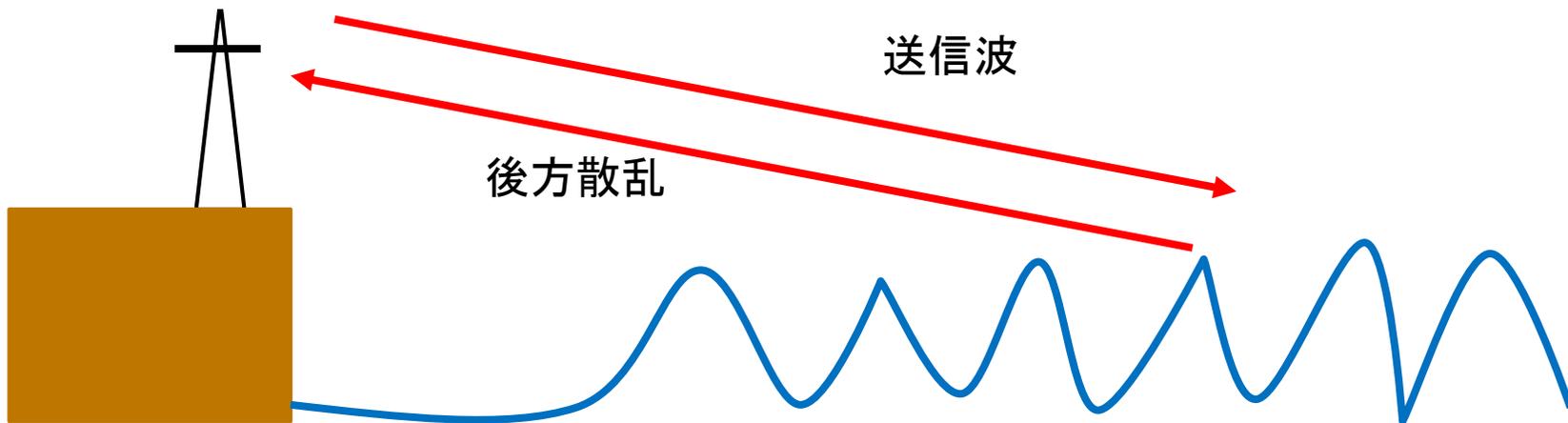


レーダによる海面測定

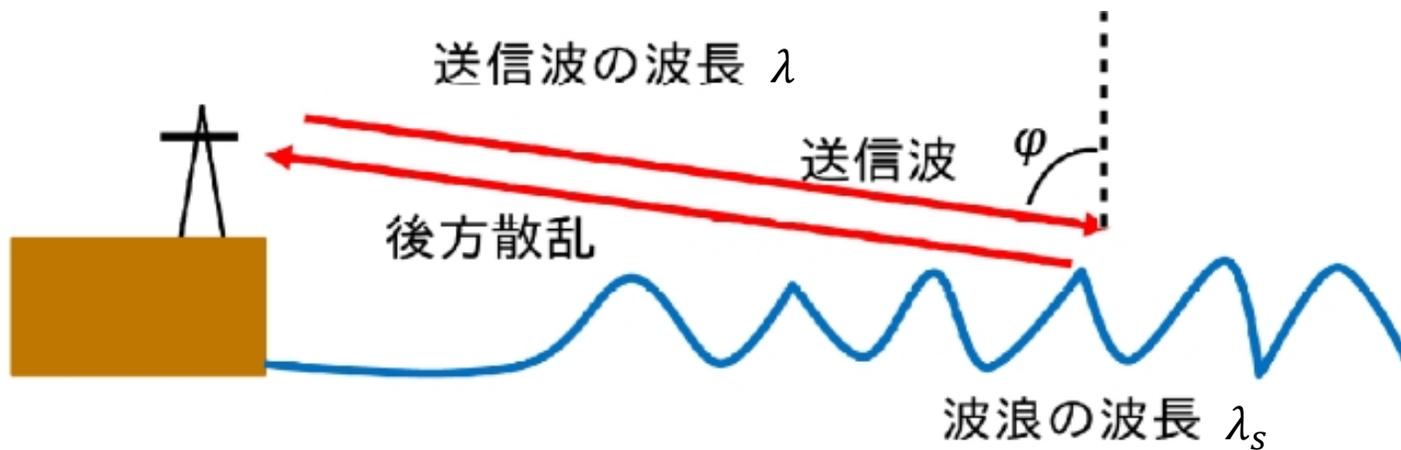
海洋レーダー



海面で後方散乱した電波を受信し流速などの物理量を得る



Bragg散乱



$$\lambda = 2\lambda_s \sin \varphi$$

このとき

$$\varphi \approx 90^\circ$$

とすると

$$\lambda = 2\lambda_s$$

電波の波長が波浪波長の2倍で
Bragg散乱が起きる

λ :電波の波長 λ_s :波浪の波長 φ :入射角

Bragg散乱

g を重力加速度、 λ を電波の波長とすると、Bragg周波数 f_D は

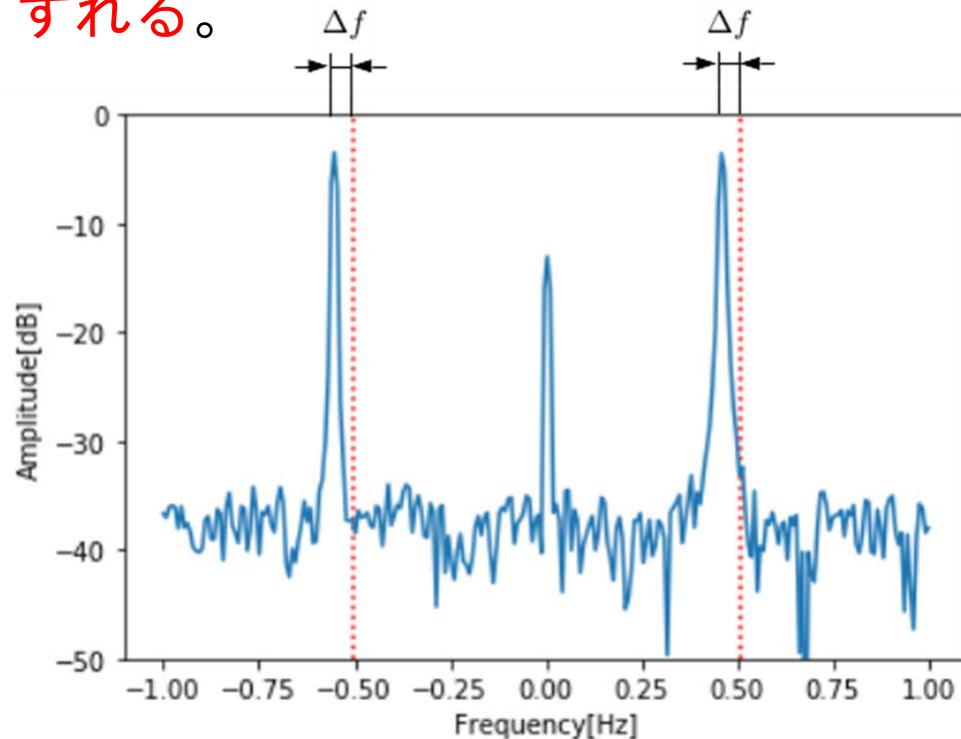
$$f_D = \pm \sqrt{\frac{g}{\pi\lambda}}$$

- 周波数を24.5MHzとすると電波の波長は12.24mとなるので、Bragg周波数 f_D は

$$f_D = \pm 0.505[\text{Hz}]$$

流速計算

- 測定で得られるドップラースペクトルは、表層流の速度成分に応じて、Bragg周波数から Δf ずれる。



$$v_s = \frac{c\Delta f}{2\lambda}$$
$$\Delta f = f_p \pm f_D$$

λ : 送信周波数

f_D : Bragg周波数

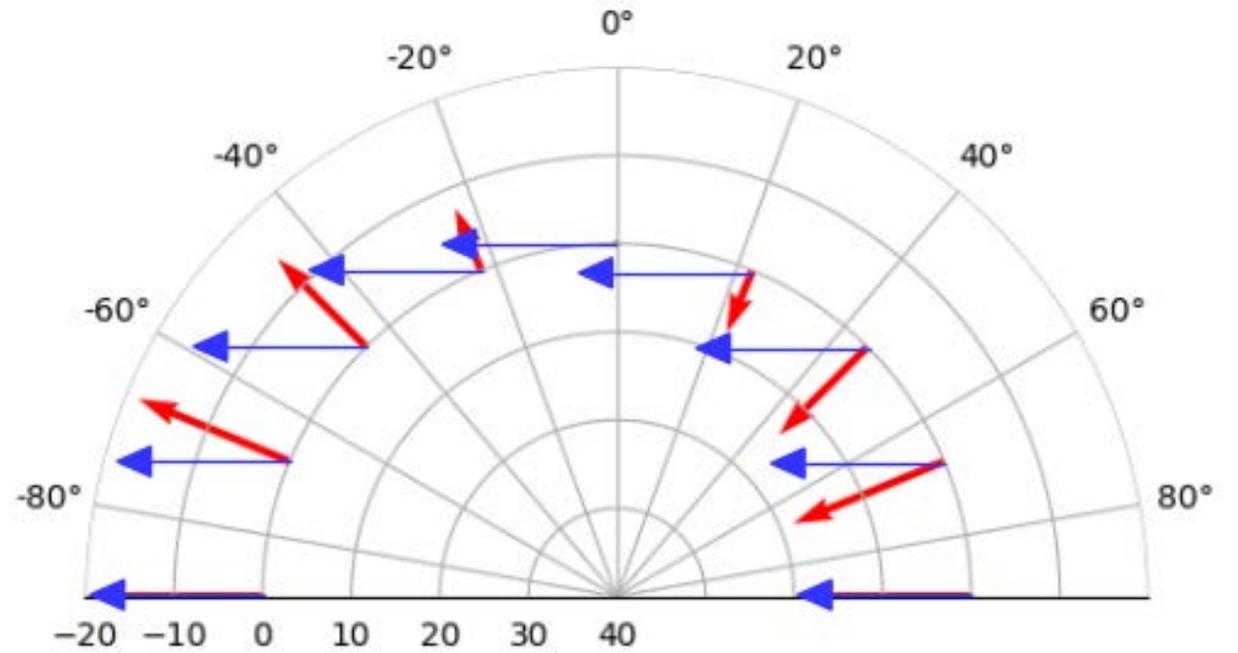
f_p : スペクトルピーク

c : 光速度

ピークのドップラー周波数が流速に対応

視線方向流速

- レーダーから見た方向（視線方向）の流速しか測定できない
- 2点から測定を行いベクトル合成することで流速場を求めることが可能
- 向かってくる流速を正に流速と定義



← 実際の流速

← 測定で得られる流速
(視線方向流速)

到来方向推定法

到来方向推定

- Beamforming

特定方向に指向性を最大にする

- 指向性アンテナの利用（八木アンテナ、パラボラアンテナ）
- アレイアンテナによるビーム形成（短波帯海洋レーダでの主な方法）

- MUSIC（Multiple Signal Classification）

雑音部分空間と信号部分空間の直交性を利用

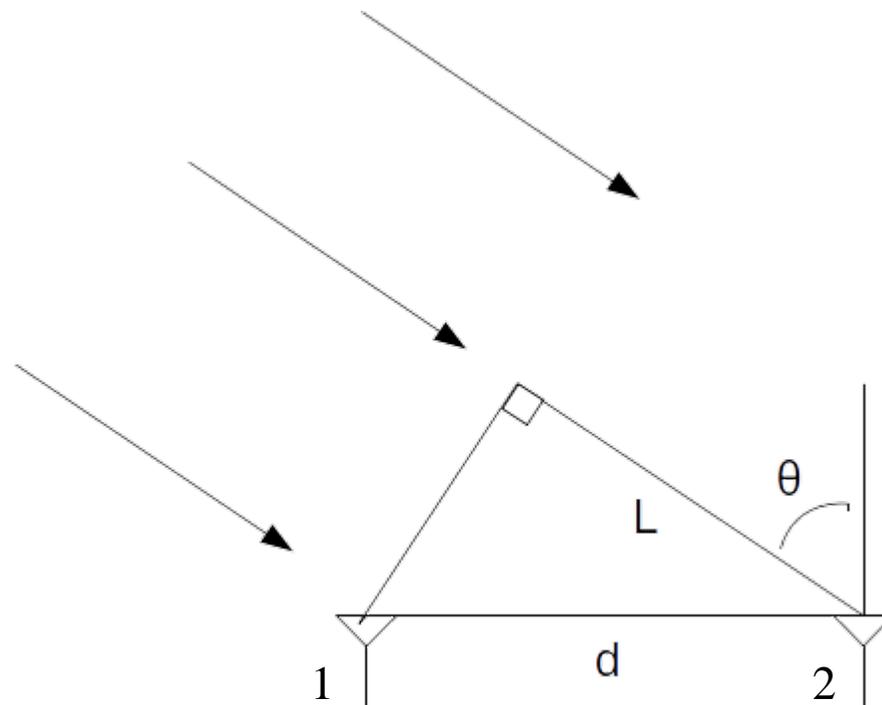
- アレイアンテナの高分解能周波数推定
- 海洋レーダではCODAR社のSeasonde

Beamforming

- 到来方向を θ 、素子間隔を d とすると素子2の遅延距離 L は

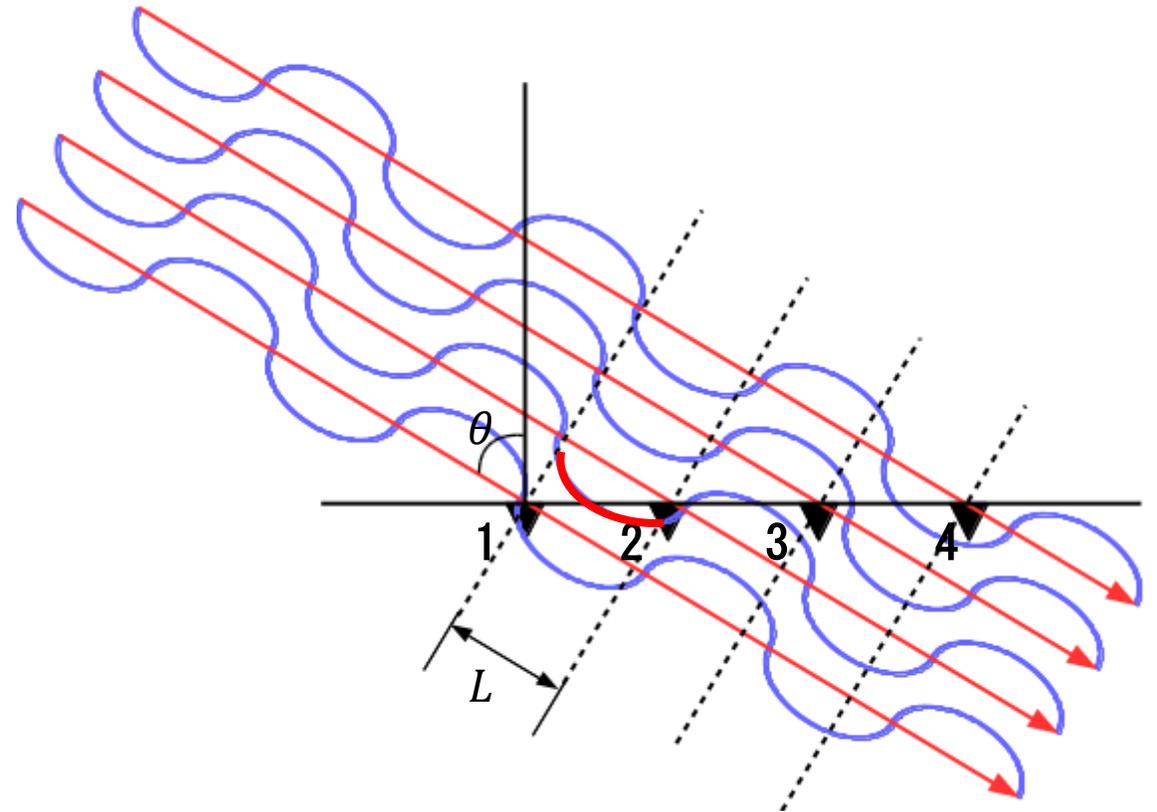
$$L = d \sin \theta$$

- 到来波は平面波とする



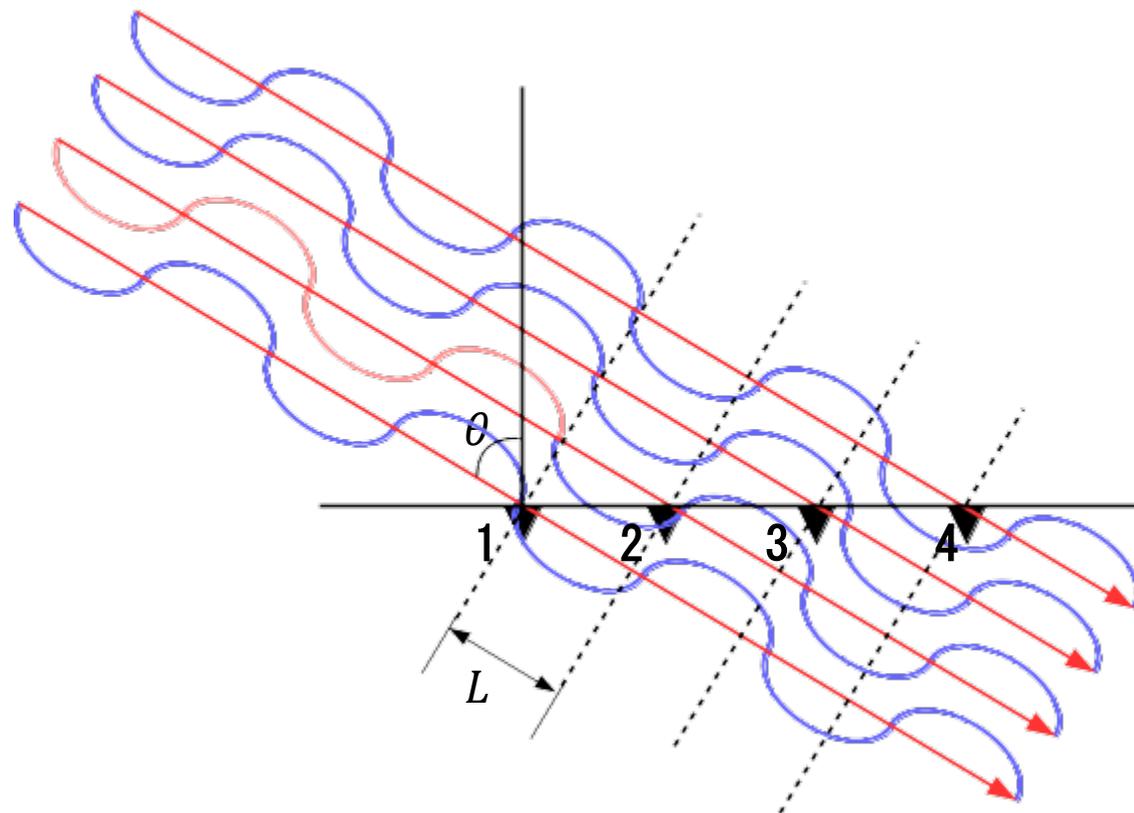
Beamforming

- 波数 $\frac{2\pi}{\lambda}$ とすると、素子1との位相差 ϕ は
- $\phi = d \sin \theta \frac{2\pi}{\lambda}$
- 素子1の受信信号と比べ、素子2の受信信号は位相 ϕ 遅れて受信する

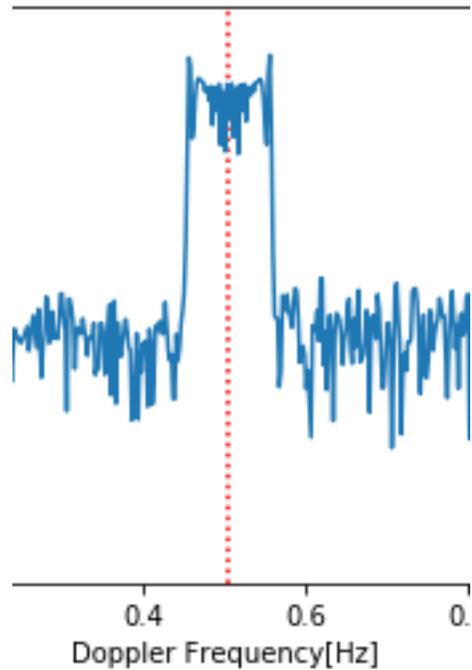


Beamforming

- 素子2の受信信号を位相 ϕ 進ませることで素子1の受信信号と揃う
- 仮想的に特定の方位にビームを形成できる

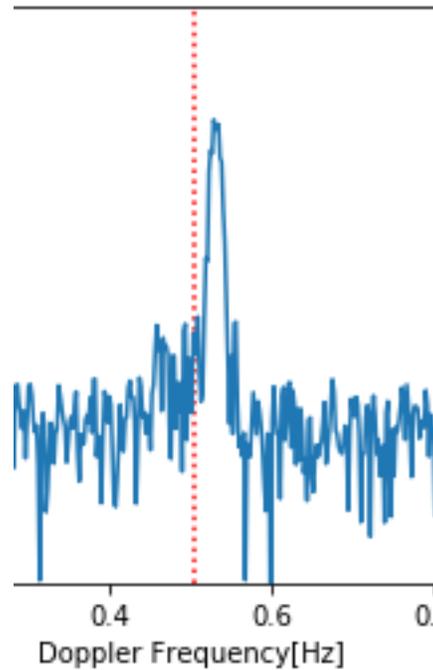


Beamforming



複数の成分
一様流速

ビーム形成
→
方位30°



1つの成分

流速14.588cm/s

特定の方位にビームを形成することで特定の周波数のピークが現れる

その周波数に対応する流速がその方位の流速となる

到来方向推定法(MUSIC)

- 相関行列とステアリングベクトルから到来方向を推定する方法
- アンテナの振幅位相応答をステアリングベクトル $a(\theta)$ とする
- N 個のアンテナからの受信信号を $x_n(t)$ とし、 N 次元ベクトル $X(t)$ を以下のよう
に定義する。

$$X(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \cdots \ x_n(t)]$$

- このとき、相関行列は以下のようなになる。

$$R = E\{X(t)X^H(t)\}$$

$E\{\}$: アンサンブル平均

H : 複素共役転置

到来方向推定法(MUSIC)

- 相関行列に固有値解析を行い、固有値と固有ベクトルを求める
- 雑音電力と等しい固有値を持つ固有ベクトルを雑音固有ベクトル e_i とする
- 信号の到来方向のステアリングベクトルはすべての雑音固有ベクトルと直交する
- その性質を用いて以下の式を定義する

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{e}_i\mathbf{e}_i^H\mathbf{a}(\theta)}$$

- 信号がある方向では分母が0となり鋭いピークが現れる

海洋レーダにおけるMUSIC

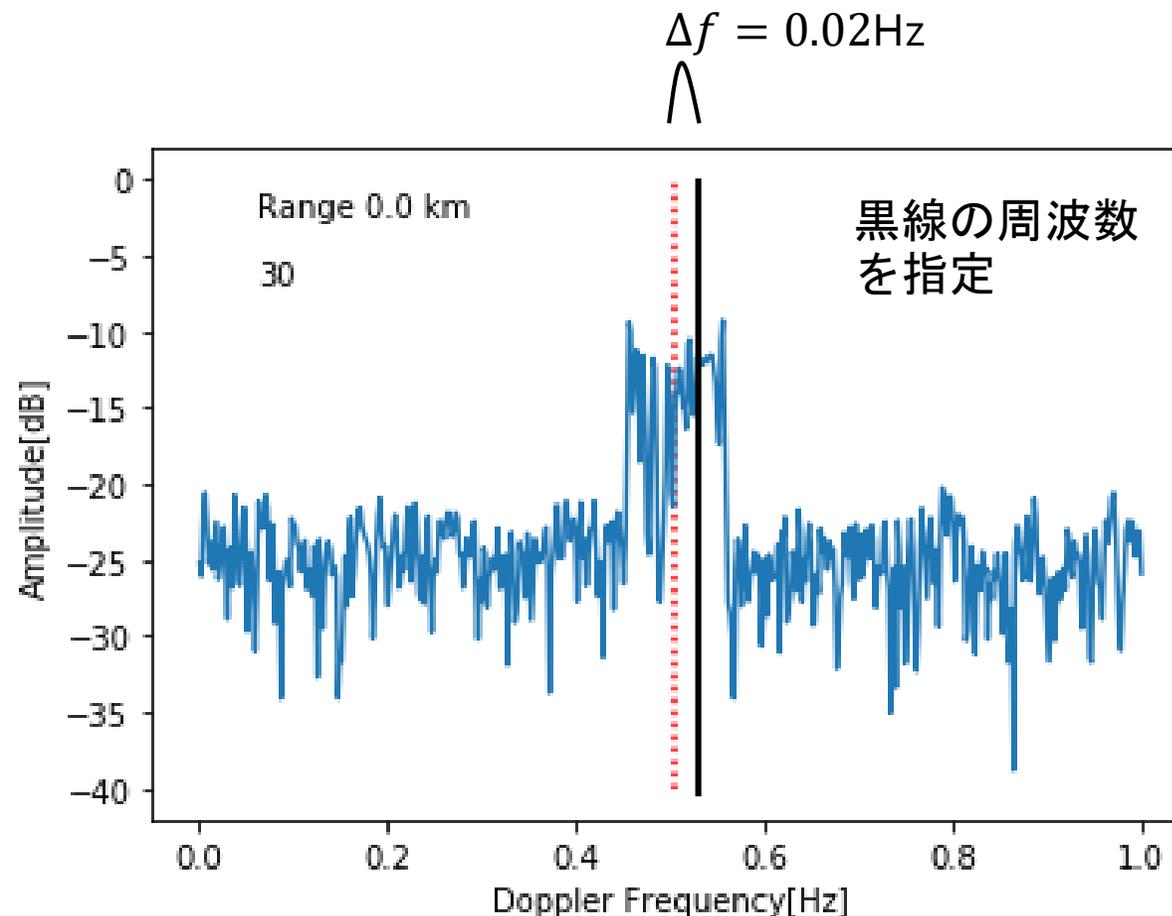
- ドップラースペクトル $V(\omega)$ の周波数 ω を指定することで、周波数に対応する流速の方位を推定する

➤ $f = 24.5\text{MHz}$ $\lambda = 12.24\text{m}$ $\omega = 0.507\text{Hz}$

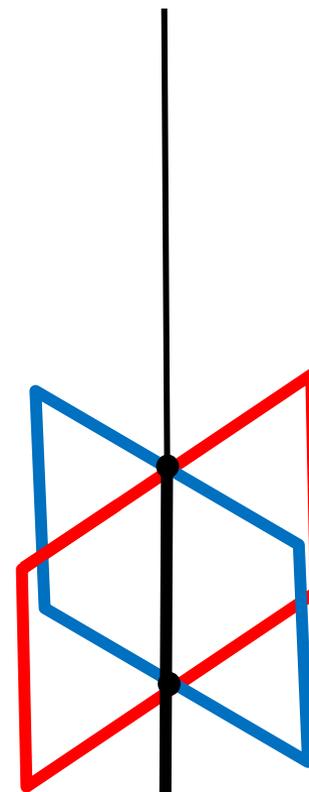
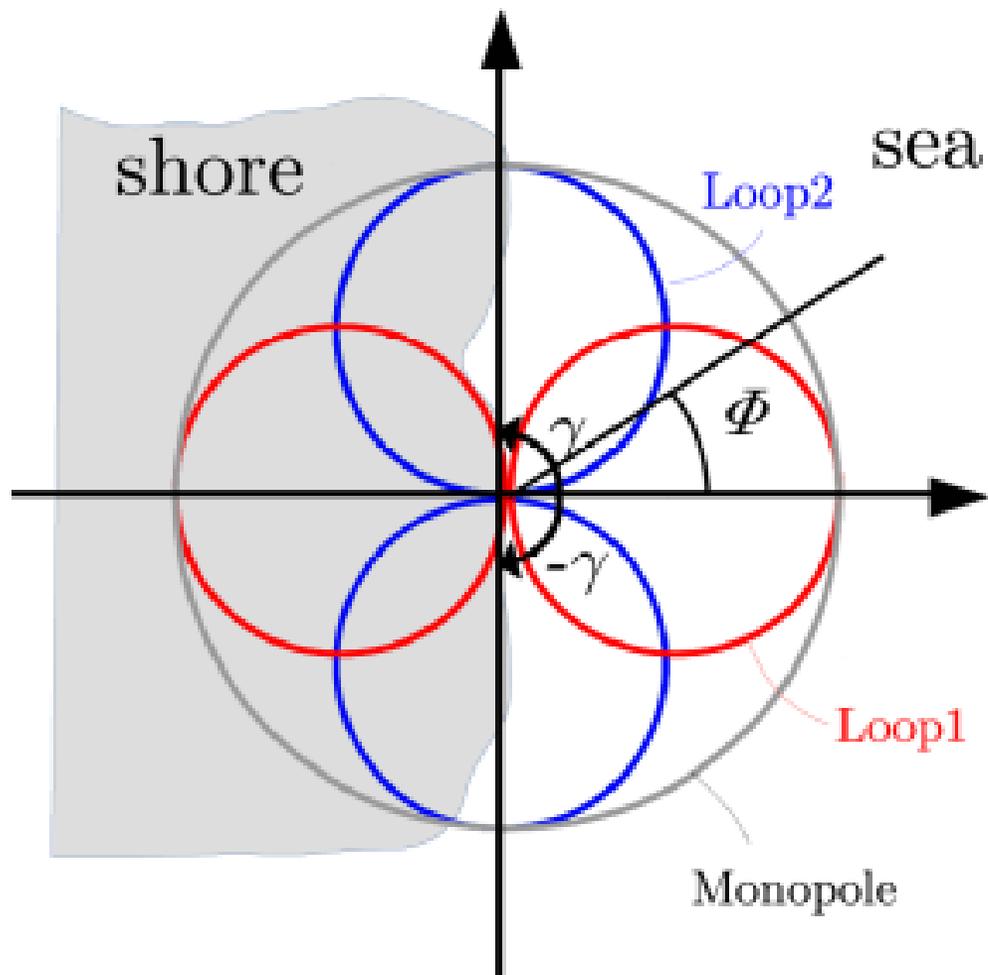
➤ $\Delta f = 0.507 - 0.505 = 0.02\text{Hz}$

➤ $v_s = \frac{c\Delta f}{2\lambda} = 12\text{cm/s}$

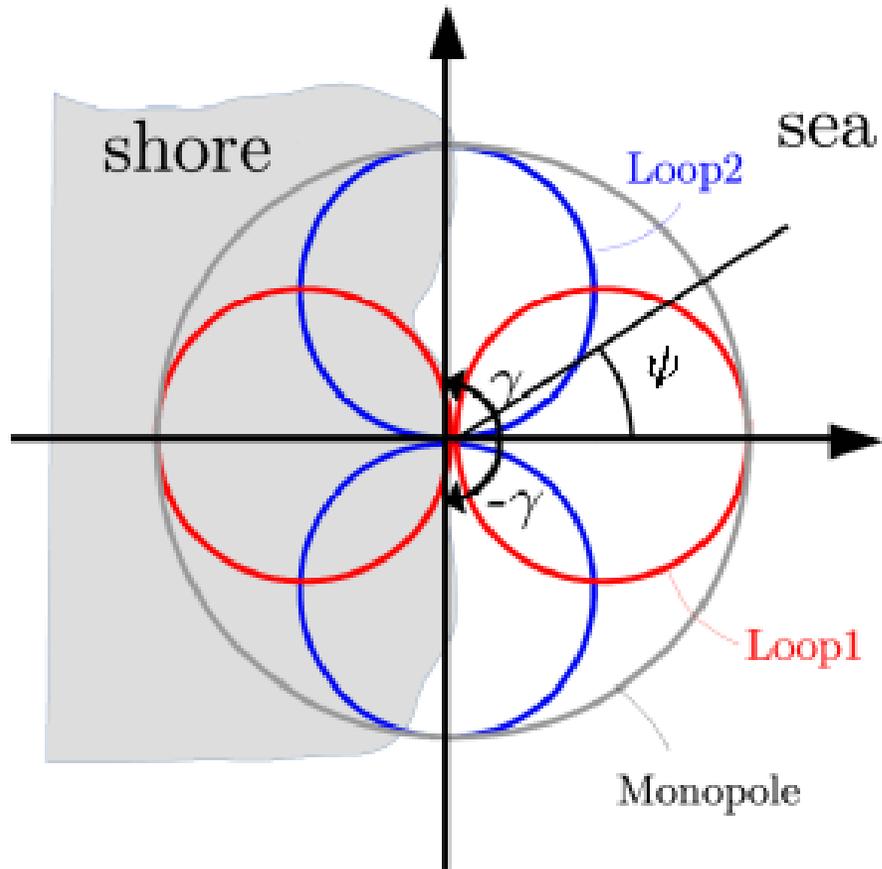
- $\omega = 0.507\text{Hz}$ と指定すれば12cm/sの流速の到来方向を推定できる



クロスループモノポールアンテナ



クロスループモノポールアンテナ



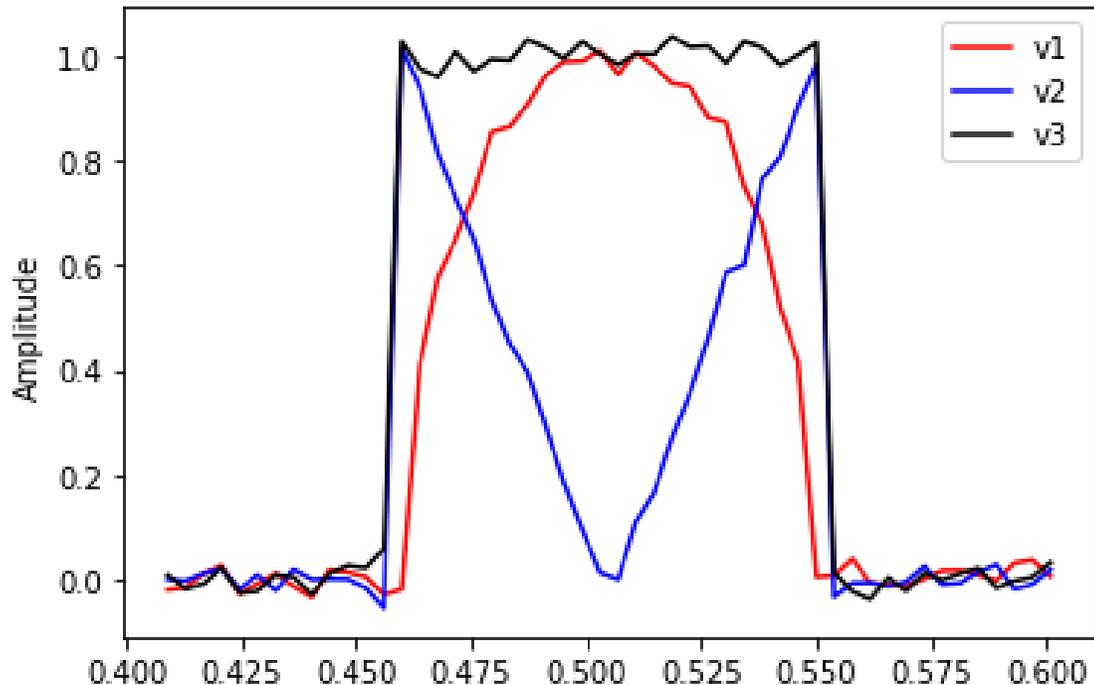
$$V_1(\omega) = \int_{-\gamma}^{\gamma} \cos \psi g(\omega, \psi) d\psi$$

$$V_2(\omega) = \int_{-\gamma}^{\gamma} \sin \psi g(\omega, \psi) d\psi$$

$$V_3(\omega) = \int_{-\gamma}^{\gamma} g(\omega, \psi) d\psi$$

$$\mathbf{a}(\theta) = [\cos \psi \quad \sin \psi \quad 1]$$

クロスループモノポールアンテナ



$$V_1(\omega) = \int_{-\gamma}^{\gamma} \cos \psi g(\omega, \psi) d\psi$$

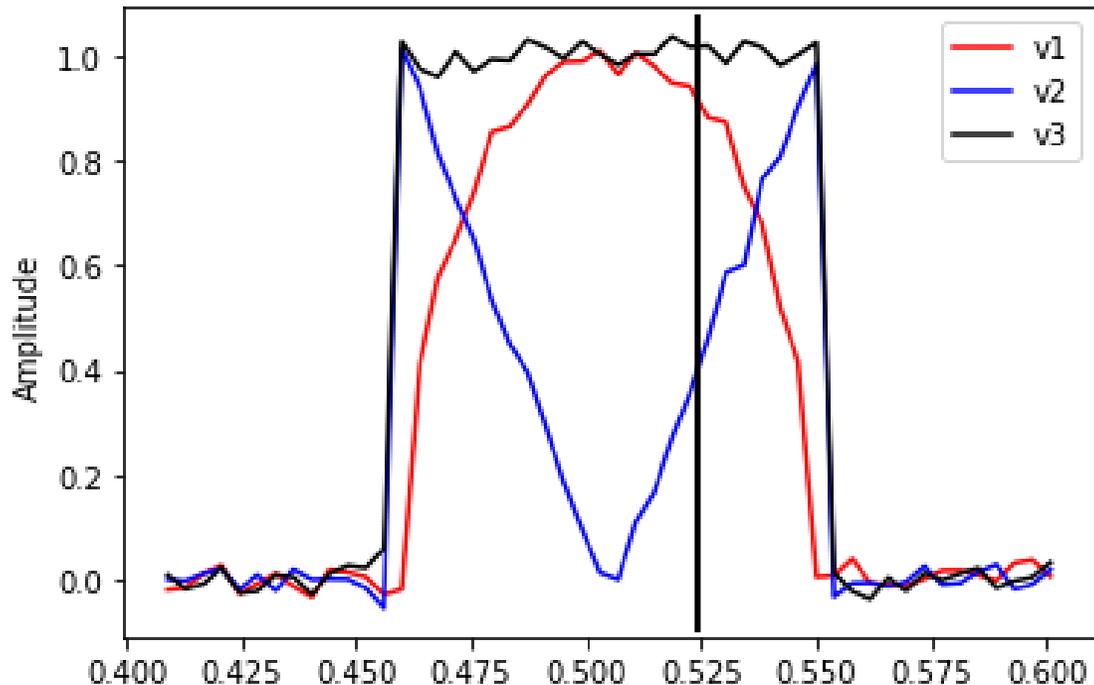
$$V_2(\omega) = \int_{-\gamma}^{\gamma} \sin \psi g(\omega, \psi) d\psi$$

$$V_3(\omega) = \int_{-\gamma}^{\gamma} g(\omega, \psi) d\psi$$

$$\mathbf{a}(\theta) = [\cos \psi \quad \sin \psi \quad 1]$$

クロスループモノポールアンテナ

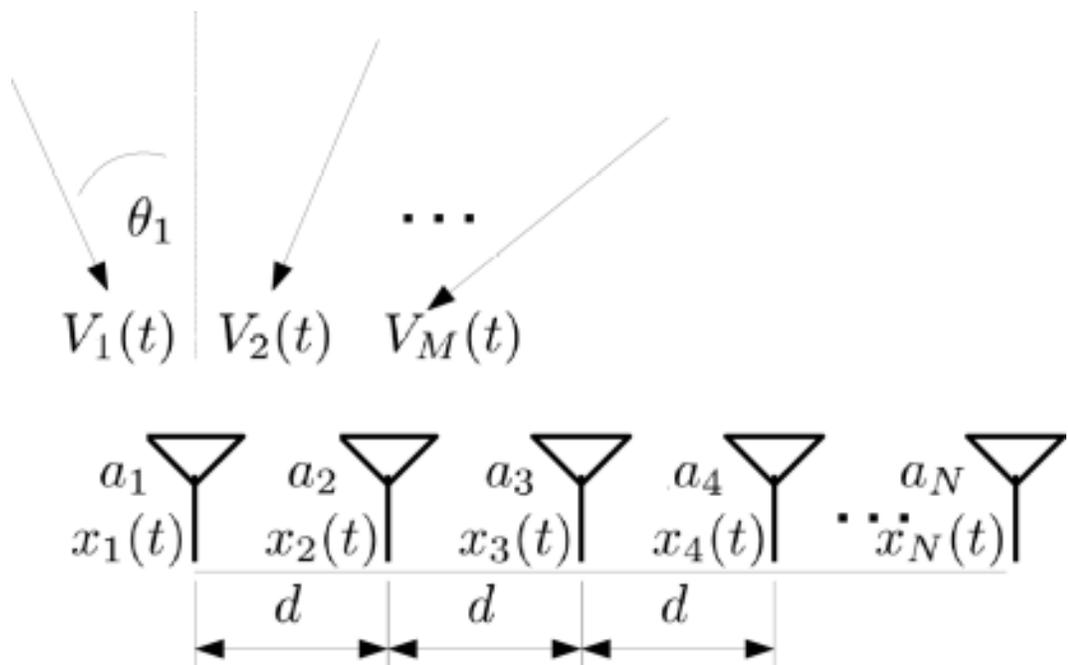
$$\langle R \rangle = \begin{bmatrix} \langle V_1(\omega)V_1^*(\omega) \rangle & \langle V_1(\omega)V_2^*(\omega) \rangle & \langle V_1(\omega)V_3^*(\omega) \rangle \\ \langle V_2(\omega)V_1^*(\omega) \rangle & \langle V_2(\omega)V_2^*(\omega) \rangle & \langle V_2(\omega)V_3^*(\omega) \rangle \\ \langle V_3(\omega)V_1^*(\omega) \rangle & \langle V_3(\omega)V_2^*(\omega) \rangle & \langle V_3(\omega)V_3^*(\omega) \rangle \end{bmatrix}$$



$\langle V_1(\omega)V_1^*(\omega) \rangle$: クロススペクトル

相関行列 $\langle R \rangle$ に固有値解析を行い
周波数 ω に対応する流速の
到来方向を推定する

アレイアンテナ



ステアリングベクトルは

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

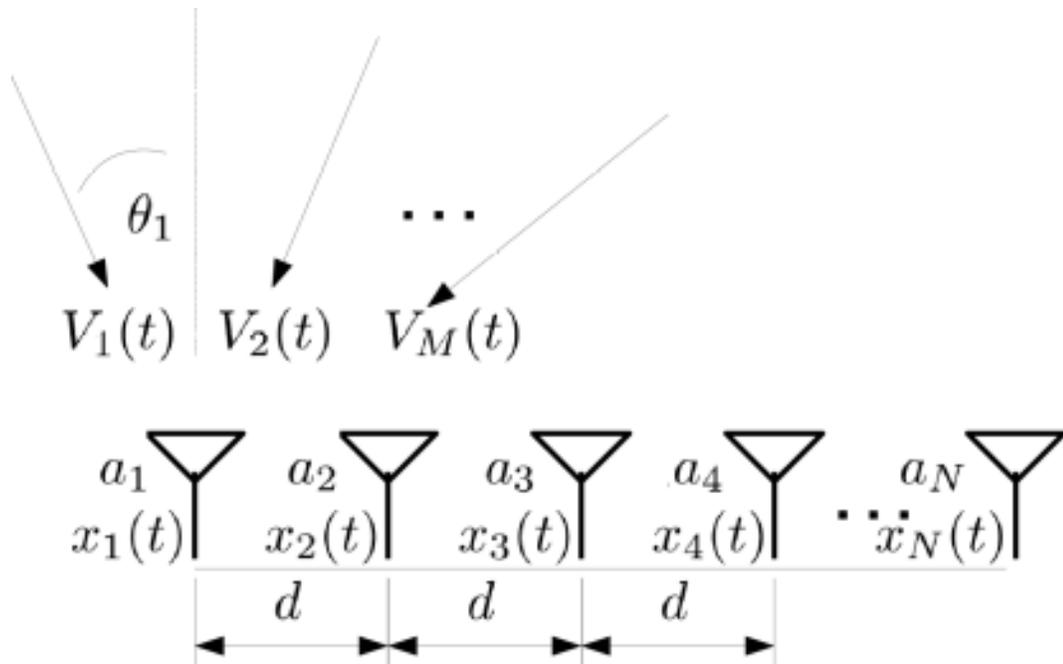
アンテナ a_n が、到来方向 θ_m 、表層流速 v_m における海面からの Bragg 散乱による信号を、受信したときの受信信号 $V_n(t)$ は

$$V_n(t) = A_m e^{j\omega_m t - j\frac{2\pi}{\lambda}(n-1)d \sin \theta_m} + n(t)$$

流速による角周波数 ω_m は

$$\omega_m = 2\pi(f_D + \Delta f_m)$$

アレイアンテナ



$$\langle R \rangle = \begin{bmatrix} \langle V_1(\omega)V_1^*(\omega) \rangle & \cdots & \langle V_1(\omega)V_N^*(\omega) \rangle \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle V_N(\omega)V_1^*(\omega) \rangle & \cdots & \langle V_N(\omega)V_N^*(\omega) \rangle \end{bmatrix}$$

相関行列 $\langle R \rangle$ に固有値解析を行い周波数 ω に対応する流速の到来方向を推定する

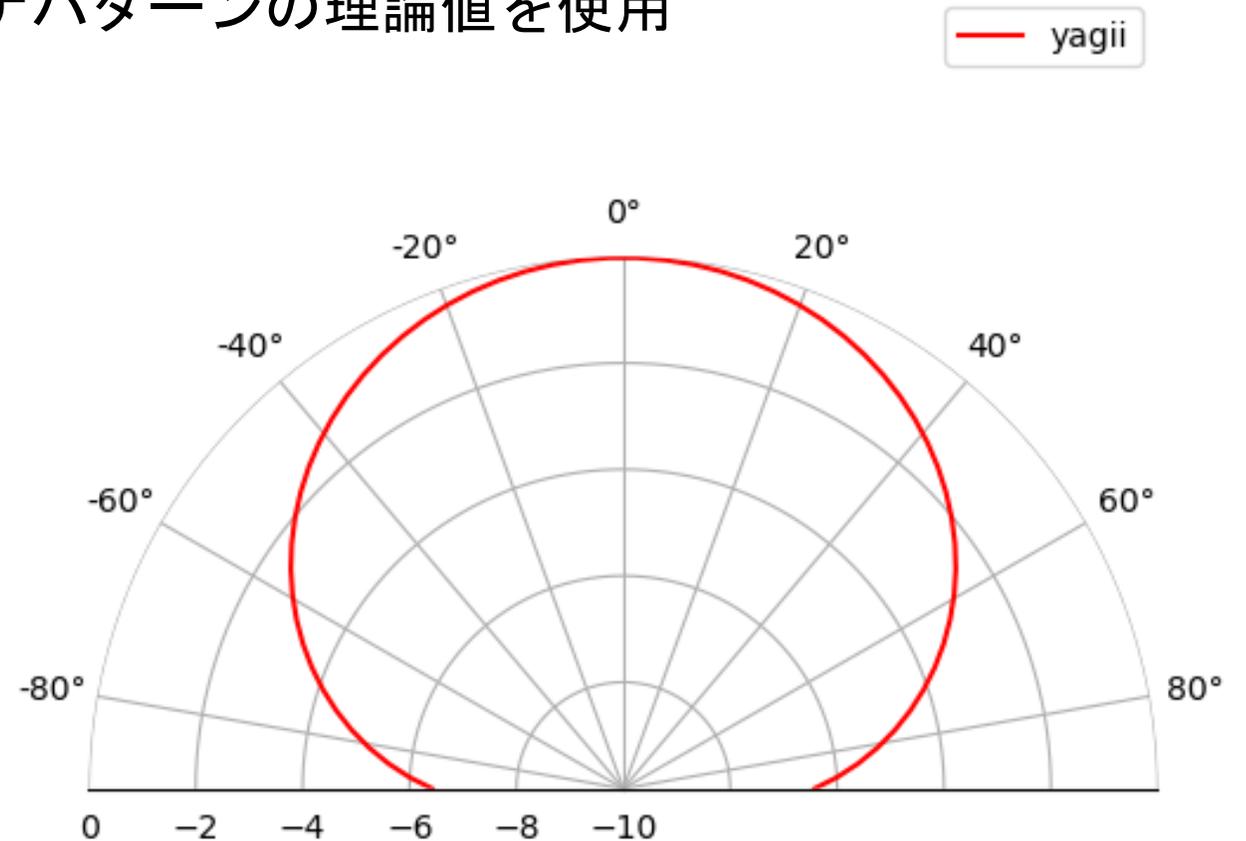
シミュレーション

シミュレーション

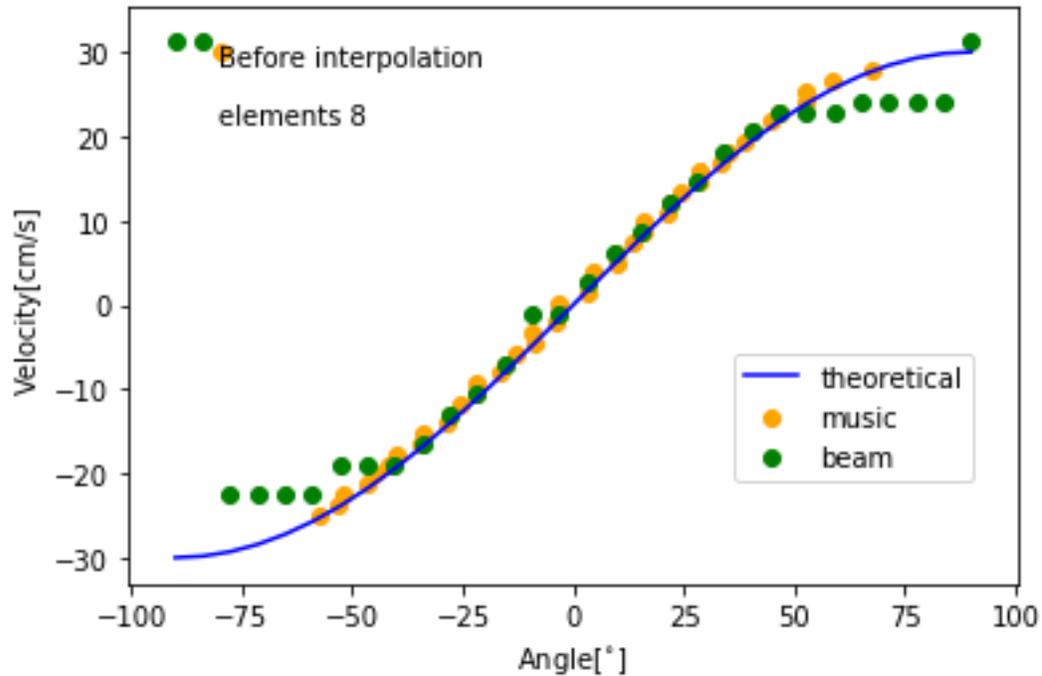
- 送信周波数24.5MHz
- 掃引時間0.5秒
- 掃引数1024
- 散乱距離0
- 各方位同一の海面散乱
- FMCWレーダを想定し、周波数差のみを考慮する
- ノイズは振幅B、 $0 \sim 2\pi$ の一様分布を β としたとき以下の式で与えた
- $n(t) = B(\cos \beta + j \sin \beta)$

アンテナパターン

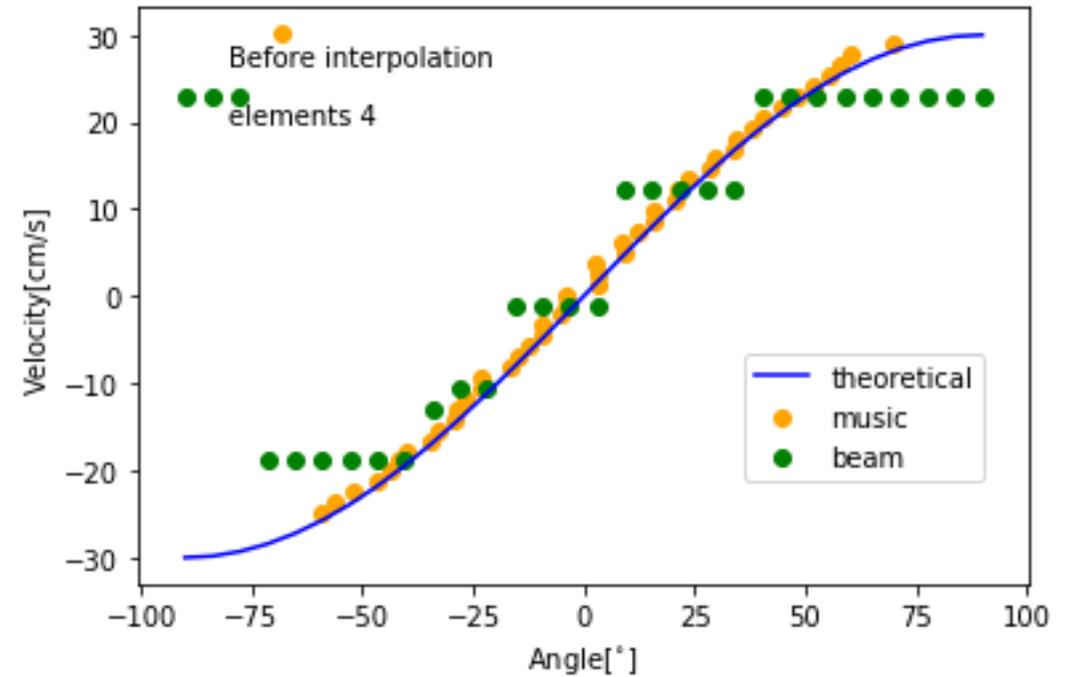
- 実際の測定で使われているアンテナパターンの理論値を使用
- 2エレメント垂直八木アンテナ



素子数による影響（一様流速）



素子数8



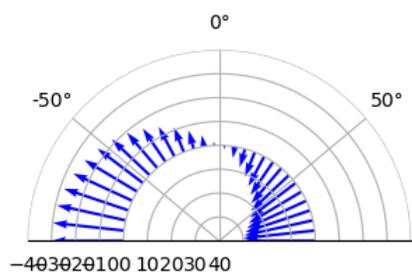
素子数4

SN比9dB

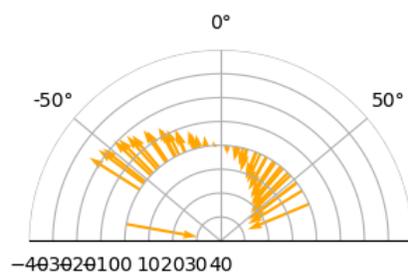
開口長が短くなり精度が悪くなる

MUSICは影響が少ない

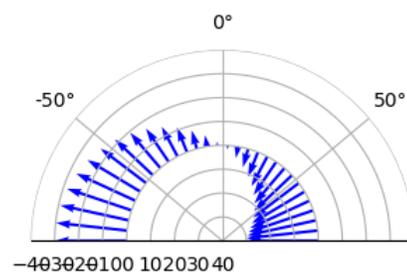
素子数による影響（一様流速）



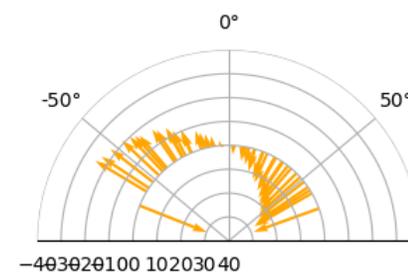
(a) theoretical



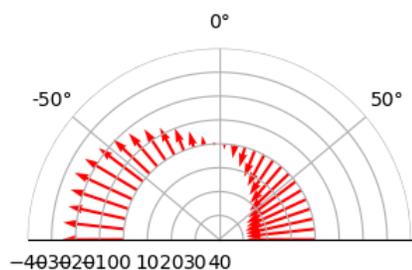
(b) music



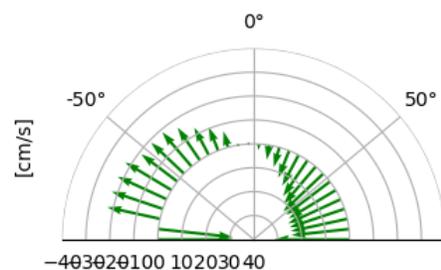
(a) theoretical



(b) music

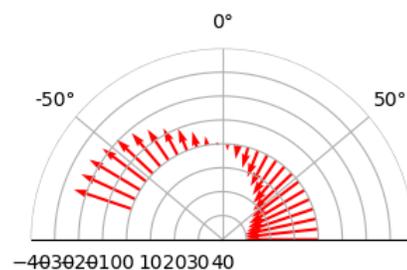


(c) music(interpolation))

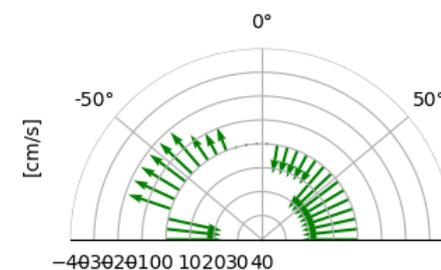


Angle[°]

素子数8



(c) music(interpolation))



Angle[°]

素子数4

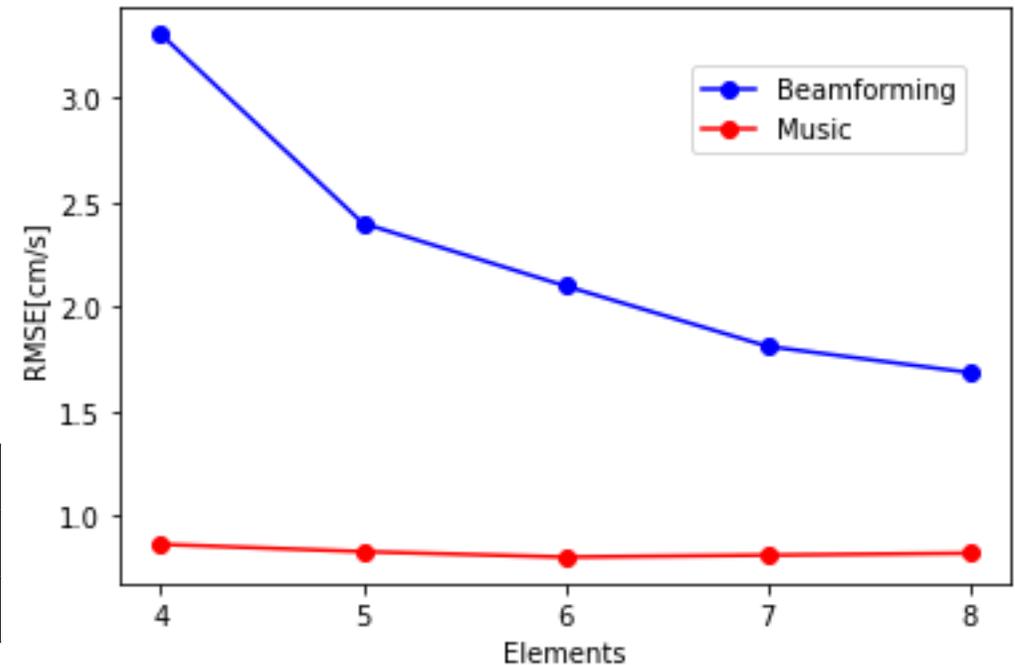
SN比9dB

素子数による影響（一様流速）

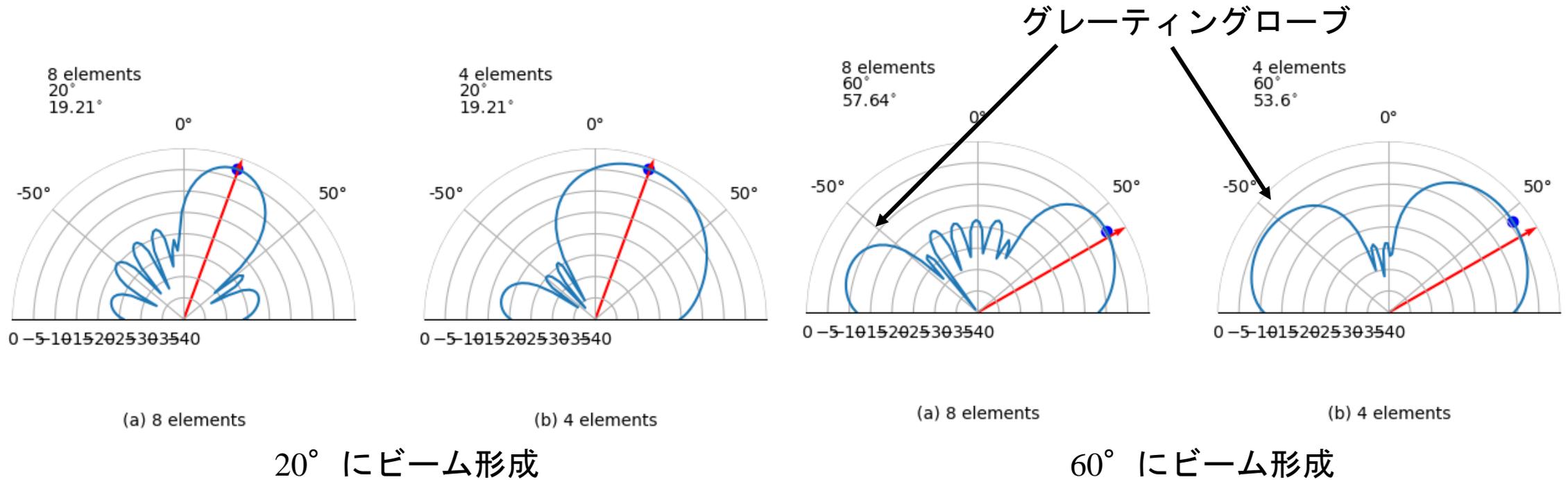
一様流速においてはMUSICは素子数の影響が
少ない

RMSEは15回の平均
MUSICは補間後の流速を使用

素子数	4	5	6	7	8
Beamforming	3.307	2.400	2.100	1.810	1.684
MUSIC	0.861	0.826	0.799	0.809	0.818

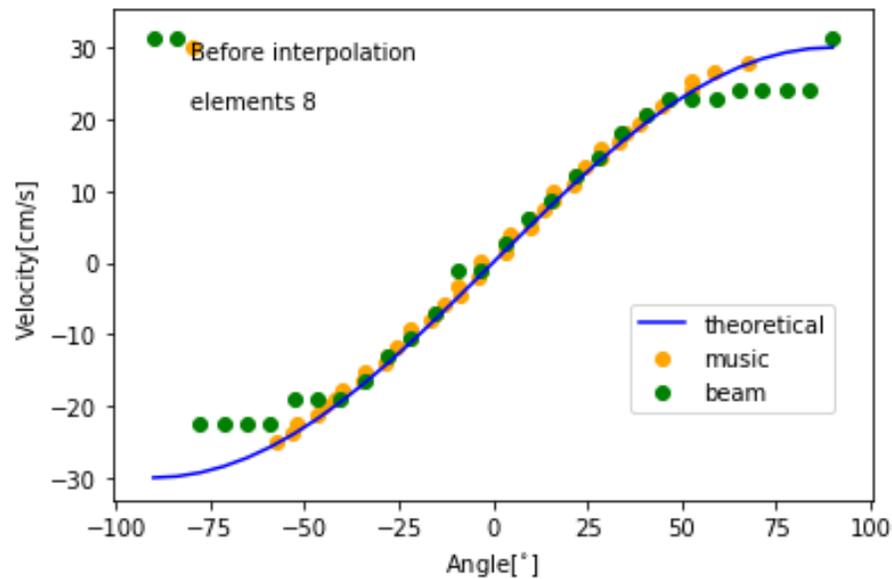


素子数による影響（一様流速）

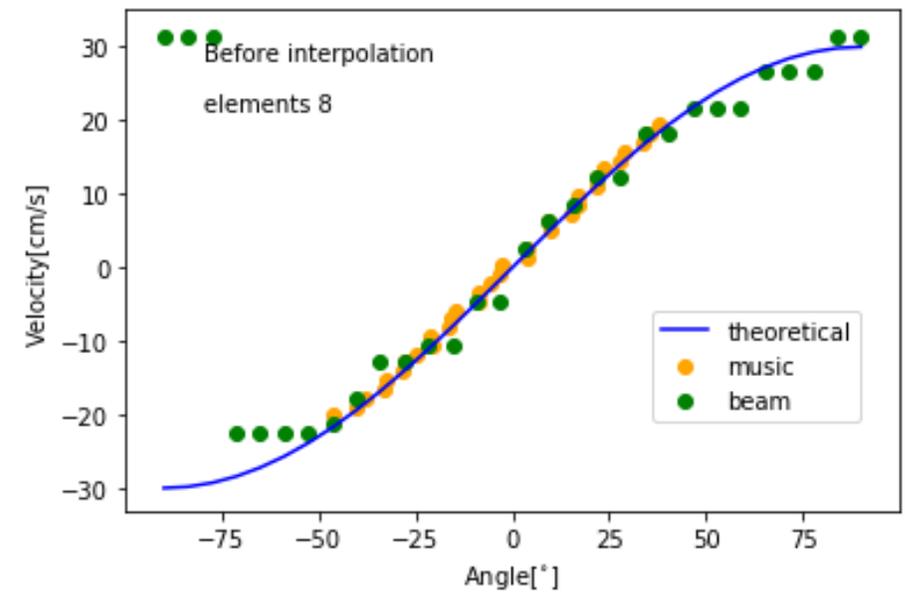


Beamformingではグレーティンググローブの影響も大きい

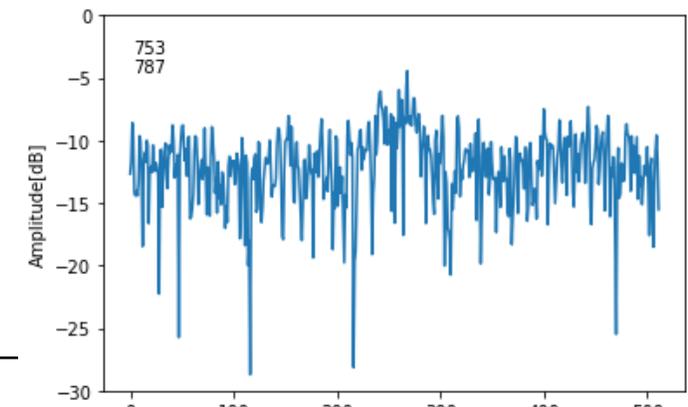
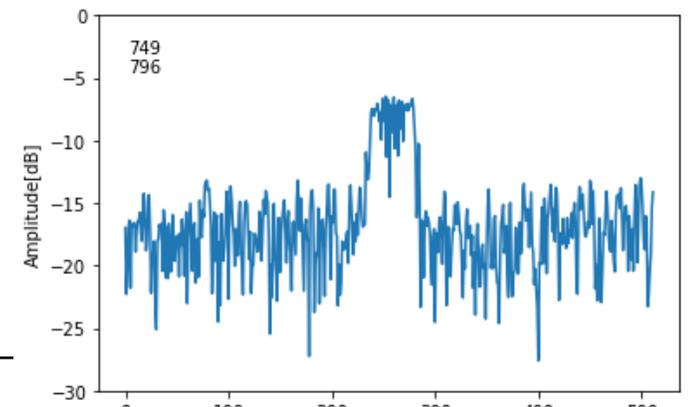
ノイズによる影響（一様流速）



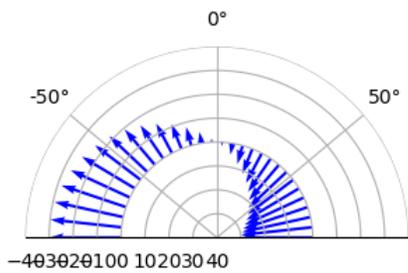
SN比9dB



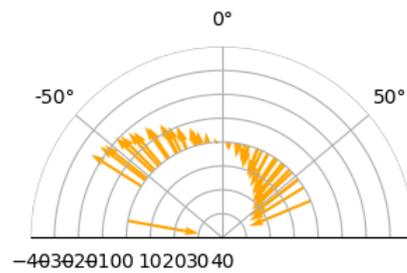
SN比4dB



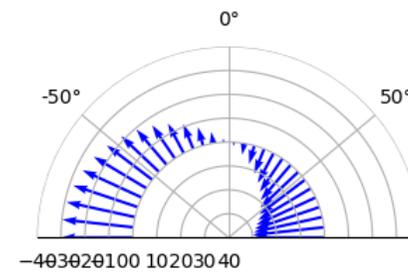
ノイズによる影響 (一様流速)



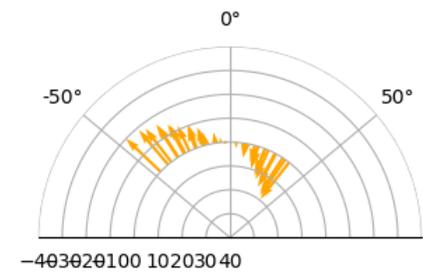
(a) theoretical



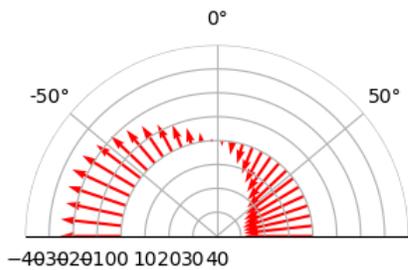
(b) music



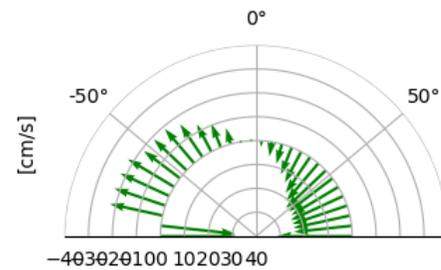
(a) theoretical



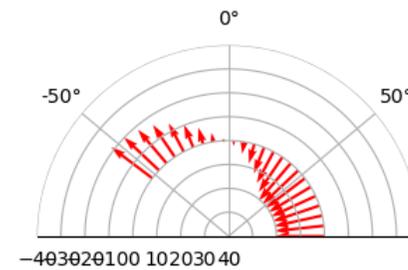
(b) music



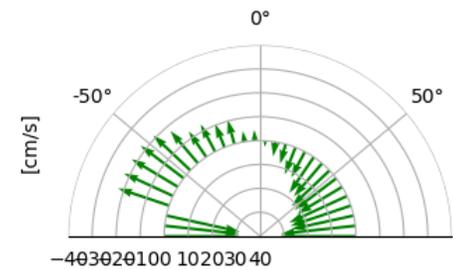
(c) music(interpolation))



SN比9dB



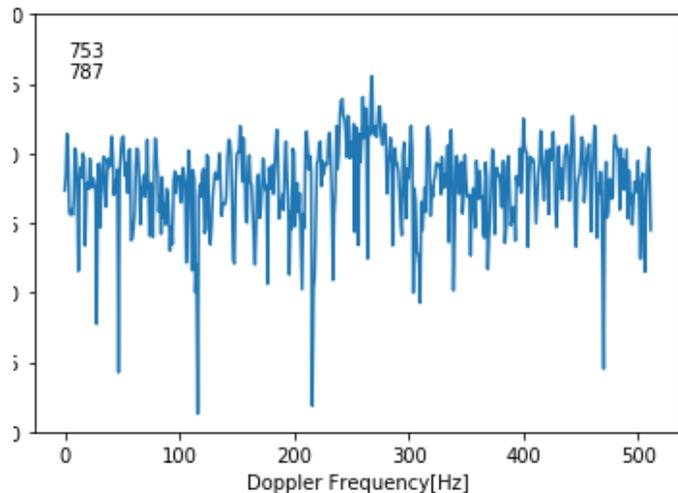
(c) music(interpolation))



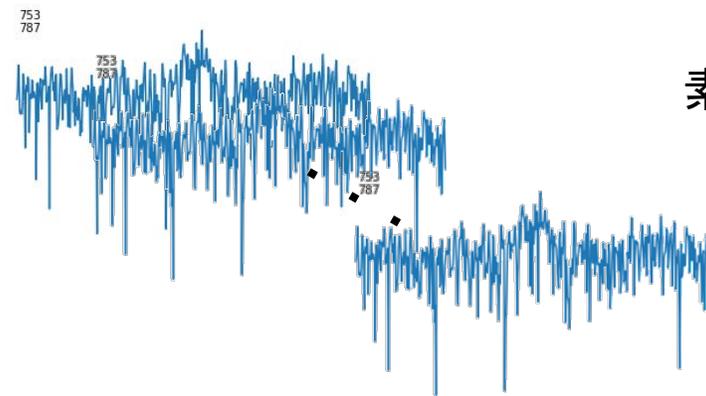
SN比4dB

ノイズによる影響

- Beamformingは素子の数積算することになるのでMUSICに比べるとノイズの影響を抑えることができる

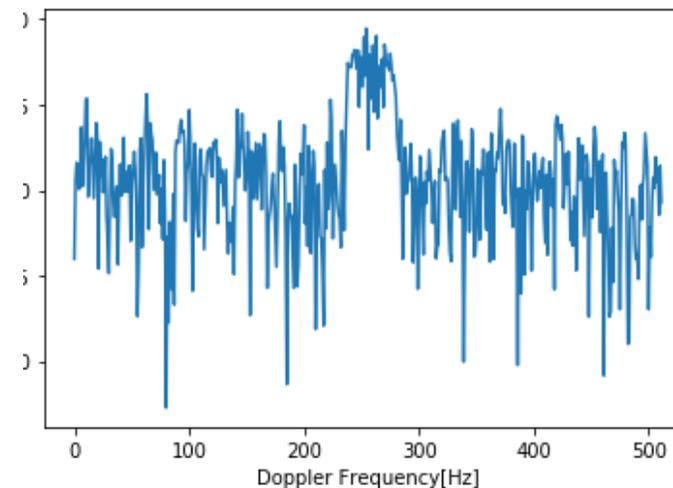


MUSIC



素子数分積算

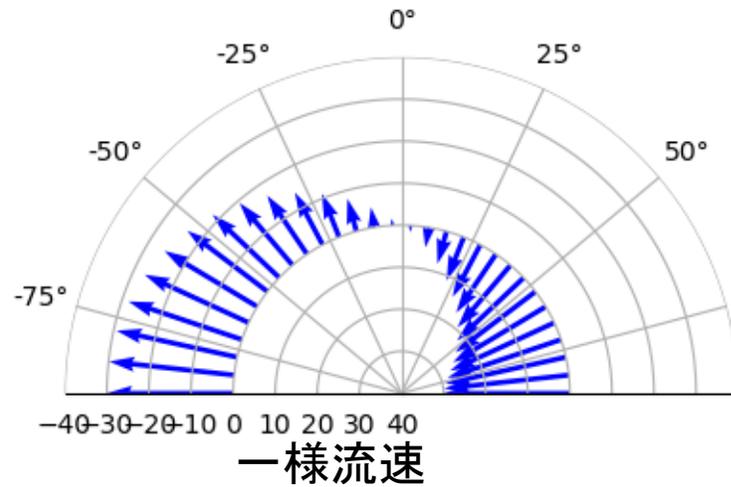
||



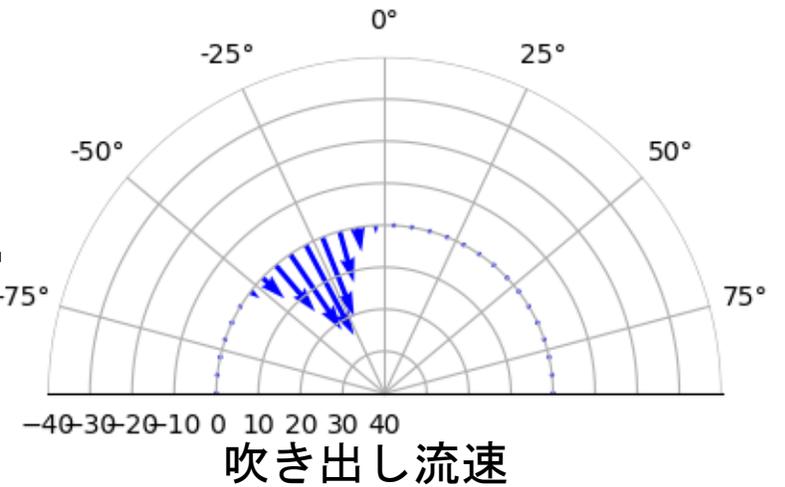
Beamforming

一様流速+吹き出し流速

一様流速に離岸流などを想定した吹き出し流速を加える

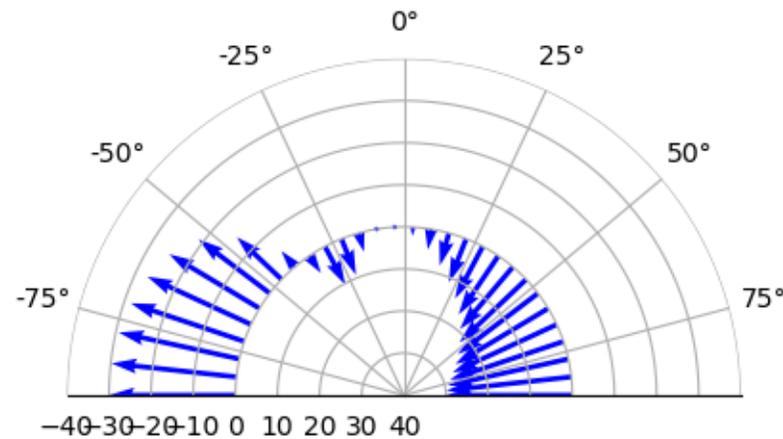


+

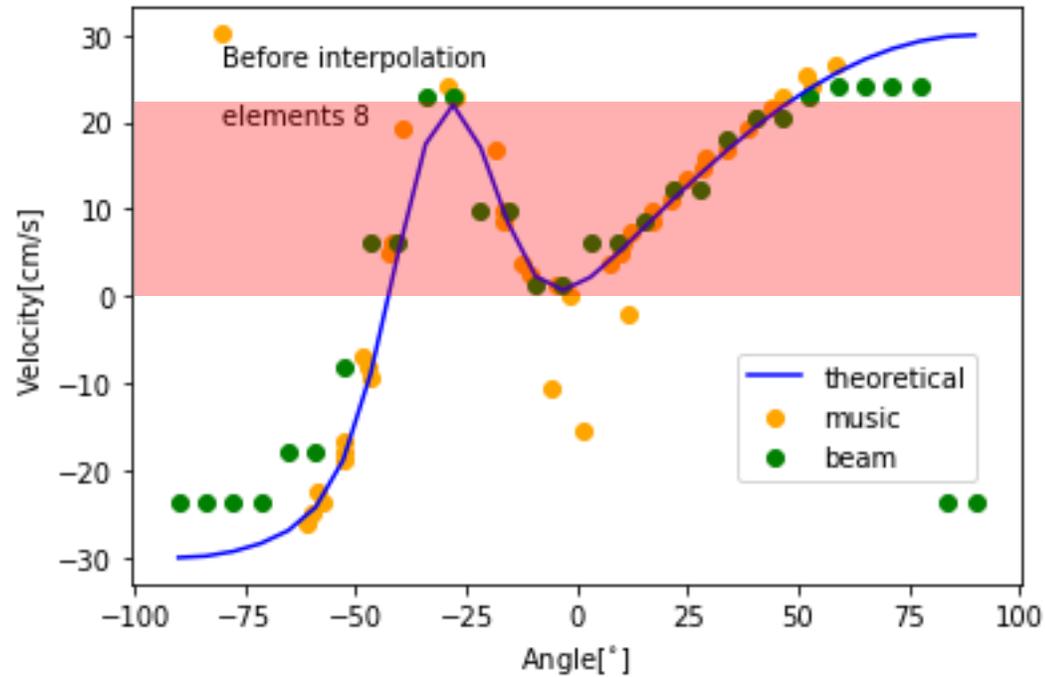


方位30°
最大流速24cm/s

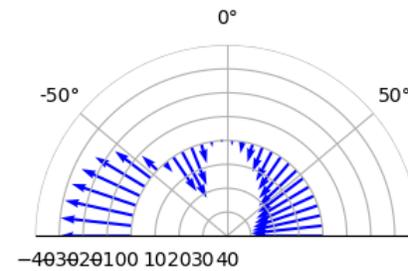
正規分布
標準偏差12°



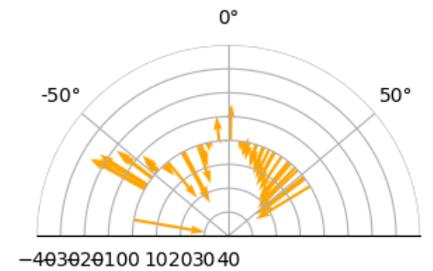
一様流速+吹き出し流速



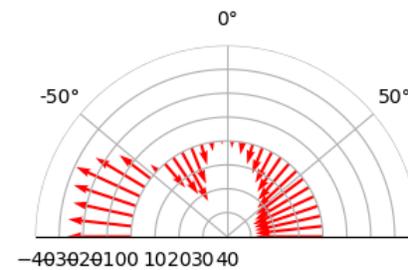
SN比9dB



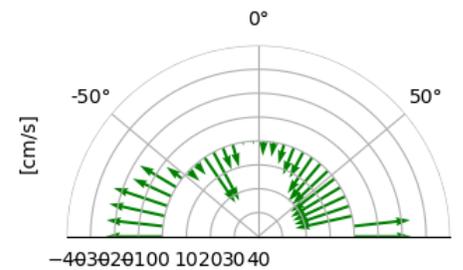
(a) theoretical



(b) music



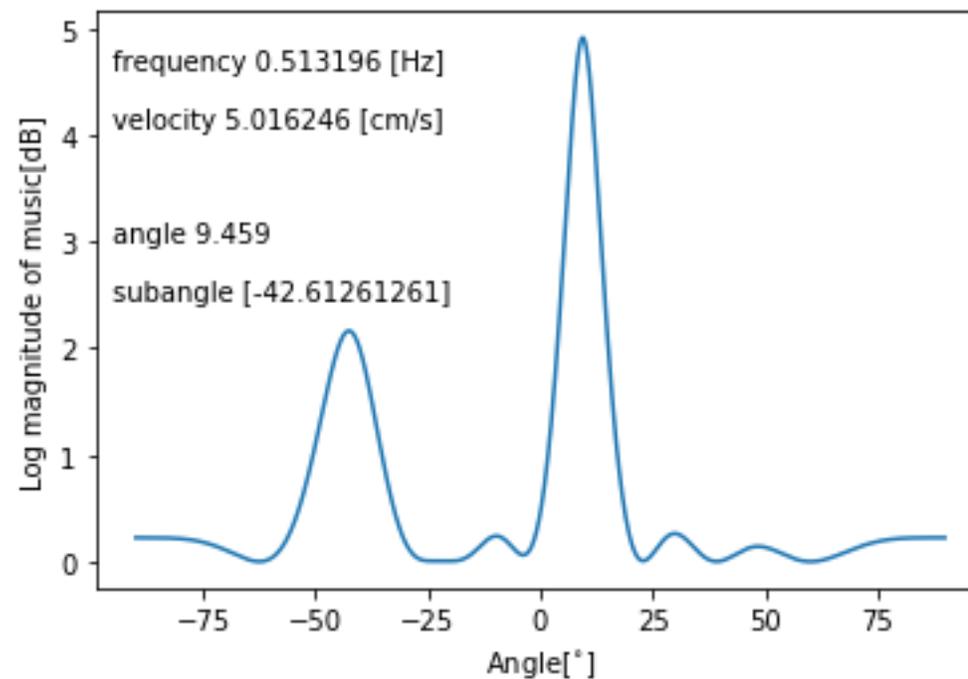
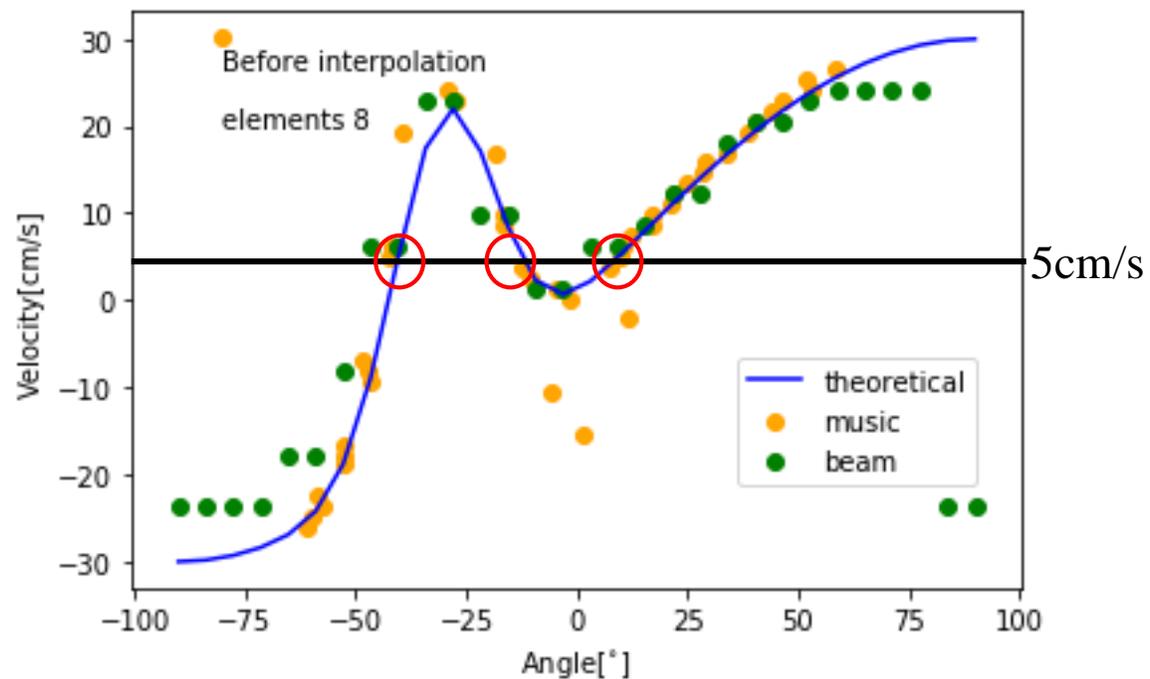
(c) music(interpolation))



Angle[°]

この場合特定の流速が複数の方位に存在することになる

一様流速+吹き出し流速



SN比9dB

5cm/sの流速の方位は3つ存在する

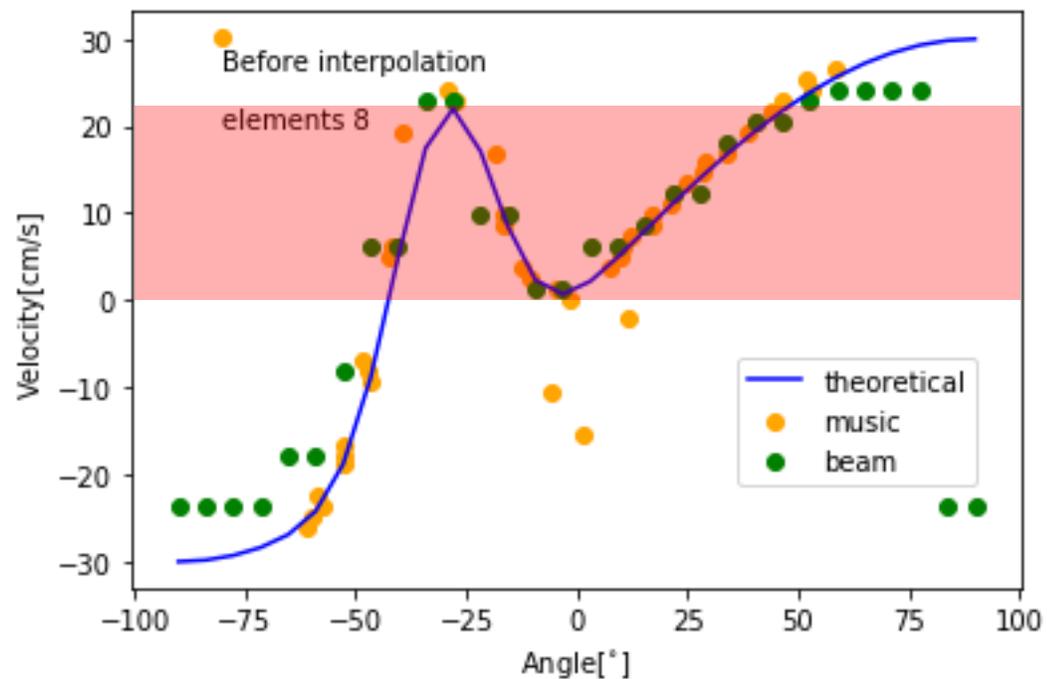
スペクトルで見ると2つのピークがある

すべてを推定はできない

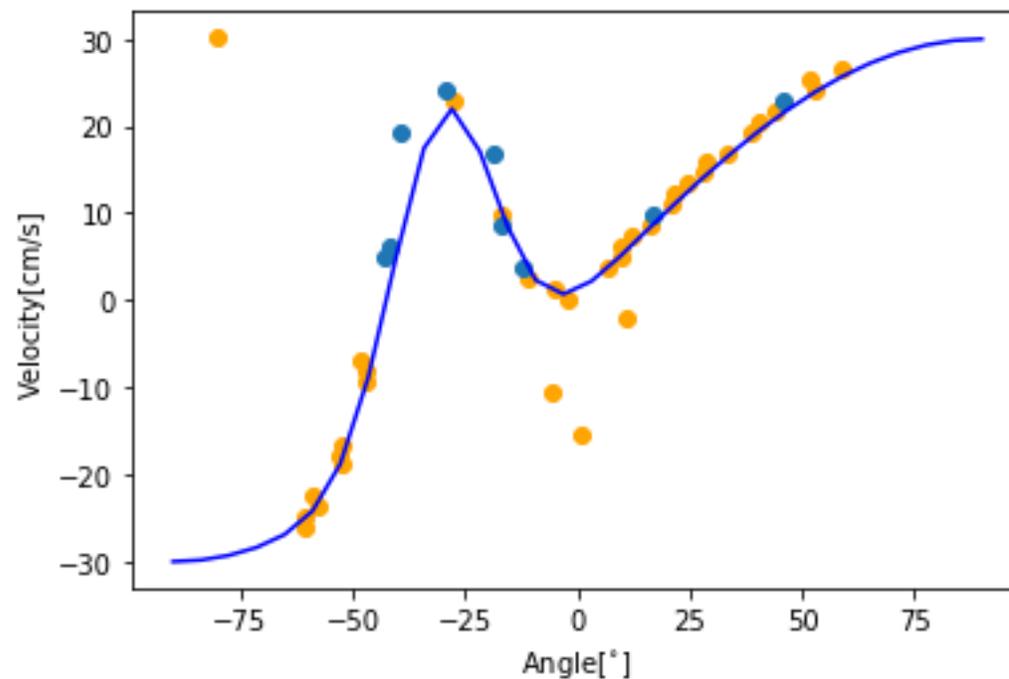
デュアルアングルソリユーション

- 本来MUSICは固有値の大きさから到来信号数を推定する
- 特定の周波数を用いて流速の到来方向を推定する方法では固有値から信号数を推定できない
- MUSICの方位スペクトルから最大ピークの1/3以上大きいピークを到来方向とした

一様流速+吹き出し流速



SN比9dB



青色の点が追加した流速

まとめおよび今後の課題

- まとめ

アレイアンテナにおいてBeamformingとMUSICの到来方向推定法の比較検討を行った。

素子数を減らすとBeamformingよりMUSICのほうが影響がすくない

ノイズの影響はMUSICよりBeamformingのほうがすくない

今後の課題

補間方法、MUSICのパラメータの検討

実データを用いて到来方向推定ができるかの検討

参考文献

- [1] 土木学会海岸工学委員会研究現状レビュー小委員会, 陸上接地型レーダによる沿岸海洋観測, 土木学会, 2001.
- [2] Belinda J. Lipa, Donald E. Barrick, Least-Squares Methods for the Extraction of Surface Currents from CODAR Crossed-Loop Data: Application at ARSLOE, IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL. OE-8, NO. 4, OCTOBER 1983.
- [3] 海洋レーダによる海流観測の原理, <http://w3.uryukyu.ac.jp/yhisaki/HFradar00.html>, 閲覧2020年8月11日.
- [4] Ralph O. Schmidt, Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. AP-34, NO. 3, MARCH 1986

ご清聴ありがとうございました