

MUレーダーを用いた DDMA-MIMO観測結果

Tomoya Matsuda, Hiroyuki Hashiguchi
Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

- 研究の背景
- MIMOレーダーとは
- MIMOレーダーの原理
- MIMOとSISOの受信強度の違い
- MIMOレーダーの送信方法
- MUレーダーを用いたDDMA-MIMO
- 観測結果
- まとめ、今後の課題

研究の背景

【気象レーダーのフェーズドアレイ化】

昨今の局地的大雨や竜巻等突風の被害の基大化→急速に発生・発達する大気現象を極めて高い時空間分解能で観測する技術がさらに重要となってきた

気象レーダーのフェーズドアレイ化により、パラボラアンテナでは実現できなかった、最短で10秒という短い時間で全天をスキャンすることが可能
→極めて高い時空間分解能データの提供が高度な防災気象情報につながる

【フェーズドアレイ気象レーダーの実用化に向けた課題】

・フェーズドアレイレーダーはアンテナ素子数 (= 送受信機数) が多く、一般的な普及にはコスト削減が必要
・コスト削減のために素子数を削減すると、必要な角度分解能が低下し、空間情報が劣化してしまう

・通信分野で用いられているMIMO(Multiple-Input Multiple-Output)技術をレーダーに応用すると、実開口面から拡大することが可能=MIMOレーダーによる仮想開口化
・レーダーに必要なとされる角度分解能を実開口を縮小しても実現することが可能
→MIMO方式採用により、角度分解能を維持したままレーダーのコスト削減に寄与

MIMOレーダーとは

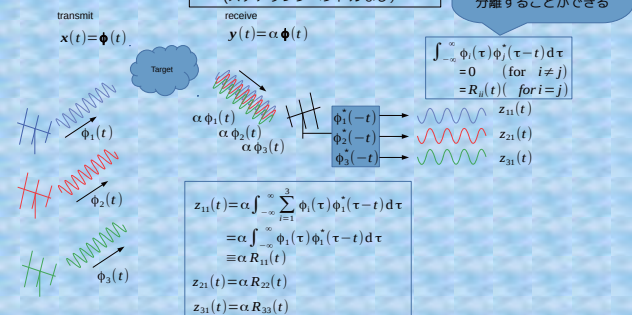
- 直交性(Orthogonality)のある複数の送信信号を同時に送信し、複数の受信機で受信
- 送信信号を同一と見なすことにより受信仮想開口を形成(Virtual array)
- 仮想開口は実際のアンテナサイズより大きい=物理開口よりも狭いビーム幅を形成できる
- 角度分解能を保ったまま物理開口を小さくすることも可能=コスト削減に寄与

Type	SISO (Single-Input Single-Output)	SIMO (Single-Input Multiple-Output)	MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)
Configuration	-Single Antenna -Single receiver/Antenna	-Single Antenna (radiation) -Multiple receivers/Antennas	-Multiple transmitters/Antennas (radiations) -Multiple receivers/Antennas
Ex.	-Weather radar (with a parabolic antenna) -Wind profiler radar	-Phased array weather radar -MU radar(*)	-MU radar (大気レーダーで唯一MIMO処理可能なシステム)
Image			

MIMOレーダーの原理

送信アンテナ3、受信アンテナ1の場合 (ステアリングベクトルなし)

送信信号が直交している = 送信信号間の相互相関はゼロ
↓
1つの受信機で送信信号を分離することができる



MIMOレーダーの原理

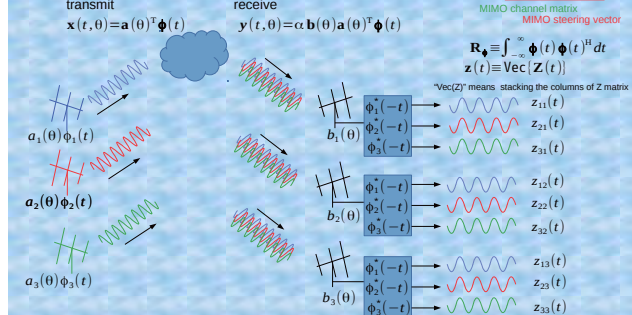
送信アンテナ3、受信アンテナ3の場合 (ステアリングベクトルあり)

Signal processing
 $Z(t) = \alpha \mathbf{b}(\theta) \mathbf{a}(\theta)^T \mathbf{R}_p(t)$

MIMO channel matrix
MIMO steering vector

$\mathbf{R}_p = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \phi(t)^H dt$
 $\mathbf{z}(t) \equiv \text{Vec}\{Z(t)\}$

*"Vec(Z)" means stacking the columns of Z matrix



MIMOレーダーの原理

例1 (送信=M=3,受信=N=3, 送受信同一アンテナ、一次元アレイ)

Steering vector (Ex.)

$$a(\theta) = b(\theta) = \begin{bmatrix} \exp(-jk d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 2 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 3 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \end{bmatrix}$$

MIMO channel matrix

$$b(\theta) a(\theta)^T = \begin{bmatrix} \exp(-jk 2 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 3 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 4 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 3 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 4 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 5 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 4 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 5 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 6 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \end{bmatrix}$$

Diwak, M. S. MIMO radar, In: Mahan, W. L. and Schweg, J. A. (Eds.), Principles of Modern Radar, Advanced Techniques, Raleigh, NC, Sci-Tech Publishers, 2012, pp. 113-145.

MIMO virtual array 7

MIMOレーダーの原理

例2 (送信=M=3,受信=N=3, 送信/受信アンテナ部別、一次元アレイ)

Steering vector (Ex.)

$$a(\theta) = \begin{bmatrix} \exp(-jk d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 4 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 7 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \end{bmatrix} \quad b(\theta) = \begin{bmatrix} \exp(-jk 3 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 4 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 5 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \end{bmatrix}$$

MIMO channel matrix

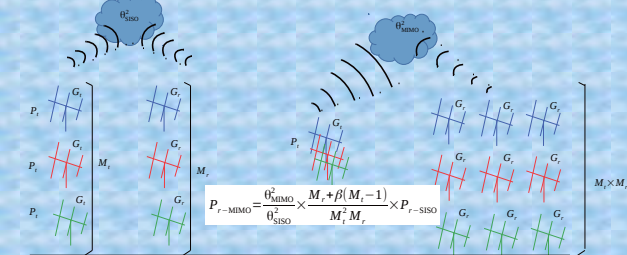
$$b(\theta) a(\theta)^T = \begin{bmatrix} \exp(-jk 4 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 7 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 10 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 5 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 8 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 11 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \\ \exp(-jk 6 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 9 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) & \exp(-jk 12 d (\sin \theta - \sin \theta_0)) \end{bmatrix}$$

Diwak, M. S. MIMO radar, In: Mahan, W. L. and Schweg, J. A. (Eds.), Principles of Modern Radar, Advanced Techniques, Raleigh, NC, Sci-Tech Publishers, 2012, pp. 113-145.

MIMO virtual array 8

MIMOとSISOの受信強度の違い

Item	SISO	MIMO
Power	$P_t \times M_t$	P_t
Tx Gain	$G_t \times M_t$ (Maximum)	G_t
Target Volume	$V \times \theta_{SISO}^2$	$V \times \theta_{MIMO}^2$ (Received beam)
Rx Gain	$G_r \times M_r$ (Maximum)	$G_r \times (N_r + \beta(M_r - 1))$ (Maximum) ($1 < \beta < M_r$)
Pf	$P_{r-SISO} \propto P_t G_t G_r M_t^2 M_r \theta_{SISO}^2$	$P_{r-MIMO} \propto P_t G_t G_r (M_t + \beta(M_r - 1)) \theta_{MIMO}^2$



単純比較ではMIMOレーダーは受信感度は悪化→プロドビーム送信、DBF受信のシステムの方が観測性が高い

9

MIMOレーダーの送信方法

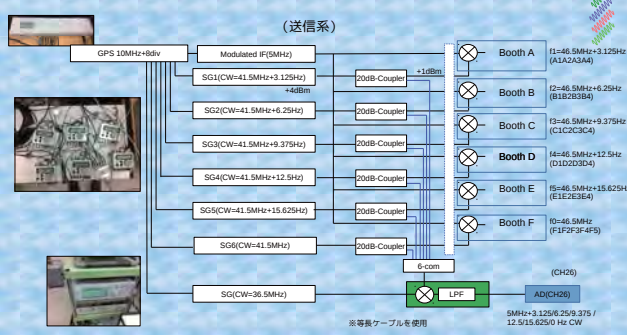
方式	Time division multiple access (TDMA)	Frequency division multiple access (FDMA)	Doppler division multiple access (DDMA)	Code Division multiple access (CDMA)
長所	・高い直交性を確保 ・ハードウェア構築が容易	・高い直交性を確保 =Fast-time MIMO	・高い直交性を確保 ・ハードウェア構築が容易	・適度な直交性 (パルス波形/送信信号の線形性に依存)
受入条件	・タイムロス ・相関時間の低下	・高いレンジサイドロープ ・ターゲットの周波数特性の考慮	・広いアンアンビギュエティレンジ (unambiguity range)	・システム構造が複雑 ・高いレンジサイドロープ (※完全コンプレメンタリ符号により解決可)
回路構成				

ナイキスト速度が確保しやすいVHF帯はDDMAが適している。

DDMAはMIMOレーダーでもすくに実現可能 (他の方法はシステムの改造が必要)

10

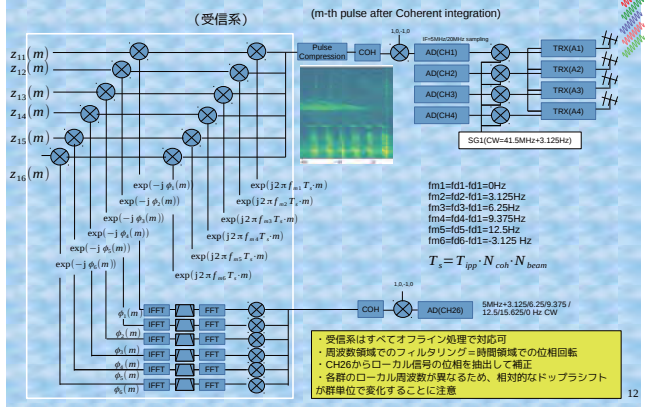
MULレーダーを用いたDDMA-MIMO



送信系はすべてアナログで形成 (ケーブルはすべて等長ケーブルを使用)
 ・シグナルジェネレータ (SG) 6台を用いてローカル周波数をわずかにずらすことで、パルス単位で直交信号群を形成
 ・6種類の周波数位相差を正確に決めるため、ローカル信号をアナログ合成した後、システムに同期した受信機 (CH26) に取り込み、受信処理でそれぞれの位相を抽出する方式を考案した

11

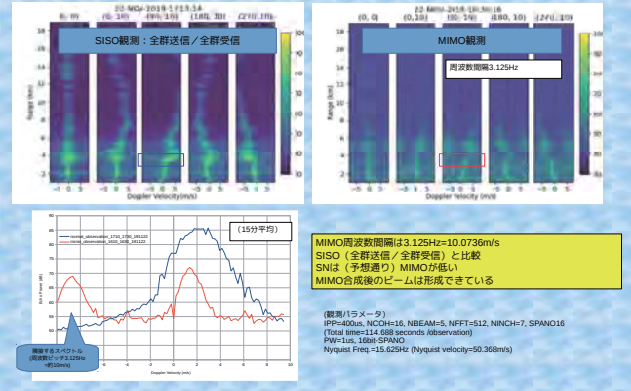
MULレーダーを用いたDDMA-MIMO



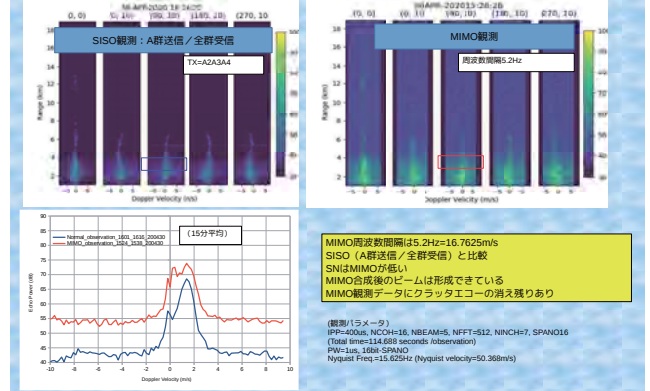
受信系はすべてオフライン処理で対応可
 ・周波数領域でのフィルタリング=時間領域での位相回転
 ・CH26からローカル周波数の位相を抽出して補正
 ・各群のローカル周波数が異なるため、相対的なドップラシフトが群単位で変化することに注意

12

観測結果(2019/11/22)



観測結果(2020/4/30)



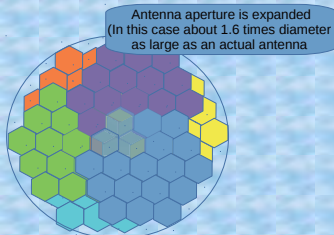
Effect on MIMO radar

physical antenna aperture plane

MIMO virtual antenna aperture plane



TX's(6 transmit orthogonal waveforms)



RX's(6 x 19 received waveforms)

まとめ

- ・ MIMOレーダーをMUレーダーに適用した。
- ・ 送信方法にDDMAを採用し、大気エコーに対しても適用可能であることを確認した。
- ・ 受信信号加算に重要となる、送信信号間の送信信号の位相差を補正するため、それぞれのローカル信号を同期した受信機で受信する方式を考案し、その効果を確認した。
- ・ SISO観測と定性比較を行った。

今後の予定/課題

- ・ 角度分解能向上に関する定量評価
- ・ SNに関する定量評価
- ・ クラッタエコーの多重受信等による劣化対応
- ・ 他方式の検討 (CDMA)
- ・ MIMO大気レーダー/気象レーダーへの適用理論まとめ