

# 拡張アレー処理を用いた高分解能レーダ技術

代表研究者

市毛 弘一

横浜国立大学大学院工学研究院・教授

## 1 はじめに

自動車周辺の障害物検知や自動運転技術の確立に向けて、車載レーダによるイメージング技術が飛躍的に進歩している。一般にはミリ波帯の MIMO レーダが車載レーダとして用いられるが、高分解能処理のためには、Massive MIMO に代表される多素子アレーアンテナが望ましいものの、受信信号処理のための演算が膨大になることから、実際には入出力ともに数素子～十素子程度の小規模 MIMO レーダが用いられている。特に、複数の障害物が存在する場合や、レーダから障害物までの距離が大きく異なる場合などにおいては、障害物検出のためのイメージングが困難であるという問題がある。これは、フーリエ変換をベースとした従来手法では、分解能の低さから、最近傍の障害物のスペクトルに他の障害物のスペクトルが埋没してしまい、結果として検出が不可能であることに由来する。

こうした分解能の低さを改善する技術として、近年、アレーアンテナにおける到来方向推定において、スパース最適化に基づいた拡張アレー処理と呼ばれる高分解能推定技術が注目されている。アレー受信信号を仮想的に拡張して、アレー自由度を超える到来方向推定を可能にした技術であり、MIMO レーダにおいても同様の拡張が可能であると考えられる。本研究では、スパース最適化および拡張アレー処理を導入することで、高分解能イメージングを実現する車載 MIMO レーダシステムの開発を目指し、その性能をシミュレーションと実験を通して検証する。

## 2 拡張アレー処理を用いた高分解能レーダ技術

### 2-1 FMCW-MIMO レーダにおける DOA 推定性能の評価

まず、FMCW-MIMO レーダシステムにおいて、到来方向(DOA)推定による複数到来波の分離の可否、およびその推定精度を評価する。図 1 のように、レーダから見て方位角の異なる 2 つのターゲットを想定し、それぞれのターゲットからの反射波の DOA 推定精度を評価する。ここでは受信側の評価を目的として、送信素子が 1 素子の SIMO レーダシステムの DOA 推定精度の評価を行う。到来角は 1 次元(方位角のみ)として、アレー正面から $\pm\theta/2$  [deg.]の位置に 2 つのターゲットがあることを想定する。受信素子配置は 4 素子等間隔リニアアレー (以下 ULA) としている。評価対象の推定手法は、ビームフォーマ(BF)法、MUSIC 法[1]、若松らの手法[2] (以下 2D-BF, 2D-MUSIC 法とよぶ)、およびこれらの手法にカトリ・ラオ(KR)積[3]、空間平均処理[4]を組み合わせた手法とする。その他、諸元の詳細は文献[5],[6]を参照されたい。

各アルゴリズムの DOA 推定誤差のばらつきを図 2 に示す。横軸は各アルゴリズムにおける角度の分解能であり、95%以上の割合で 2 波を分離できた最小の角度を示す。縦軸は各アルゴリズムにおける推定誤差の四分位数を表している。図 2 より、BF-KR, 2D-BF-KR, MUSIC-KR, 2D-MUSIC-KR の各手法、すなわち KR 積拡張処理を用いた各手法が、距離差に関わらず分解能が比較的小さく、かつ DOA 推定成功率が高い手法であることが確認できる。

さらに、2 つの送信機を有する FMCW-MIMO レーダにおいて、電波暗室内で行った実測実験のデータを元に評価する。実験に用いた MIMO レーダのアンテナ配置を図 3(a)に示す。このアンテナ配置のレーダに KR 積アレー拡張処理を施すことで、図 3(b)のような 33 素子の仮想アレー配置となる。

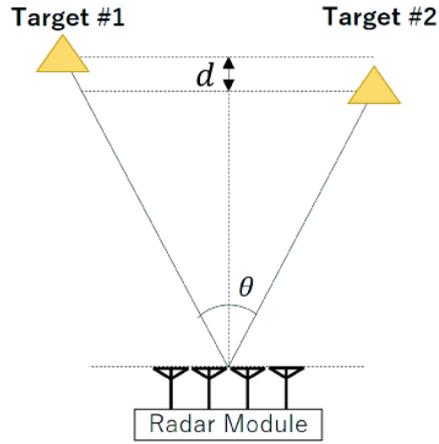


図1 評価システムのモデル図

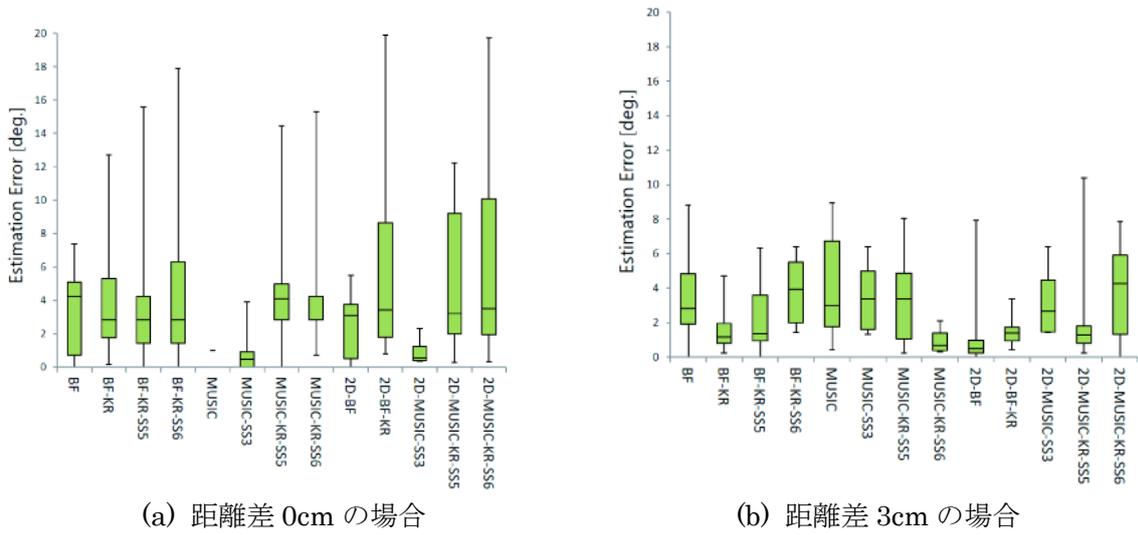


図2 DOA 推定性能の評価

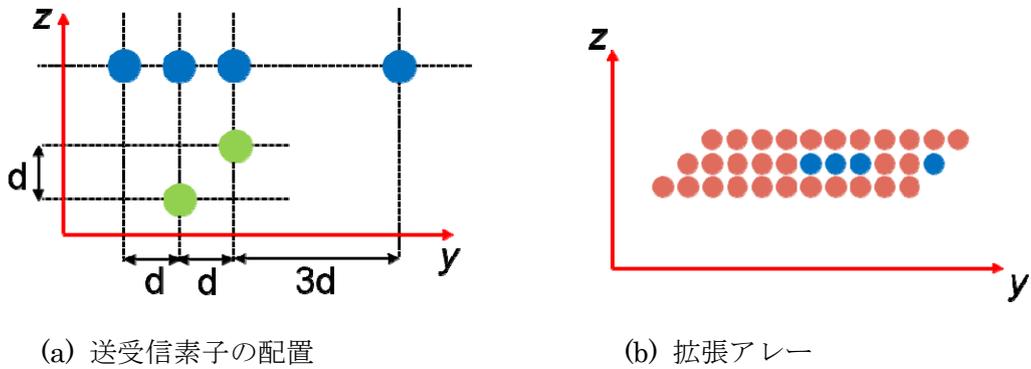


図3 MIMO システムとその拡張アレー

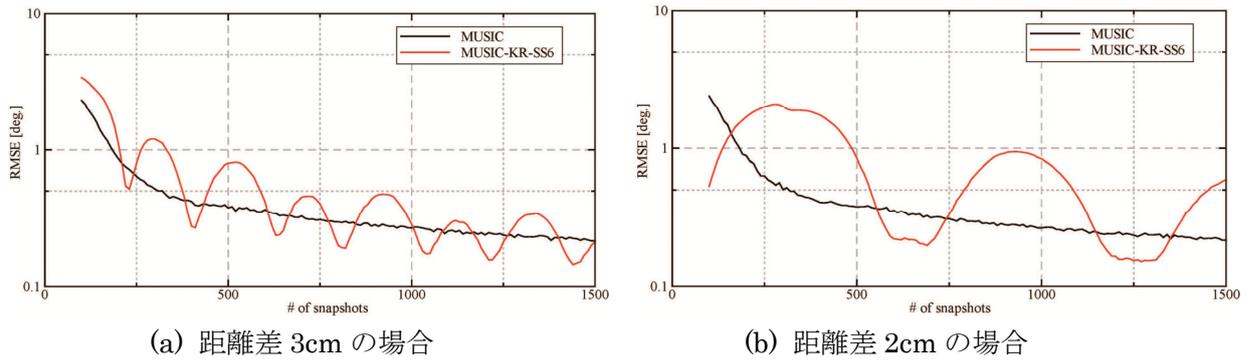


図 4 DOA 推定性能の評価

図 4 に実験結果の一例を示す．横軸はスナップショット数，縦軸は DOA 推定誤差(RMSE)を示す．図 4 より，カトリ・ラオ積を用いた場合，DOA 推定誤差はスナップショット数に依存して大きく変動することが確認できる．また，距離差や角度差によってこの変動周期が変化することを確認している．これは信号の擬定常性の変化によることも考えられる．これより，カトリ・ラオ積を用いた DOA 推定においては，スナップショット数を適切に設定することも高精度な推定には不可欠であることが読み取れる．ただし現実には距離差や角度差に依存するため，改善策としては，まず適当なスナップショット数で DOA 推定を行い，そのうえで適切なスナップショット数を推定し，再度その設定値で DOA 推定を行うことなどが考えられる．

## 2-2 スパースアレーとその最適素子配置

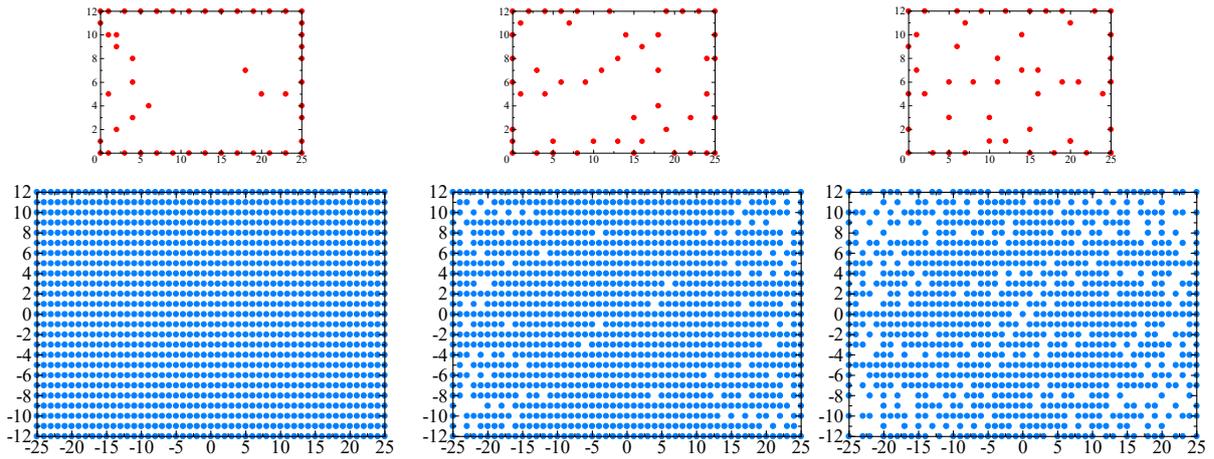
次に，2次元スパースアレーの差分アレーにおける hole (欠損箇所) の補間手法について述べる．文献[7]では，素子間相互結合を低減する Hourglass アレーについて議論している．しかしながら，Hourglass アレーが素子間相互結合の影響を最も受けにくい最適アレーであるとは言い難い．ここでは，Simulated Annealing (SA)法を用いて，素子間相互結合をより低減する hole-free な最適アレー構成する手法，さらにこの手法を拡張して，hole を許容した最適アレーを構成し，核ノルム最小化を適用することで，差分アレーの hole を補間して hole-free なアレーを構成する方法を提案し，その DOA 推定性能を評価する．最適化手法の詳細は文献[8],[9]を参照されたい．

図 5 に，50 素子の Hourglass アレーを (a) hole-free 条件で最適化した場合，(b) 100 個までのホールを許容して最適化した場合，および(c) 300 個までのホールを許容して最適化した場合，の実素子配置とその拡張アレー構造を示す．図 5 より，ホールを許容することで，最適アレーの実素子配置が異なる形状となっていることが確認できる．素子間隔がより疎な形で分散していることから，アレー素子間の相互結合の影響をより低減できることも期待できる．

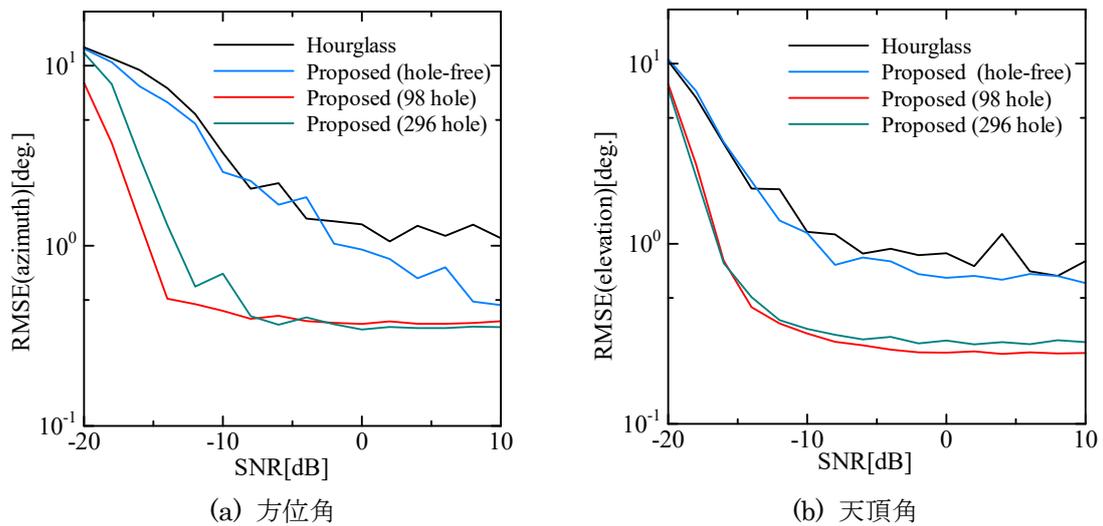
図 6 に，Hourglass アレーおよび図 5 の 3 つのアレー構造を用いて，2次元 DOA 推定を行った場合の DOA 推定性能の比較結果を示す．シミュレーション仕様の詳細は文献[8],[9]を参照されたい．図 6 より，ホールを許容したアレー構造を用いることで，方位角・天頂角のいずれにおいても，DOA 推定性能を大幅に改善できることが確認できる．核ノルム最小化の計算コストの低減が今後の課題となる．

## 2-3 加算・差分結合アレーによる拡張ビームフォーミング

こうした DOA 推定の検討に加えて，アレー拡張手法として差分アレーに留まらず加算アレーを使用し，ビームフォーミング問題に適用した．手法と性能については文献[10]を参照されたい．



(a) ホールなしの場合 (b) 100個のホールを許容した場合 (c) 300個のホールを許容した場合  
 図5 最適アレーの実素子配置（上段）とその拡張アレー構造（下段）



(a) 方位角 (b) 天頂角  
 図6 最適アレー構造の DOA 推定性能の評価

### 3 まとめ

本研究では、スパース最適化および拡張アレー処理を導入することで、高分解能イメージングを実現する車載 MIMO レーダシステムの開発を目指し、その性能をシミュレーションと実験を通して検証した。まず、カトリ・ラオ積を用いたアレー拡張では、拡張処理により DOA 推定性能の改善が可能となることを確認したが、同時にスナップショット依存性の問題があることを明らかにした。最適アレー構造の検討では、ホールの存在を許容してアレー構造を最適化することで、素子間相互結合をより低減し、かつ DOA 推定性能を大きく改善することが可能であることを確認した。さらに、差分アレーと加算アレーを併用することで、アレー開口長を拡大してビームフォーミング性能を大幅に向上させることが可能であることを確認した。

## 【参考文献】

- [1] R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 34, pp. 276-280, Mar. 1986.
- [2] Y. Wakamatsu, H. Yamada, and Y. Yamaguchi, "MIMO Doppler Radar Using Khatri-Rao Product Virtual Array for Indoor Human Detection," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E99-B, no. 1, pp. 124-133, Jan. 2016.
- [3] W. K. Ma, T. H. Hsieh, 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 Processing*, vol. 58, no. 4, pp. 2168-2180, Apr. 2010.
- [4] T. J. Shan, M. Wax, and T. Kailath, "On Spatial Smoothing for Direction-of-Arrival Estimation of Coherent Signals," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. 33, no. 4, pp. 806-811, Aug. 1985.
- [5] 齋藤諒, 杉山智哉, 市毛弘一, 荒川暢哉, 柏木克久, 湯浅敦之, "ミリ波帯 FMCW-MIMO レーダにおける相関波分離性能の評価," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, no. B-1-145, 2018年9月.
- [6] K. Ichige, R. Saito, T. Sugiyama, N. Arakawa, K. Kashiwagi, A. Yuasa, "Location Estimation Accuracy of Augmented Arrays for Millimeter-Wave FMCW-MIMO Radar," *Int. Radar Conf.*, Sep. 2019 (accepted, to appear).
- [7] C. L. Liu, P. P. Vaidyanathan: "Hourglass Arrays and Other Novel 2-D Sparse Arrays with Reduced Mutual Coupling," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 65, no. 13, pp. 3369-3383, July 2017.
- [8] 中村省吾, 岩崎翔, 市毛弘一, "核ノルム最小化による 2 次元スパースアレーの補間と DOA 推定," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, no. B-1-135, 2018年9月.
- [9] S. Nakamura, S. Iwazaki, K. Ichige, "Optimum 2D Sparse Array and Its Interpolation via Nuclear Norm Minimization," *Proc. Int. Sympo. Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 1-5, May 2019.
- [10] S. Iwazaki, K. Ichige, "Extended Beamforming by Sum and Difference Composite Co-Array for Real-Valued Signals," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E102-A, no. 7, July 2019 (accepted, to appear).

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
ミリ波帯 FMCW-MIMO レーダにおける相関波分離性能の評価	電子情報通信学会ソサイエティ大会, no. B-1-145	2018 年 9 月
核ノルム最小化による 2 次元スパースアレーの補間と DOA 推定	電子情報通信学会ソサイエティ大会, no. B-1-135	2018 年 9 月
Optimum 2D Sparse Array and Its Interpolation via Nuclear Norm Minimization	Proc. Int. Sympo. Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1-5	2019 年 5 月
Extended Beamforming by Sum and Difference Composite Co-Array for Real-Valued Signals	IEICE Trans. Fundamentals, vol. E102-A, no. 7	2019 年 7 月
Location Estimation Accuracy of Augmented Arrays for Millimeter-Wave FMCW-MIMO Radar	International Radar Conference	2019 年 9 月