

# 大規模スパースアレーにおける高効率アンテナ選択手法と拡張アレー信号処理

## Antenna Selection and Extended Signal Processing for Massive Sparse Array



市毛 弘一 (Koichi Ichige, Dr. Eng.)

横浜国立大学 大学院 工学研究院 教授

(Professor, Faculty of Engineering, Yokohama National University)

IEEE 電子情報通信学会

受賞：電波功績賞(2006年) IEICE Communication Society Best Letter Award (2007年) 横浜国立大学ベストティーチャー賞 (2011年) 国際会議 ISPACS2018 Best Paper Award (2018年) 他

研究専門分野： デジタル信号処理 移動体通信 最適化手法

### あらまし

本稿では、大規模スパースアレーにおける高効率アンテナ選択手法と、その拡張アレー信号処理手法について述べる。2020年3月にサービス提供が始まった5G(第5世代移動体通信)では、送受信アンテナに等間隔矩形アレーアンテナを用いたMIMO(Multiple-Input Multiple-Output)通信システムが主として用いられている。これに対して、アンテナ素子を不等間隔かつ部分的に広い間隔で並べたスパースアレーが注目を集めている。拡張アレー処理を併用することで広い開口長の仮想アレーを構成し、高分解能な信号処理を可能にする手法として、今後の移動体通信への応用が期待されている。本稿では、高効率なアンテナ選択手法、すなわちスパースアレーにおけるアンテナ素子位置の最適化手法について検討する。さらに、拡張アレー信号処理を併用することで、高分解能な到来方向推定およびビームフォーミングが可能となることを示す。

### 1. 研究の目的

開口長内に素子を不等間隔に配置し、素子数の削減ができるスパースアレーが注目されている[1]-[5]。一般に、スパースアレーは受信信号にKhattri-Rao(KR)積拡張処理[6]を行い、仮想素子を作り出すことでアレー自由度(Degree-Of-Freedom; DOF)を向上させ、N

素子のアレーで $O(N^2)$ の到来波を分離することができる。仮想素子から成るアレーは差分アレーと呼ばれる。2次元スパースアレーの差分アレーの形状は、2Dネストアレーやオープンボックスアレー、アワーグラスアレーなど、多岐にわたり研究がなされている[7]-[9]。

本研究では、Simulated Annealing(SA)法[10]を用いて、2次元アレー配置の最適化アルゴリズムについて検討する。最適アレーの補間手法についても、信号相関行列に対して核ノルム最小化により補間する手法を提案し、その到来方向(Direction-Of-Arrival; DOA)推定性能を評価する。また、スパースアレーにおけるビームフォーミング手法を2次元アレーに拡張し、実アレー領域におけるURAと比較したときのスパースアレーならびに、実アレーに対する仮想アレーのビームフォーミング性能・信号復調性能の優位性を検証する。2次元仮想アレーが所望波方向に鋭いビームを向け、干渉波方向により深いヌルを向けられることを確認し、それによるBER特性の改善を確認する。

### 2. 研究の背景

第5世代移動体通信(5G)[11]-[12]は、無線での10Gbps以上の高速大容量通信を可能とする技術であり、その基幹技術となる大規模MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)システムの研究が盛んに行われている。移動体通信においては、都市部や市街地においては電波伝搬路が見通しになることはほとんどなく、高層ビルなどによる反射、回折、散乱によって多重伝搬路となる。そのため、直接波、遅延波、またその他の基地局からの干渉波などの多重波が互いに干渉してマルチパスフェージングとよばれる通信環境が発生し、通信品質が劣化する要因となる。通信品質の向上のためには電波伝搬環境を詳細に把握し、余分なパスを除去することなどマルチパスフェージングへの対処が不可欠である。このとき、各到来波の分離推定が重要な技術となる。そのための有効な手法のひとつとして、アレーアンテナを用いた到来方向推定およびビームフォーミングの技術が注目されている。アレーアンテナとは、アンテナ素子を複数個配置し、そ

# 大規模スパースアレーにおける高効率アンテナ選択手法と拡張アレー信号処理

## Antenna Selection and Extended Signal Processing for Massive Sparse Array

それぞれの入力信号を処理することにより、到来波の到来方向、電力レベル、伝播遅延時間、偏波、相互相関といったパラメータを抽出しながら電波を受信することができるアンテナである。これに対して、アンテナ素子を不等間隔かつ部分的に広い間隔で並べたスパースアレーが注目を集めている。アレー素子数の削減による低コスト化や、一部のアンテナ素子が故障した場合の受信信号合成などが可能となる。拡張アレー処理を併用することで広い開口長の仮想アレーを構成し、高分解能な信号処理を可能にする手法として、今後の移動体通信への応用が期待されている。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 従来手法とその問題点

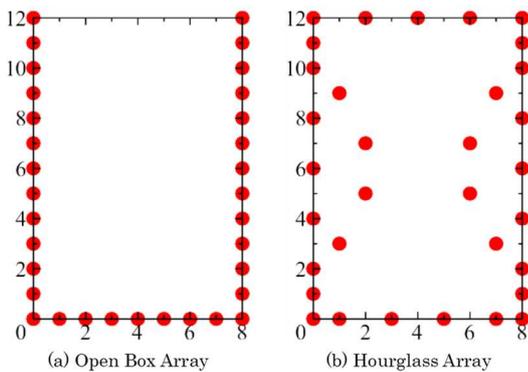


図1 スパースアレーの例

スパースアレーの例を図1に示す。(a)がオープンボックスアレー、(b)がアワーグラスアレーと呼ばれるスパースアレー構造である。これらのスパースアレーは、アレー素子位置が明示的に（素子位置決定のための数式により）決定されるものであり、KR積拡張を適用することでいずれも等間隔矩形アレー（Uniform Rectangular Array; URA）を仮想的に構成可能である。この仮想矩形アレーに対して MUSIC 法、ESPRIT 法といった DOA 推定手法を適用することで、同素子数の矩形アレーよりもより高精度・高分解能な DOA 推定が可能となる。しかしながら、アレー素子位置の決定には制約があり、それに伴って DOA 推定精度・ビームフォーミング性能にも限界がある。本研究では、アレー素子位置を最適に配置して、かつホール（アレー素子の欠損）があった場合はそれを補間する手法を

構築することで、より高精度・高分解能な DOA 推定、高分解能なビームフォーミングを目指す。

#### 3.2 スパースアレー構造の最適化と DOA 推定

まず、既存のスパースアレーにおける素子配置決定方法の制約を取り除き、最適化手法を導入することで、より高性能なスパースアレー構造の決定方法を確立した。本研究における成果の要約は以下の通りである。最適化手法およびホール補間手法の詳細は、文献[13]-[15]を参照されたい。

- ・ 様々な最適化手法を適用して比較検討した結果、SA 法により最も効率の良い特性が得られることを確認した。局所解を避けて最適解に到達できる SA 法の性質が良好な結果を導いたものと考えられる。
- ・ 従来は、ホールを許容せずに仮想アレーが URA になることが望ましいとされていたが、様々な検討の結果、ホールが残ることを許容した方が結果として DOA 推定精度・ビームフォーミング性能を向上できることを確認した。ホールに対応する素子の受信信号については、核ノルム最小化（Nuclear Norm Minimization; NNM）を適用することで、効率よく受信信号を推定できることを確認した。
- ・ 従来は仮想 URA の開口長が限定されていたが、ホールを許容することでこれをさらに拡張することが可能となった。そのため、仮想アレーの開口長を拡張しつつ最適化を行うようアルゴリズムを改良した。その際、最適化に要する計算時間が膨大となるため、処理時間短縮のための手法として列補間・行補間などの簡易最適化手法を考案した。

こうした最適化手法により得られたスパースアレー構造の例を図2に示す。(a)は既存のアワーグラスアレー、(b)はホールを許容しない場合の SA による最適化結果、(c)がホールを許容した場合の結果である。さらに、アレー開口長を拡張した結果が(d)-(f)であり、mode1,2,3 はそれぞれ行補間、列補間、および2次元補間に対応する。図2より、提案する最適化手法により、既存手法よりも疎（スパース）かつ開口長の広いアレー構造を設計できていることが確認できる。

# 大規模スパースアレーにおける高効率アンテナ選択手法と拡張アレー信号処理

## Antenna Selection and Extended Signal Processing for Massive Sparse Array

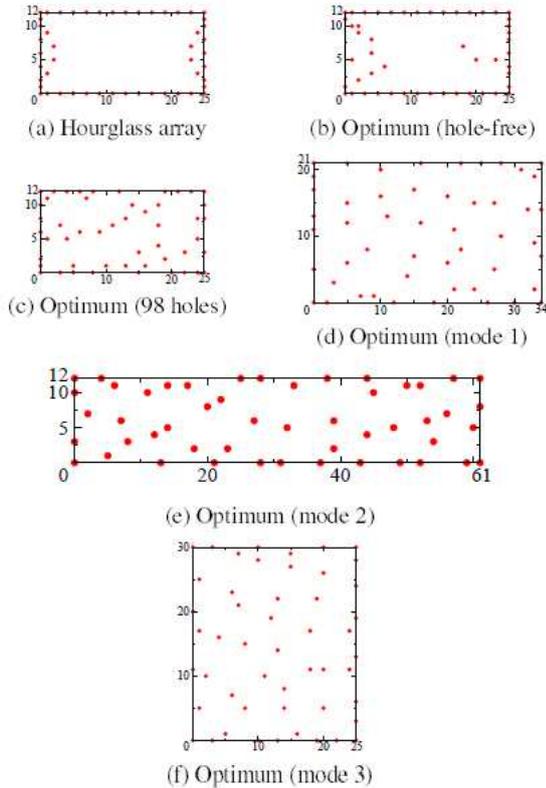


図2 提案手法によるスパースアレーの設計例

これらのアレーを用いて、実際に DOA 推定性能を評価した結果を図 3 に示す。(a)が方位角、(b)が天頂角の平均 2 乗平方根誤差 (Root Mean Square Error; RMSE)特性である。シミュレーション諸元の詳細は文献[13]-[15]を参照されたい。図 3 より、提案する最適スパースアレーは、既存手法よりも小さな RMSE すなわちより高精度な DOA 推定を可能にしていることが確認できる。

### 3.3 ビームフォーミング応用

さらに、これらのアレーを用いて、2次元ビームフォーミング性能を評価した結果を図 4 に示す。URA、アワーグラスアレー、提案するスパースアレー構造を用いて、所望波方向に主ビーム、干渉波方向にヌル点が向くよう調整した結果である。シミュレーション諸元の詳細は文献[16]-[17]を参照されたい。図 4(a),(c),(e),(g)が KR 積によるアレー拡張なし、(b),(d),(f),(h)がアレー拡張ありの場合の結果である。図 4 より、KR 積拡張を行うことで、高分解能なビームフォーミングが可能になっていることが確認できる。

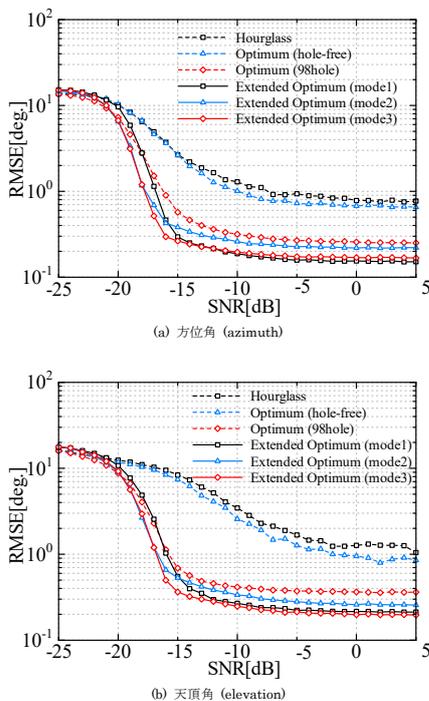


図3 DOA 推定精度の比較 (SNR-RMSE 特性)

### 4. 将来展望

冒頭でも述べた通り、5G および今後導入が見込まれる Beyond 5G、6G といった技術では、高速データ通信のための高分解能ビームフォーミング、そのための大規模アレーアンテナが必須である。ハードウェアコストを低減したスパースアレーの導入はアレー開口長の仮想的な拡張につながり、ビームフォーミング性能の向上につながる。また、既存のシステムにおいても、一部のアンテナ素子の不具合等で URA としての受信信号が構成できない場合に、その信号を合成する手法としての利用も考えられ、今後ますます注目度が増すであろう技術であると言える。

# 大規模スパースアレーにおける高効率アンテナ選択手法と拡張アレー信号処理

## Antenna Selection and Extended Signal Processing for Massive Sparse Array

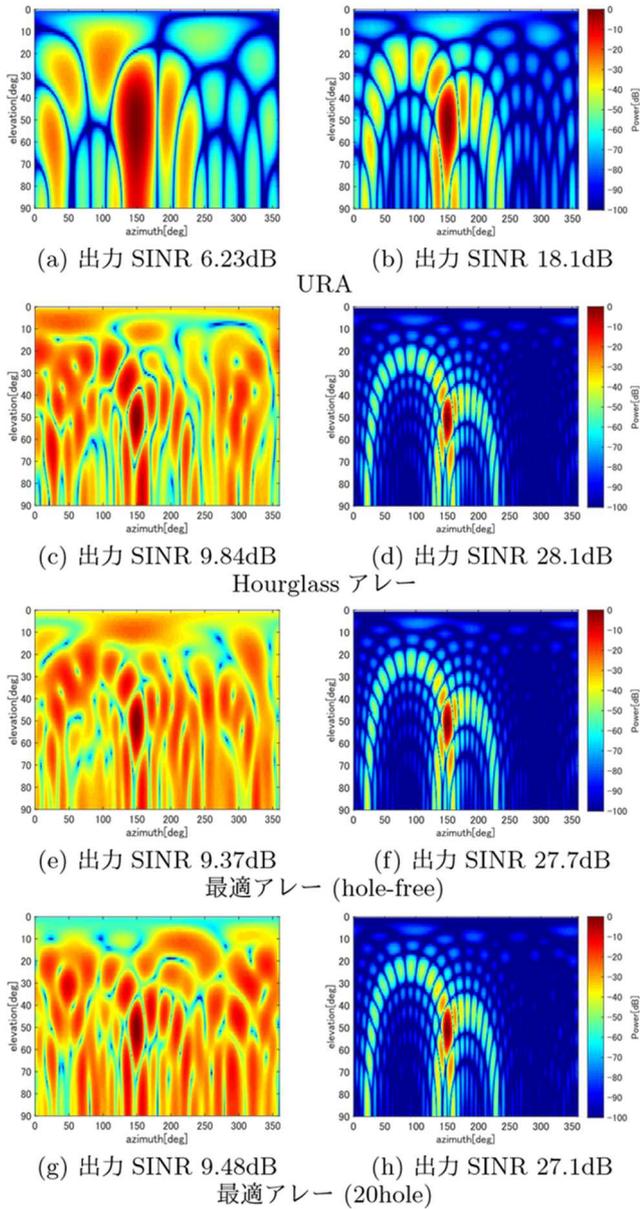


図4 ビームフォーミング結果と出力 SINR の比較

### おわりに

本稿では、すなわちスパースアレーにおけるアンテナ素子位置の最適化手法、さらにホールを許容した場合の受信信号補間手法、アレー開口長の拡張手法について検討した。さらに、KR 積拡張によるアレー信号処理を併用することで、高分解能な到来方向推定およびビームフォーミングが可能となることを示した。

### 参考文献

- [1] M. I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2001.
- [2] H. L. Van Trees: "Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory," Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2002.
- [3] P. Chevalier, L. Albera, A. Ferreol, and P. Comon: "On the Virtual Array Concept for Higher Order Array Processing," IEEE Trans. Signal Process., vol. 53, no. 4, pp. 1254-1271, Apr. 2005.
- [4] A. T. Moffet, "Minimum-redundancy linear arrays," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 16, no. 2, pp. 172-175, Mar. 1968.
- [5] P. P. Vaidyanathan and P. Pal, "Direct-MUSIC on sparse arrays," Proc. Int. Conf. Signal Process. Commun., pp. 1-5, July 2012.
- [6] W. Ma, T. Hsieh and C. 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.
- [7] P. Pal and P. P. Vaidyanathan: "Nested arrays in two dimensions, Part II: Application in two-dimensional array processing," IEEE Trans. Signal Process., Vol. 60, No. 9, pp. 4706-4718, Sep. 2012.
- [8] R. A. Haubrich, "Array design," Bull Seismol. Soc. Amer., Vol. 58, No. 3, pp. 977-991, Jun. 1968.
- [9] C. L. Liu and P. P. Vaidyanathan, "Hourglass Arrays and Other Novel 2-D Sparse Arrays with Reduced Mutual Coupling," IEEE Trans. Signal Process., vol. 65, no.13, pp. 3369-3383, July 2017.
- [10] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr, and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing", Science, vol. 220, no. 4598, pp.671-680, 1983.

# 大規模スパースアレーにおける高効率アンテナ選択手法と拡張アレー信号処理

## Antenna Selection and Extended Signal Processing for Massive Sparse Array

- [11] 総務省 情報通信白書 (平成 28 年度版)  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/h28.html>
- [12] 今井哲朗, 北尾光司郎, トラン ゴクハオ, 大巻信貴, "5G のための電波伝搬", NTT ドコモテクニカルジャーナル, vol. 23, no. 4, pp. 40-48, 2016 年 4 月。
- [13] S. Nakamura, S. Iwazaki and K. Ichige, "An Optimum 2D Sparse Array Configuration with Reduced Mutual Coupling, " Proc. Int. Sympo. Antenna and Propagation, no. B-1-128, Oct. 2018.
- [14] S. Nakamura, S. Iwazaki and K. Ichige, "Optimum 2D Sparse Array and Its Interpolation via Nuclear Norm Minimization," Proc. Int. Sympo. Circuit and Systems, pp.1-5, May 2019.
- [15] S. Nakamura, S. Iwazaki and K. Ichige, "Optimization and Hole Interpolation of 2-D Sparse Arrays for Accurate Direction-of-Arrival Estimation," IEICE Trans. Commun., (submitted).
- [16] S. Nakamura, S. Iwazaki and K. Ichige, "Evaluation 2-D Sparse Arrays by Its Beamforming and BER characteristics, " IEICE Commun. Express, vol. 9, no. 6, pp. 200-206, June 2019.
- [17] S. Iwazaki, S. Nakamura, and K. Ichige, "DOA-based Weighted Spatial Filter Design for Sum and Difference Composite Co-Array," IEICE Trans. Communications, vol. E103-B, no. 10, Oct. 2020, (accepted, to appear).

この研究は、平成 28 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 29 年度～令和元年度に実施されたものです。