

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04500

研究課題名（和文）スパースアレーによる拡張アレー信号処理とその高精度センシング応用

研究課題名（英文）Extended Signal Processing by Sparse Arrays and Its Application to High-Resolution Sensing

研究代表者

市毛 弘一（Ichige, Koichi）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10313470

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高分解能レーダのための要素技術：「スパースアレー」と「拡張アレー信号処理」を踏まえて、高精度センシングの実現を目指したものであり、(1)スパースリニアアレーの高機能化、(2)深層学習による2次元スパースアレーの最適化、(3)ビームフォーミング応用と信号復元などの成果を挙げている。主結果である(1)スパースリニアアレーの高機能化においては、既存のスパースリニアアレー構造をもとに最適化を行い、新たなアレー構造を複数考案した。特にGENAMS (Generalized ENAMS)は、現時点では世界で最も優れたスパースリニアアレー構造として認識されている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新たなスパースリニアアレー構造を構築したこと、およびそのアレー構造がアレー自由度を大いに高めつつ、相互結合の影響を低減したこと、さらにサブアレー化により計算コスト低減の目途をつけたことが挙げられる。特にGENAMS (Generalized ENAMS)は、現時点では世界で最も優れたスパースリニアアレー構造として認識されており、今後さらなる発展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research aims at developing high resolution sensing using sparse arrays and extended signal processing. The achievements are (1) high efficiency sparse linear arrays, (2) optimization of 2-D sparse arrays based on deep learning, and (3) beamforming application and signal modulation/demodulation. In (1) sparse linear arrays, a novel sparse array configuration called GENAMS (Generalized ENAMS) has been proposed which enhance degree of freedom while suppressing mutual coupling effect. So far it is regarded as one of the best sparse linear arrays.

研究分野：計測工学

キーワード：スパースアレー センシング 拡張アレー信号処理

### 1. 研究開始当初の背景

スパース(まばら)に配置されたアンテナ素子で受信された信号から、仮想の等間隔アレーによる受信信号を合成して、より自由度の高い推定を可能にするスパースアレー技術が注目されている。カトリ・ラオ積拡張を導入することで、実アレー素子数を超える到来波の分離を可能にするなど、この10年ほどで飛躍的な進歩を遂げている。しかしながら、カトリ・ラオ積拡張の導入は、アレー自由度の増加と引き換えに、従来はアレー素子数  $N$  のオーダーで留まっていた演算量を、 $N$  の2乗のオーダーに引き上げてしまう。近年のスパースアレーの研究の多くは、膨大な演算量を直視せずに、アレー自由度の増加による到来波推定技術の高精度化・高分解能化にのみ着目している。高精度化・高分解能化と同時に、低コスト演算を実現する信号処理方式の確立が望まれる。

### 2. 研究の目的

アレー自由度を向上させる新たなスパースアレー構造を考案して、高精度化・高分解能化を図りつつ、低コスト演算を実現する信号処理方式を確立させることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 1次元スパースアレーの検討

既存のネストアレー、MISCアレー、TS-ENAなどをもとに、アレー素子配置を最適化して修正することで、欠損のない仮想リニアアレーを構築する新たなスパースアレー構造を検討する。

#### (2) 2次元スパースアレーの検討

既存のオープンボックスアレー、砂時計アレーなどをもとに、深層学習による最適化を適用することで、欠損のない仮想矩形アレーを構築する新たなスパースアレー構造を考案する。また、欠損のある仮想アレーであっても、核ノルム最小化により欠損を埋めることで、さらに優れた性能を発揮させることを示す。

#### (3) ビームフォーミング手法の検討

さらに、到来方向推定のみならず、ビームフォーミングおよび変復調にも応用して、高分解能なビーム形成が可能となること、実際の通信信号で変復調が可能となること、およびその演算コストを低減可能であることを示す。

### 4. 研究成果

主な研究成果として、Flexible Extended Nested Array with Multiple Subarrays (F-ENAMS) [1]、Generalized ENAMS (GENAMS) [2]を紹介する。

#### (1) Flexible ENAMS

図1に提案するアレー構成の例を示す。アレー素子が密集する箇所を左右に振り分けつつ、中央の素子配置を複数の区分に分割して素子位置を最適化することで、ホールのない差分アレーを構成し、かつ極めて高いアレー分解能を実現する。図2にアレー自由度と到来方向推定精度を示す。最新の既存手法と比較して、提案するアレー構造(一番下の黄緑線)が最も良い性能を実現している。併せて、サブアレーに分割することで、演算コストの低減を実現している。

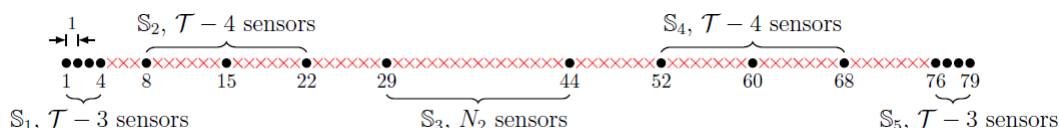


図1: F-ENAMSアレーの構成例。実素子数16素子を5つのサブグループに分割して、各グループでの素子配置を最適化している。欠損のない仮想差分アレーを実現可能。

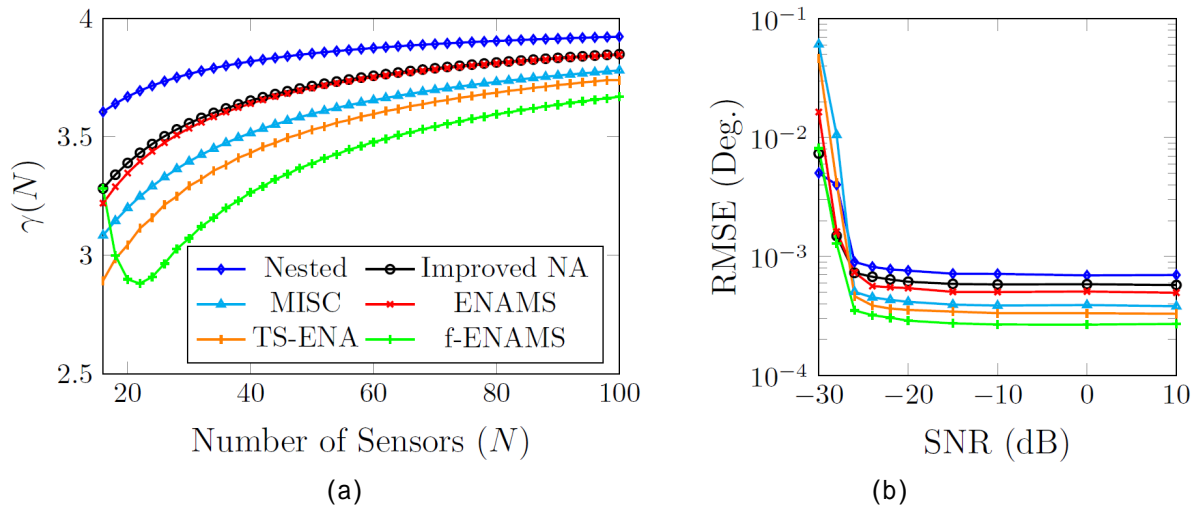


図 2 : F-ENAMS アレーの性能評価 : (a) アレー自由度, (b) 到来方向推定精度 . 提案手法 F-ENAMS のアレー自由度および到来方向推定精度が, 従来手法よりも優れている .

## (2) GENAMS

前述の F-ENAMS では, 素子位置を決定する際のパラメータ設定により, 各サブアレーの素子数が一意に決まらず, サブアレー素子数によっては最適な特性が得られなかった . この問題を改善して, 各サブアレーの素子数まで考慮して最適化して一般化することで, F-ENAMS の特性をさらに改善するスパースアレー構造を考案している . 図 3 にアレー自由度および結合漏れ係数の挙動を調べた結果を示す . 提案する GENAMS は, アレー自由度を最も高くしており, かつ結合係数も他の手法と遜色ない程度となっている . 演算コスト低減効果も含めて, 現時点では, 最も良い特性を実現するスパースリニアアレー構造を構築できたと言える .

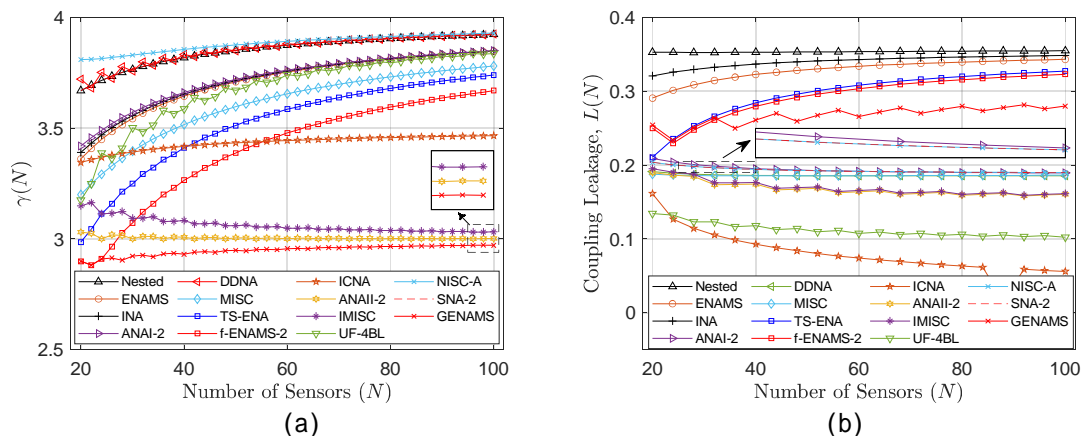


図 3 : GENAMS アレーの性能評価 : (a) アレー自由度, (b) 結合漏れ係数 . 提案手法 GENAMS のアレー自由度が最も優れており, 結合係数も問題ないレベルに抑えられている .

## (3) その他

上記のアレー構造以外にも, 深層学習を用いた 2 次元スパースアレー構造の最適化手法 [3], ビームフォーミングおよび変復調の実現 [4] などの成果を挙げている .

### < 引用文献 >

- [1] S. Wandale, K. Ichige, "A Generalized Extended Nested Array Design via Maximum Inter-Element Spacing Criterion," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 30, pp. 30-35, Jan. 2023.
- [2] S. Wandale, K. Ichige, "Flexible extended nested arrays for DOA estimation: Degrees of freedom perspective," *Signal Processing*, vol. 201, no. 108710, Dec. 2022.
- [3] S. Wandale, K. Ichige, "Simulated Annealing Assisted Sparse Array Selection Utilizing Deep Learning," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 156907-156914, Dec. 2021.
- [4] 森本慎也, 岩崎翔, 市毛弘一, 「スパースアレー受信信号の拡張と位相復元による適応ビームフォーミング」, *電子情報通信学会論文誌 A*, vol. J104-A, no. 12, pp. 250-257, Dec. 2021 .

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>NAKAMURA Shogo, IWAZAKI Sho, ICHIGE Koichi   | 4. 巻<br>E104.B          |
| 2. 論文標題<br>Optimization and Hole Interpolation of 2-D Sparse Arrays for Accurate Direction-of-Arrival Estimation | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>IEICE Transactions on Communications   | 6. 最初と最後の頁<br>401 ~ 409 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1587/transcom.2020EBP3035   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-               |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Wandale Steven, Ichige Koichi  | 4. 巻<br>2021        |
| 2. 論文標題<br>Design of sparse arrays via deep learning for enhanced DOA estimation | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>EURASIP Journal on Advances in Signal Processing                       | 6. 最初と最後の頁<br>1 ~ 1 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1186/s13634-021-00727-5                           | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-           |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>森本 慎也、岩崎 翔、市毛 弘一                                 | 4. 巻<br>J104-A          |
| 2. 論文標題<br>スパースアレー受信信号の拡張と位相復元による適応ビームフォーミング               | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>電子電子情報通信学会論文誌A 基礎・境界                             | 6. 最初と最後の頁<br>250 ~ 257 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.14923/transfunj.2021JAP1014 | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難                     | 国際共著<br>-               |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Wandale Steven, Ichige Koichi  | 4. 巻<br>9                     |
| 2. 論文標題<br>Simulated Annealing Assisted Sparse Array Selection Utilizing Deep Learning | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Access  | 6. 最初と最後の頁<br>156907 ~ 156914 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/ACCESS.2021.3129856                                | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-                     |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Hamada Shohei, Ichige Koichi  | 4. 巻<br>10              |
| 2. 論文標題<br>Modified MODE for Increasing the Maximum Number of Sources in DOA Estimation | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>IEICE Communications Express  | 6. 最初と最後の頁<br>391 ~ 397 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1587/comex.2021XBL0085                                   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-               |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Saito Ryo, Kashiwagi Katsuhisa, Arakawa Nobuya, Hamada Shohei, Ichige Koichi      | 4. 巻<br>10              |
| 2. 論文標題<br>FMCW radar with multiple initial frequencies for robust source number estimation | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>IEICE Communications Express  | 6. 最初と最後の頁<br>698 ~ 703 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1587/comex.2021SPL0031                                       | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-               |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>NAKAMURA Shogo, IWAZAKI Sho, ICHIGE Koichi   | 4. 巻<br>E104.B          |
| 2. 論文標題<br>Optimization and Hole Interpolation of 2-D Sparse Arrays for Accurate Direction-of-Arrival Estimation | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>IEICE Transactions on Communications   | 6. 最初と最後の頁<br>401 ~ 409 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1587/transcom.2020EBP3035   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-               |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Wandale Steven, Ichige Koichi   | 4. 巻<br>201                   |
| 2. 論文標題<br>Flexible extended nested arrays for DOA estimation: Degrees of freedom perspective | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Signal Processing   | 6. 最初と最後の頁<br>108710 ~ 108710 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.sigpro.2022.108710                                      | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                     |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Wandale Steven、Ichige Koichi  | 4. 巻<br>30            |
| 2. 論文標題<br>A Generalized Extended Nested Array Design via Maximum Inter-Element Spacing Criterion | 5. 発行年<br>2023年       |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Signal Processing Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>31 ~ 35 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/LSP.2023.3238912  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-             |

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Steven Wandale  |
| 2. 発表標題<br>A Nested Array Geometry with Enhanced Degrees of Freedom and Hole-Free Difference Coarray |
| 3. 学会等名<br>European Signal Processing Conference (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Steven Wandale   |
| 2. 発表標題<br>On the DOA Estimation Performance of Optimum Arrays Based on Deep Learning |
| 3. 学会等名<br>IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (国際学会)       |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Shohei Hamada  |
| 2. 発表標題<br>A Note on The Maximum Number of Sources in DOA Estimation by MODE    |
| 3. 学会等名<br>IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Koichi Ichige  |
| 2. 発表標題<br>Robust Source Number Estimation Based on Denoising Preprocessing |
| 3. 学会等名<br>IEEE Sensor Signal Processing for Defence Conference (国際学会)      |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Ryo Saito   |
| 2. 発表標題<br>Robust Source Number Estimation Based on FMCW Radar with Multiple Initial Frequencies |
| 3. 学会等名<br>International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)                            |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Shinya Morimoto  |
| 2. 発表標題<br>Extended Beamforming by Restored Phase Information of Virtual Array Input Signal |
| 3. 学会等名<br>International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)                       |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Shohei Hamada   |
| 2. 発表標題<br>Robust Source Number Estimation using Annihilating Filter and Downsampling Scheme |
| 3. 学会等名<br>International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)                        |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Steven Wandale   |
| 2. 発表標題<br>2D Sparse Array Selection via Deep Learning                |
| 3. 学会等名<br>International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|