

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06060

研究課題名(和文) 多次元送信ダイバーシチを用いたMIMOレーダによる目標物の高性能センシング技術

研究課題名(英文) High-Performance Target-Sensing Techniques Using MIMO Radar with Multiple Transmitting Diversity Schemes

研究代表者

菊間 信良 (Kikuma, Nobuyoshi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40195219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)レーダを用いて目標物の位置と広がりを検出するための高分解能・高効率なセンシング技術の研究開発を行った。送信側で符号拡散送信およびマルチビーム送信の複合送信ダイバーシチ方式を導入し検討を行った。その結果、遠方から到来する到来波の到来方向の推定精度が向上し、角度広がりも同時に行うことができることを示した。さらに非探索型アルゴリズムを用いることで効率的に方向と角度広がりを推定できることを示した。電波源が近傍にある場合においては、推定アルゴリズムの改良法を行い、合わせてアレー校正法を考案し、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Target-sensing techniques with high resolution and high efficiency have been researched and developed so that MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) radar can detect both the position and extension of the targets. In this research, signal transmission diversity schemes are utilized which consist of code spreading and multiple beamforming compositely. As a result, it is confirmed that the DOA (direction-of-arrival) estimation accuracy of incoming far-field waves is improved and we can obtain the angular spread of each incoming far-field wave simultaneously. Moreover, the method features direct calculation with high efficiency. For the near-field source localization, our estimation method is improved continuously. In addition, the calibration method for array antenna is devised and its effectiveness is confirmed.

研究分野：工学

キーワード：MIMOレーダ レー校正法 送信ダイバーシチ マルチビーム 到来方向推定 角度広がり推定 近傍波源位置推定 車載レーダ ア

## 1. 研究開始当初の背景

(1) ミリ波レーダは波長数ミリメートルの電波(ミリ波)を使って対象物からの反射波を測定し、相対距離や速度等を検知する装置である。近年、自動車のACC(Adaptive Cruise Control)・車間距離警報システムなどに用いるために、76GHz帯の車載レーダが前方監視レーダとして国内外で実用化され始めており、自動運転への応用研究も積極的に進められている。今後の安全・安心な車社会の実現に向けたこれらシステムの普及には、車載レーダの高信頼性が急務であり、このためには電波センサであるアンテナと高速かつ高機能信号処理技術の開発が必須である。

(2) 地上デジタル放送、スマートフォン、電子キー等さまざまな無線機器の使用が日常化してきており、今後、益々IoT(Internet of Things)環境で使用される。このような環境で伝搬特性測定の必要性が高まってきている。特に、マルチパスによりコヒーレントな複数波が同時に入射する電波環境や、波源と受信アンテナとの距離が短く、波源を近傍波源として取り扱う必要がある場合がある。このように、コヒーレント波や近傍波源の位置推定を正確かつ効率よく行う方法が求められている。

(3) 無線電力伝送においては受電装置の位置が分かれば効率的に電力を送ることができる。また安全性の観点から、システム内への異物などの混入を検知する必要がある。それ故、無線電力伝送の分野においても受電端末の位置推定や異物混入のセンシングが重要となり、その正確な推定法が強く求められている。

(4) 昨今、MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)と呼ばれるマルチアンテナ技術が通信やレーダの分野で注目されており、電波の到来方向推定や電波源の位置推定のための高性能波源推定システム構成として期待されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)レーダの送受マルチアンテナを用いて目標物の位置と広がりを検出するための高分解能・高性能・高効率なセンシング技術を研究開発する。AACおよび自動運転の実現のためには、瞬時に、前方を走る車の位置と大きさを推定することが不可欠となることが理解できるであろう。したがって、MIMOレーダを用いた目標物の位置と広がり推定が可能となれば、その有用性・有効性はかなり高いと言える。本研究の具体的な研究目的を以下に記す。

(1) MIMOレーダ用推定アルゴリズムの高性能化

車載レーダにおいて目標物(例えば、前方を走る車)を検出する際、目標物からの反射波はその複雑な形状に依存して、大きさ、位相の異なる複数の波(素波)から構成される。これらは角度広がりのある電波となり、一般に推定が困難な到来波となる。1つの解決方法として、アンテナ数を増やしアレー化して角度分解能を上げ、これらの電波をすべて分解することが考えられる。しかし、車載の場合、そのスペースは限られており、また素子数が増えると共に演算負荷が増大するため、素子数を増やす方法は現実的ではない。そこで、各目標物からの反射波の到来中心角とその角度広がりを推定する方法を検討する。この方法が可能であれば、1つの目標物からの反射波は1つの波と捕らえられ、素波を分解する必要がなくなるので、素子数を増やす必要もなくなる。それ故、車載レーダ用の推定手法としては大きく期待される技術である。本研究では、MIMOレーダ用推定アルゴリズムとしてパラメータ探索型のCapon法やMUSIC法、および非探索型のDOA-Matrix法に基づく推定手法を提案し、その基本特性を明確にする。

## (2) 近傍波源の位置と大きさ推定の実現

近傍の電波源(反射物)を推定する方法としては、球面波モードベクトルMUSIC法を用いることが多い。しかし、この手法では波源が存在すると想定されるパラメータ空間を探索する必要があるため、方位と距離のように空間の次元が増えると膨大な探索時間がかかり効率的ではない。本研究では、この問題を解決する方法としてMIMOレーダに近傍界DOA-Matrix法(DOA-Matrix法を近傍波源推定用に改良したもの)を用いた推定法について検討する。また角度広がり推定から電波源の大きさの推定も試みる。この方法を用いるとパラメータ空間の探索をせずとも数値演算のみで直接波源位置と大きさが導出されるので、大いに期待されるのである。

## (3) 多次元送信ダイバーシチ技術の導入によるMIMOレーダの性能向上

MIMOレーダの送信側で、周波数領域、角度領域、符号領域など多次元にわたるダイバーシチ技術を導入することを検討する。これにより受信側の観測データを多次元化でき、より高い効率と精度で推定できることが期待される。また、MIMOの特徴を活かして、信号の周期定常性や独立性を利用したブラインド信号処理(例えば、Cyclic MUSICや独立成分分析)をMUSIC法などの前段階として使用することも有効であると考えているので、その特性検討も行う。合わせて、従来のSIMO(Single-Input Multi-Output)とMIMOとのハイブリッド方式(切替方式)の動作確認と性能向上の可能性についても検証する。更には、送信側のマルチアンテナに

適応ビーム形成機能をもたせることにより、個々の目標物の大きさなどの特徴抽出をより精度良く行うことができるので、その有効性を示す。

### 3. 研究の方法

(1) MIMO レーダのアンテナとして簡単なリニアアレーアンテナを想定し、遠方から到来する到来波の到来方向と角度広がりを見積もるための解析モデルを構築する。そしてこのモデルを用いたパラメータ（到来方向、角度広がり）推定法を考案する。また、MIMO レーダの送信側に多次元（角度領域、符号領域など）ダイバーシチ技術を導入し、パラメータ推定における有効性を MATLAB 計算機シミュレーションにより検討する。基本アルゴリズムは Capon 法、MUSIC 法、DOA-Matrix 法であり、角度広がり推定が精度良くできるように改良を加える。

(2) 遠方から到来する到来波の到来方向と角度広がりを見積もるためのアルゴリズムの検証のために、電磁波解析ソフトウェアを用いたシミュレーション実験を行う。このソフトウェアはモーメント法や FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法により電磁界問題を解くもので、目標物の電磁界分布を計算するために用いる。電磁波解析ソフトウェアをインストールした解析専用コンピュータを用いて現実に近い環境でシミュレーション実験を行う。その結果から、提案手法の有効性を確認し、また問題点を探る。そして提案手法の改良へとフィードバックする。

(3) リニアアレーアンテナまたは平面アレーアンテナを用いて近傍から到来する到来波の位置を見積もる解析モデルを構築する。そしてこのモデルを用いた MIMO レーダ用パラメータ推定法を考案し、その特性を計算機シミュレーションにより検討する。基本アルゴリズムとしては近傍界 DOA-Matrix 法を用いる。波源位置を表すスペクトラムのピークを探す探索型の場合、位置の特定にかなりの時間がかかるため、非探索型のアルゴリズムの考案が望まれる。従って、非探索型アルゴリズム中心に検討を行い、適宜改良を行っていく。また、近傍電波反射体（近傍波源）の位置推定における多次元送信ダイバーシチ技術の有効性についても検討を行う。

(4) 近傍電波反射体の位置推定の検討においては、パーソナルコンピュータ上での MATLAB 計算機シミュレーションに加えて、1~5GHz 帯で電波暗室内実験を行う。実験結果から、提案手法の有効性を確認し、また問題点を探る。そして、提案手法の改良へとフィードバックする。さらに、実際の環境を想定した実験を通して総合評価を行い、必要に応じて推定アルゴリズムの改良を行っていく。

く。

### 4. 研究成果

#### (1) 推定アルゴリズムの高性能化

車載レーダを想定して、各目標物からの反射波の到来中心角とその角度広がりを見積もる方法を検討した。この方法が可能であれば、1つの目標物からの反射波は1つの波と捕らえられ、素波を分解する必要がなくなるので、素子数を増やす必要もなくなる。本研究では、MIMO レーダ用推定アルゴリズムとしてパラメータ探索型の Capon 法や MUSIC 法、および非探索型の DOA-Matrix 法に基づく推定手法を提案し、その基本特性を明らかにした。更に、全方位に対して推定できるようにアレーアンテナを平面アレーに拡張し、推定アルゴリズムの改良を行った。検討の結果、全方位で精度良く到来方向と角度広がりを見積もることができることを確認した。

#### (2) 近傍波源の位置と大きさ推定の実現

近傍の電波源（反射物）を見積もる方法としては、MIMO レーダに近傍界 DOA-Matrix 法（DOA-Matrix 法を近傍波源推定用に改良したもの）を用いた推定法について検討した。この方法を用いるとパラメータ空間の探索をせずとも数値演算のみで直接波源位置と大きさ（広がり）を導出できる。特に、複数ターゲットが角度的に接近した場合など、従来では分離が困難であった状況で推定精度を向上させるアルゴリズムを提案し、特性解析を行った。その結果、その有効性を確認した。また、アンテナの相互結合が推定に与える影響を解析した。波源が非常にアンテナに近いところにある場合、相互結合が角度推定精度向上に有効に働くことが分かった。

#### (3) 多次元送信ダイバーシチ技術の導入

MIMO レーダの性能向上のため、送信側で、角度領域、符号領域など多次元にわたるダイバーシチ技術を導入することを検討した。合わせて、従来の SIMO (Single-Input Multi-Output) と MIMO とのハイブリッド方式（切替方式）の動作確認と性能向上の可能性についても検証した。更に、複合送信ダイバーシチ用の推定アルゴリズムを考案した。この手法の特徴として、マルチビームを形成してターゲットに集中的に電波を照射することが挙げられるが、このアルゴリズムによって、ターゲットの方向推定精度のみならず反射係数（反射信号強度）の推定精度も向上することが示された。また、符号領域ダイバーシチに対して受信側で仮想アレーアンテナを構成し、開口長を拡張する方法について検討を行った。その結果、素子間隔の冗長性が小さくなるように素子を配置することにより、推定性能が向上することを示した。また、仮想アレーアンテナは平面アレーでも構成でき、これにより目標物の方位角と仰角の2次元角の推定が可能であることも示した。

一方、送信側に角度領域ダイバーシティ（マルチビーム送信）の導入により、目標物の方向と角度広がりへの推定精度が向上することを確認した。これにより目標物の大きさを推定することができる。

(4) 近傍波源位置推定のためのアレー校正法近傍の電波源（目標物）の位置を推定する手法の改良を行いながら、アレーアンテナの素子間結合や素子位置誤差などの影響について検討を行った。さらに、その影響を低減するためのアレー校正法について検討した。参照波源を既知の位置に置いてその受信信号から校正を行うことになるが、十分遠方において到来角度情報のみで校正する方法が有効であることを示した。これにより推定アルゴリズムが高精度で動作することが確認された。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計 11 件）

- ① Sota Iwase, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, Performance Improvement of MIMO Radar Using Transmission Beam and Code Diversity, 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2017), 査読有, 2017 年 10 月 31 日, Phuket (Thailand)
- ② Yuto Nakajima, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, DOA Estimation of Desired Signals Using Radio Holography and Signal Cyclostationarity, 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2017), 査読有, 2017 年 10 月 31 日, Phuket (Thailand)
- ③ Nobuyoshi Kikuma, Kensuke Tanaka, and Kunio Sakakibara, Performance Improvement of Localization of Radio Sources by using Spatial Smoothing Processing in Near-field DOA-Matrix Method with SAGE Algorithm, IEEE MTT-S 2017 International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM2017), 査読有, 2017 年 3 月 21 日, Nagoya (Japan)
- ④ Kazunari Mase, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, Effectiveness of Transmitting Cross Coil Stacked with Arrayed Coils in Wireless Power Transfer with Magnetically Coupled Resonance, 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), 査読有, 2016 年 10 月 26 日, Okinawa (Japan)
- ⑤ Makoto Jomoto, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, Simultaneous Estimation of Azimuth DOA and Angular Spread of Incident Radio Waves by DOA-Matrix Method Using Planar Array, 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), 査読有, 2016 年 10 月 28 日, Okinawa (Japan)
- ⑥ Kensuke Tanaka, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, Influence of Mutual Coupling between Array Elements in Location Estimation of Radio Sources Using Near-Field DOA-Matrix Method, 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), 査読有, 2016 年 10 月 28 日, Okinawa (Japan)
- ⑦ Yuta Kamiya, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, DOA Estimation of Desired Signals Using In-Phase Combining of Multiple Cyclic Correlations and Spatial Smoothing Processing, 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), 査読有, 2016 年 10 月 28 日, Okinawa (Japan)
- ⑧ Rikako Yamano, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, Effect of Redundancy of Element Placement on DOA Estimation with Circular Array, 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), 査読有, 2016 年 10 月 28 日, Okinawa (Japan)
- ⑨ Masatada Hokiguchi, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, Target Direction Estimation by MIMO Radar Using Root-MUSIC with Minimum Redundancy Array, 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), 査読有, 2016 年 10 月 28 日, Okinawa (Japan)
- ⑩ Makoto Jomoto, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, Simultaneous Estimation of DOA and Angular Spread of Incident Radio Waves by DOA-Matrix Method with SLS and SAGE Algorithms, 2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2015), 査読有, 2015 年 11 月 11 日, Hobart, Tasmania (Australia)
- ⑪ Keita Matsubara, Nobuyoshi Kikuma, Kunio Sakakibara, Blind Signal Separation Using SOBI Algorithm Under the Effect of Mutual Coupling of Array, 2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2015), 査読有, 2015 年 11 月 12 日, Hobart, Tasmania (Australia)

〔その他〕

ホームページ等

[http://researcher.nitech.ac.jp/html/232\\_ja.html](http://researcher.nitech.ac.jp/html/232_ja.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

菊間 信良 (KIKUMA, Nobuyoshi)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：40195219