

財団法人テレコムエンジニアリングセンター  
公益的調査研究助成

## 成果報告書

調査研究テーマ

# アレーアンテナの精密キャリブレーション手法と その高機能化に関する研究

助成期間

平成 21年 4月 ~ 平成 24年 3月

提出期日

平成 24年 4月

研究代表者氏名

山田 寛喜

所属機関・職名

新潟大学自然科学系・教授

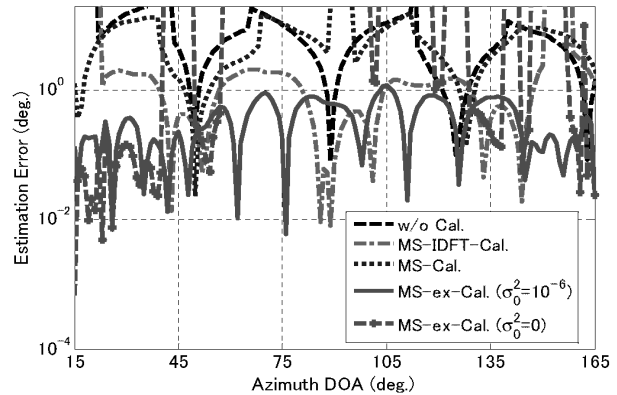
# 1. 調査研究の概要

調査研究テーマ	アレーアンテナの精密キャリブレーション手法とその高機能化に関する研究		
助成期間	平成 21年 4月 ~ 平成 24年 3月		
報告者 (助成対象者)	山田 寛喜	印	
勤務先	機関名	新潟大学	
	住所	新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050番地	
	TEL		
	E-mail		
助成金額			
本報告書作成日	平成24年4月9日		

## 調査研究概要

MUSIC 法に代表される高分解能な電波到来方向推定など、アレーアンテナは様々なアプリケーションに利用されている。特に電波到来方向推定において、アレーアンテナの性能を最大限に発揮させるには、アレーアンテナの各素子の加工誤差などのばらつきや素子間相互結合といった誤差要因の補償、すなわちキャリブレーションが不可欠である。アレーキャリブレーションに関しては、古くから数多くの手法が考案されているが、それら多くは素子に着目したものであった。この調査検討では、マニフォールドセパレーションという素子数、素子配置に囚われないキャリブレーション手法を拡張し、実験により、その有効性を示した(図中のMS-ex-Calが提案手法)。

さらに、実フィールドでの運用時のリアルタイムキャリブレーションの実現を目指し、直接波に加え建物の壁面などのからのコヒーレントなマルチパス波が存在する環境に対応したキャリブレーション手法を考案した。また、参照信号無し、すなわち到来方向が未知な信号を用いた任意形状アレーに適用可能なフルブラインド・キャリブレーション手法を考案し、その手法のための誤差モデルを提案した。



地板上4素子モノポールアレー到来方向推定誤差(実験結果)

## 2. 調査研究の詳細

### 2.1 課題名:

アレーアンテナの精密キャリブレーション手法とその高機能化に関する研究

### 2.2 調査研究の背景

近年、アダプティブ及びMIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 技術を用いた通信やセンシングをはじめとして、時空間情報を利用した高度な無線信号処理に関する研究開発が精力的に進められている。これらのアプリケーションにおける空間とシステムのインターフェースであるアレーアンテナは、そのシステムの性能を左右する重要な役割を果たしている。特に、車載レーダ等のセンシング応用では、MUSIC, ESPRIT 法などの高分解能推定手法により、アレー長（ビーム幅）を超えた検出性能の実現が可能であることが知られており、その実用化の検討が精力的に進められている。ただし、その性能実現には正確なアンテナシステムのキャリブレーションが不可欠となり、アンテナシステムへの広範な普及を妨げている。電波暗室等の特別な環境において、アンテナシステム単体を精密測定した場合には、高精度なキャリブレーションが実現可能であるが、様々なアンテナ治具や筐体に取り付けられた場合、マルチパス波が存在するような実環境下でのキャリブレーションを実現するための有効な手法は開発されていないのが現状である。

### 2.3 調査研究の目的:

本研究では、実用に資するアレーキャリブレーション手法の開発を主目的としている。特にこの研究では、1) 方位角推定を目的としたアレーであっても、筐体等との結合により仰角依存性が生じる、2) 事前のキャリブレーション測定が可能であっても、運用時のアレー周囲環境の変化による特性変化のため、運用時には当初の性能が発揮されない等の問題点を解決することを目的とした。

#### ■ マルチモード校正パラメータの測定/推定手法の開発

アレー校正パラメータの方位角・仰角依存性は、アレー系全体の電流分布のモードの概念により解決可能である。ここでは仮想アレーの概念を導入したキャリブレーション測定手法を開発する。

#### ■ フィールド簡易校正手法の開発

運用時に新たに生じた結合の影響を取り除くため、ハンディ端末からのパイロット信号（方向未知の校正信号）を用いた簡易キャリブレーション測定法を開発する。

### 2.4 調査研究の意義:

#### ■ 学術的な意義・将来性

従来のアレー校正問題のほとんどはアレー素子出力、すなわち受信点（とその相互結合）のみに着目した校正手法であり、定式化後には素子形状などの電流分布の空間的な広がりには考慮されていない。これは集中定数等価回路的な取り扱いである。本調査研究で用いる仮想アレーの概念は、系全体の電流の振る舞いを表現する一手法を提案しており、アレーを積極的に空間回路（分布定数回路）として取り扱うことを試みるものである。校正手法としての有効性を示すことにより、他のアプリケーションにおいても空間回路的な取り扱いというアレー解析の次のステージへの発展に寄与することを目指している。

#### ■ 工学的・実用上の意義・発展性

開発手法は、校正測定の負荷が大きく軽減可能であり、かつ、運用時の誤差の容易な補正の実現が期待されるものである。特に今回示唆したフルブラインドキャリブレーションのための誤差モデルは、どのように運用するのかといったアプリケーションに応じたキャリブレーション適用スケジューリングを明らかにする課題は残っているものの、実装に有効であるものと期待される。これにより、現在、実装が滞っている高分解能波源探索アルゴリズムの様々な機器への普及が加速し、実用アレーセンサとしてのアンテナ性能が飛躍的に発展するものと考えている。

## 2.5 調査研究の方法:

マルチモード動作を含めたアンテナ系のキャリブレーション手法、および、実フィールドでの簡易校正手法実現のためのフルブラインド・キャリブレーション手法を開発するために、以下のような手順、方向で調査研究を行った。

### 1) マルチモード動作を含めたアンテナ系のキャリブレーション手法

筐体や治具などの影響を含め、かつ素子・アレー系に対する依存性の少ないキャリブレーション手法として、マニフォールドセパレーションと呼ばれるアルゴリズムを検討した。これはモードベクトルを素子位置に依存しない空間に変換する手法であり、様々なアレーに容易に適用できるものである。素子特性を含めた電磁界シミュレーションにより、その特性・問題点を明らかにし、対角 loading 等の数値的に安定となる工夫を施した。さらに、アレーを試作し構築した実験系で実証実験を行った。

### 2) フルブラインド・キャリブレーション手法を開発

実フィールドでのリアルタイム・キャリブレーション実現のための問題点を洗い出し、まず、マルチパス波に対応したアルゴリズムを考案した。次に、参照信号を用いることなく、キャリブレーションを実現するための問題点を、シミュレーションにより考察した。校正パラメータに加え到来方向を未知とすることにより、方程式の自由度が増し、数値的解が不安定（解がほぼ不定）となることを明らかにした。次にその解決手段として、誤差が素子間相互結合と素子のインバランスにより生じるものと仮定したモデルを採用し、そのモデルを任意アレーに拡張したアルゴリズムを開発した。

## 2.6 調査研究の特色

本調査研究はアレーアンテナシステムの筐体や治具などの影響を含めたマルチモード動作に着目したキャリブレーション手法の開発、マルチパス環境でのキャリブレーションの実現、さらにはフル・ブラインド・キャリブレーション手法の開発を狙ったものであり、以下のような特色がある。

### ■ 仮想アレーの概念を用いたマルチモード校正手法の導入

従来校正法では素子給電点のみに着目した校正行列を用いた校正を行う、すなわち、素子の利得誤差と素子間の相互結合の補正のため $N$ 素子ならば $N$ 行 $N$ 列の校正行列となる。この行列が角度依存性を有することが校正を困難とする要因である。角度依存性の主要因はアレー上の他の点との結合である。提案手法では校正時にアレー上の複数の点の影響を含めた校正を行う。これは仮想素子の追加と等価である。このような仮想アレー化の概念を取り入れた校正手法を提案している点に特徴がある。得られる校正行列は角度依存性のない定数行列となり、取り扱いも容易であり、更に少ない校正データ（事前の校正測定への負荷軽減）による校正も実現可能となる。

### ■ マルチパス環境下での校正手法の実現

アレーアンテナのキャリブレーションは、運用時と全く同じ環境下（例えば、設置後の試験運用中）に行うことが理想である。そのような環境下では直接波のみならずコヒーレントなマルチパス波が存在するため、既存のキャリブレーション手法は機能しない。到来波の角度情報は利用するものの、複素振幅情報は未知でも機能する校正手法を開発した。このような特徴を有するキャリブレーション手法は、過去には存在しておらず、独創的な手法であるといえる。

### ■ フルブラインド・キャリブレーションのための誤差モデル、手法の開発

キャリブレーション行列、すなわち誤差モデルに全くの制約を与えず、かつ未知波源を用いたフルブラインド手法に関する報告は、未だ存在していない。今回の調査検討において、そのような手法は実現可能であるのかについて明らかにすることに取り組んだ。理論的証明は達成できていないがシステマティックなシミュレーションにより、その困難性（少なくとも数値的に解不定となる場合有り）を明らかにした。さらに現実的な解法として、既存の誤差モデルに基づく手法を拡張し、任意アレーへ適用可能とした。既存手法で想定している誤差モデルでは、そのモデルを用いる妥当性が十分に示されていなかった。今回の調査検討では、その問題点を明らかにし、誤差モデルを改良した点に大きな特色がある。

### 3. 年度ごとの調査研究内容

初年度分 平成 21.4～平成 22.3

初年度は、多素子のアレーの受信データを高速に測定可能な測定系を構築し、ダイポールからなる 1 次元リニアアレーの校正行列の仰角依存性の校正に対する有効性を検証した。半波長ダイポールであっても、厳密には、電流分布に仰角依存性が存在し、仰角の異なる波が到来した場合、その波の方位角推定精度が劣化する。ここでは、モーメント法でのセグメント分割のように、素子上にいくつかの仮想点を設け仮想的な平面アレーとし、その拡張校正行列を用いることで、方位角精度が向上し、かつある程度の仰角推定が可能となることを実験により実証した。すなわち、電流分布（モード）の仰角依存性を用いた到来波の分離実験である。2 次元的な分離により方位角推定精度も向上する。これはマルチモード動作素子をアレーとして用いることで、より顕著となることが予想される。その効果の検証は来年度以降の課題である。なお、本年度の研究において、提案手法が既存手法の MS(Manifold Separation)-MUSIC と関連していることを確認した。但し、既存手法では最適仮想アレー素子数の決定が困難であるのに対し、提案手法では推定の行列のランクから適切な素子数の判定が可能である。さらに、これらの考察を通して、次年度以降の検討課題であるマルチパス環境下での校正手法に関する知見も得られた。

平成 22.4～平成 23.3

平成 22 年度は、特にマルチパス環境下でのアレー校正手法の開発・改良と、任意形状アレーにおける校正手法の改良を中心に、それらの手法の改良と実証実験に取り組んだ。

マルチパス環境下でのアレー校正手法は、アレーを用いる現地での校正手法の開発を目的とし、方位が既知の送信アンテナを用いることを想定した。ここでは、マルチパス波の素波とコヒーレント参照波の雑音部分空間との直交性に着目した校正を施すことにより、複素振幅に依存しない校正手法が実現できること、および、素波の角度誤差に対しロバスト性を有することを明らかにした。さらにマルチモード素子を用いたアレーにおける校正手法として、アレーマニフォールド分離法の有効性を検討した。これは、本来、任意形状アレーを仮想的な等間隔アレーに変換する手法であるが、仮想素子数の増加が可能であるため、マルチモード特性による誤差補正にも有効といえる。ここでは、キャリブレーション既存手法の問題点を明らかにし、申請者等が提案している手法の適用が有効であることを示した。なお、仮想素子数の増加に伴い、校平方程式が数値的に不安定となる問題点が明らかとなったが、対角ローディングと呼ばれる安定化手法を用いることにより、実用的に十分な精度での校正が実現されることを示した。

最終年度分 平成 23.4～平成 24.3

最終年度である平成 23 年度は、昨年度までの研究成果を英文論文および和文レターとしてとりまとめ公開した。さらに、最終的な目標であるフル・ブライント校正手法の開発に取り組んだ。

昨年度までの検討結果は、既知信号を用いた結果である。その研究過程で校正行列推定が数値的に不安定となる可能性を有していると言うことは、完全なブライント校正（到来方向、校正行列未知）自体に数値計算上の安定性に関する問題が存在し、雑音が存在する実データにおいて数値的に安定な一意な解を求めることの難しさを示唆しているものといえる。数値的不安定性に関する理論的な証明が困難であると判断されたため、シミュレーションを用いて、EM アルゴリズムを用いたフル・ブライント校正手法の収束特性を示し、その問題点を明らかにした。さらに、アレー校正行列を素子のインバランスと素子間相互結合行列の積の形でモデル化したフル・ブライント校正手法を開発した。類似の手法は 1990 年初頭にも提案されているが、そのアルゴリズムでは、等間隔リニアアレーに限定されていたこと、および、電磁界・アンテナ解析的な検討が加えられておらず、想定モデルの妥当性が示されていないことが問題であった。今回の検討では、任意アレーに拡張し、かつ、実際のアンテナアレーの校正では、従来モデルとは逆順の積の形のモデルとすべきであることを明らかにした。

## 4. 調査研究成果の説明

### 得られた成果に対する自己評価

本研究では、アレーアンテナのキャリブレーションに関して、いくつかの手法を開発した。参照信号を用いないフルブラインド・キャリブレーションについては、精度や運用方法について検討すべき今後の課題が残ってしまったが、基本的な問題点は解決し、実用化の目処を立てることができたといえる。この研究を通して明らかにした、マルチパス環境下でのキャリブレーション手法の概念、及び、素子間相互結合と素子インバランスの誤差モデルの2つに関しては、従来研究では検討されていなかった事項が含まれており、学術的にもアレーアンテナ理論・キャリブレーション技術の進歩に貢献したものと考えている。

このアレーキャリブレーション技術は、イメージングレーダや電波伝搬測定（素波解析）などの高精度化、高分解能化に不可欠なものである。アレーアンテナを用いた非接触型の各種測定系・評価系の校正という観点で、テレコムエンジニアリングセンターの各種電波計測技術に活用することが期待できる。

本研究はテレコムエンジニアリングセンターの多大なご支援を頂き、多くの成果を上げることができた。ここに深くお礼申し上げます。最終年度、後半の成果に関しては、より分かり易くとりまとめ、学会、論文として公開する予定である。

### 主な成果リスト

- [1] H. Yamada, H. Sakai, Y. Yamaguchi, "Elevation-Angle-Dependency Calibration in DOA Estimation with Uniform Linear Array," Proc. KJJC on AP/EMC/EMT, Incheon, Korea, May 2009.
- [2] H. Sakai, H. Yamada, Y. Yamaguchi, "Experimental Evaluation of Linear Array Calibration by using 2-D Virtual Array," Proc. ISAP 2009, Bangkok, Thailand, Oct. 2009.
- [3] 酒井, 山田, 山口, "矩形仮想アレーを用いたアレーアンテナの校正精度について", H21 電子情報通信学会信越支部大会, 長野, 2009年9月.
- [4] 山田, 山口, "マルチパス環境下でのアレー校正に関する一考察", 2010年電子情報通信学会総合大会, 仙台, 2010年3月
- [5] H. Yamada, Y. Yamaguchi, "On array calibration in the presence of multipath waves," Proc. Korea-Japan AP Technical Meeting 2010, Seoul, Korea, Apr.23, 2010.
- [6] 山田ほか, "信号部分空間と雑音部分空間の直交性を利用したアレー校正について", 信学技報, vol.AP2010-21, 2010年5月.
- [7] 酒井ほか, "マルチパス環境下でのアレー校正による DOA 推定精度について", 信学技報, vol.AP2010-81, 2010年10月.
- [8] 高橋, 山田, 山口, "任意形状アレーにおける Root-MUSIC 法を用いた DOA 推定のためのアレー校正手法", 信学技報, vol.AP2010-128, 2010年12月.
- [9] 酒井, 山田, 山口, "マルチパス環境下におけるアレー校正精度の評価", 2010年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-236, 2010年9月.
- [10] 酒井, 山田, 山口, "マルチパス参照信号を用いたアレー校正手法の定量的評価", 2010年電子情報通信学会信越支部大会, 4B-2, 2010年10月.
- [11] 高橋, 山田, 山口, "到来方向推定のためのブラインドアレー校正手法の精度向上に関する検討", 2010年電子情報通信学会信越支部大会, 4C-4, 2010年10月.
- [12] H. Yamada, H. Sakai, Y. Yamaguchi, "On Array Calibration Technique for Multipath Reference Waves," IEICE Trans. Communications, Vol.E94-B, no.5, pp.1201-1206, May 2011.
- [13] 高橋, 山田, 山口, "MS-Root-MUSICを用いた DOA 推定のためのアレー校正手法に関する検討", 信学論, Vol.J94-B, No.9, pp.1190-1194, 2011年9月.
- [14] Y. Takahashi, H. Yamada, Y. Yamaguchi, "Array calibration techniques for DOA estimation with arbitrary array using Root-MUSIC algorithm," Proc. IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Application (IMWS-IWPT 2011), Uji, Kyoto, Japan, May 2011.