

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820154

研究課題名(和文) マルチスタティック方式による次世代車載レーダの基盤技術研究

研究課題名(英文) Fundamental research for next-generation automotive radar by multi-static measurements

研究代表者

秋田 学 (Manabu, Akita)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：50619393

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、従来一対のアンテナで送受信を行うモノスタティック方式から二次元速度・位置ベクトルの推定が期待されるマルチスタティック方式へ拡張をする次世代車載レーダの基盤技術研究を行った。マルチスタティック化にむけてまず二台のレーダを用いるバイスタティック方式において、追尾フィルタを組みこんだ目標の二次元速度・位置ベクトル推定法を提案した。独自に開発した新しい変調方式(多周波ステップCPC方式、PC-HPRF方式)を用いて、モノスタティック方式をマルチスタティック方式へ拡張(MIMO化)し、その有効性についてシミュレーションにより検証した。

研究成果の概要(英文)：This research is the basic research for the next-generation automotive radar. In this research, the conventional mono-static radar was developed to multi-static (MIMO) radar as the measurement method. At first, initial simulation and experiments of bi-static radar were conducted before considering multi-static radar. In the first step, mitigation of the ambiguity generated in multilateration by combining a tracking filter was proposed. On the other hand, estimation method for two dimensional velocity and positional vectors are also considered by mono-static multiple frequency step CPC radar. The initial experimental results indicated that the estimation method works for the targets having rigid bodies. Then, I expanded the mono-static radar to the multi-static (MIMO) radar using multiple frequency step CPC and Phase Coded High Pulse Repetition (PC-HPRF) modulations. The effectiveness was also indicated by simulation. The experimental verifications are the future work.

研究分野：計測工学

キーワード：レーダ 変復調方式 マルチスタティックレーダ MIMO

## 1. 研究開始当初の背景

レーダは、耐候性、高データレートといった特長があるため、ITS 産業分野において注目が高まっている。現行の車載レーダでは、比較的低速の信号処理で高距離分解能が得られる FMCW 方式（参考文献[1]）が広く採用されているが、FMCW 方式は目標が多く存在する（静止物を含む）環境下では、データの信頼性が低下する。同方式では、図 1 に示すようにビーム幅を絞ることにより、目標を絞り、不要反射波（クラッタ）の影響を抑えているが、近距離における側方からの飛び出し（横切り目標）を検知が困難であるという新たな課題も発生している。

このような背景から、FMCW 方式に比べて、高信頼性、耐干渉性、広角視野、高距離分解能を有する超広帯域（UWB）レーダと横切り目標の検知（二次元速度、位置ベクトル推定）に有効と考えられるレーダのマルチスタティック化の研究開発が求められている。しかし、UWB レーダは、広帯域であるがゆえに雑音が大きく遠距離性に課題が残る。

そこで、研究代表者らが現在開発中の多周波ステップ CPC 方式と PC-HPRF 方式という新しいレーダ変調方式とのマルチスタティック方式の融合を考える。どちらも、高分解能（UWB）レーダの特長を保持したまま、UWB レーダで課題である遠距離性能を改善させる変調方式である（発表論文[6], [7]）。そこで本研究では、図 2 に示すように、これら新しいレーダ変調方式を用いた単独のレーダシステムによるモノスタティック方式から、マルチスタティック方式（送信と受信が合わせて 3 以上）へとレーダ測定方法を拡張することを考える。本研究では、目標の速度、位置ベクトル推定におけるマルチスタティック方式（バイスタティック方式）の有効性について計算機シミュレーションおよび実験により明らかにする。

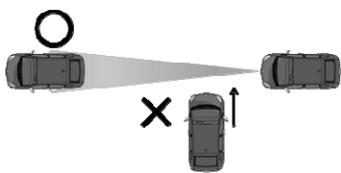


図1 現状の車載レーダ検知範囲イメージ図

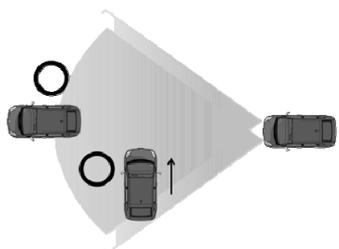


図2 将来期待される車載レーダ検知範囲イメージ図

## 2. 研究の目的

次世代の車載レーダには、市街地等複雑な電波環境での運用が求められる。現行の車載レーダで一般的に採用されている FMCW 方式は、その原理上、多数の目標が存在する環境下においては課題が残る。これまでの研究で車載用マルチスタティック方式への適用が報告されている変調方式は、FMCW 方式等の最も基本的な変調方式の検討のみが行われているのが現状である。

本研究では、研究代表者らの研究グループが現在開発中であり、多目標環境下においても運用が期待でき高い速度・距離分解能を実現する多周波ステップ CPC 方式および PC-HPRF 方式に着目する。一対のアンテナで送受信を行うモノスタティック方式から二次元的な速度、位置ベクトルの推定が期待される（アレーアンテナの場合は角度分解能向上）マルチスタティック（MIMO）方式への拡張をする次世代車載レーダの基盤技術研究を行う。

マルチスタティック化にむけてまず二台のレーダを用いるバイスタティック方式による目標の二次元速度、位置ベクトル推定についてシミュレーションおよび基礎実験を実施する。次に、三台以上から構成されるマルチスタティック（MIMO）方式へ拡張し、マルチスタティック方式に有効なレーダ変調方式およびその有効性について考察する。

また、一方でレーダシステムを構築するという観点から、ハードウェアの規模はモノスタティック方式のまま（コストの低減化）、目標の形状を仮定し、目標の二次元速度・位置ベクトルを推定するアルゴリズムの検討および目標識別技術に関するアルゴリズム開発も合わせて実施する（発表論文[3], [9]）。

## 3. 研究の方法

### 3. 1. 概要

本研究では、マルチスタティック方式へ拡張するにあたり、多数の静止物が存在する複雑な環境で運用することを想定して、FMCW 方式以外の変調方式について計算機シミュレーションにより検討することから始める。検討した変調方式について、任意の変調波を生成することが可能な 24GHz ソフトウェアレーダ装置二台（送受信機 1, 受信機 1）を用いてバイスタティックレーダを構築し、地上に固定設置しての基礎実験をそれぞれ行う（平成 26 年度）。

次に、三台以上のレーダを用いて、多周波ステップ CPC 方式および PC-HPRF 方式をマルチスタティック方式へと拡張するとき、送信波同士が干渉しないよう直交性を保つような送信符号および送信シーケンスを検討する。多数の送信アンテナと受信アンテナを車

のフロントバンパーへ配置し、角度分解能を向上させる方法をシミュレーションにより検討する（平成 27 年度）。

### 3. 2. 研究方法

#### ①平成 26 年度

本研究では、目標の速度、位置ベクトル推定を目的とし、独自の変調方式を用いたレーダのマルチスタティック化を行う。

マルチスタティック化にあたり、まず計算機シミュレーションにより検討した測定方式を実現するために、二台の 24GHz レーダ装置によりバイスタティックレーダを構築（図 3）、地上に固定設置し、周辺に多数の静止物が存在する環境下で、目標の二次元速度、位置ベクトルの推定について基礎実験を実施する（図 4）。基礎実験においては、バイスタティック方式の有効性を議論するため、比較的簡単かつ多周波ステップ CPC 変調方式の基本原理となっている 2 周波 ICW 方式により実験を行う。

ここで、二台のレーダからのデータから目標の二次元速度、位置ベクトルを推定する（マルチラテレーション）ときに生じる目標のアンビギュイティについては、二次元的な速度と角度情報を用いた目標追尾アルゴリズムを組み込むことでアンビギュイティの解消を図るアルゴリズムを開発する。

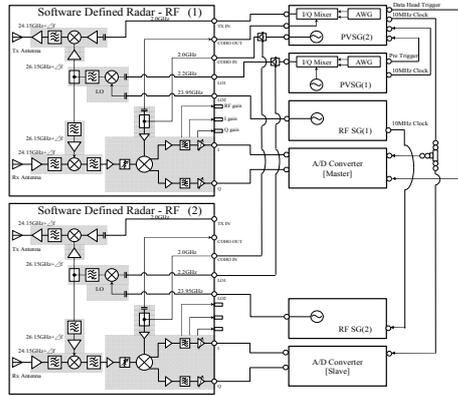


図 3. バイスタティックレーダの構築

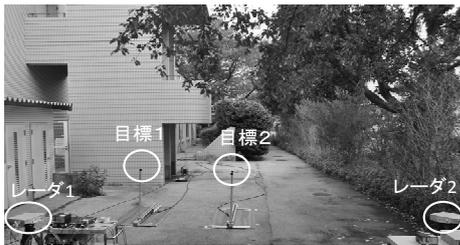


図 4. バイスタティックレーダを用いた目標の速度・位置ベクトル推定実験

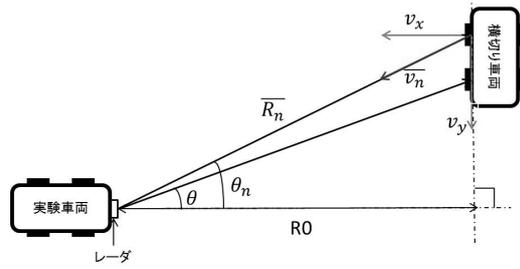


図 5. 多周波ステップ CPC レーダ（モノスタティック）を用いた目標の速度・位置ベクトル推定のための幾何条件



図 6. 多周波ステップ CPC レーダ（モノスタティック）を用いた目標の速度・位置ベクトル推定実験風景

#### ②平成 27 年度

上記のように、目標の二次元的な速度、位置ベクトルの推定するために、従来のモノスタティック方式から複数のレーダを用いるバイスタティック方式へ拡張するアプローチをとる一方で、ハードウェアの規模はモノスタティック方式のまま、目標の形状を仮定（目標はすべて車両である等の条件設定）し、同方式において目標の二次元的な速度ベクトルを推定する方法を検討し、シミュレーションおよびモノスタティック方式の多周波ステップ CPC レーダを用いた実験より原理検証を実施する。二台のレーダを用いた方式の基礎実験で使用した送受信アンテナ数を大幅に増やし、三台以上のレーダで構成される図 5 に示すマルチスタティック（MIMO）方式（アレーアンテナとすることで、開口長を広げ、高い角度分解能が期待される）に拡張する方法の検討を行う。ここで、各送信アンテナからの信号同士の干渉を抑えるため、送信アンテナから信号を時分割に送受信を繰り返す方法（ひとつの送信アンテナから信号が送信されると検知距離に相当する時間他のすべての送信アンテナは送信を休止）が一般的に考えられるが、単位時間あたりに送信できる信号電力が低下する（S/N の低下）。そこで、各送信アンテナから連続的に信号を送信しても受信信号が干渉しないように、直交性を保つような送信符号および送信シーケンスおよび受信系の復調信号処理とあわせて検討する。

## 4. 研究成果

### 4. 1. バイスタティックレーダによる二次元速度位置ベクトル推定

複数のレーダを用いて側方から侵入する目標の位置  $(x, y)$  を特定する方法は、アンテナ間距離を小さくとり、受信信号の位相差から到来方向を求める方法と、アンテナ間距離を比較的長くとり、到達時間差から  $(x, y)$  の位置を求める方法（受信機が3基以上の場合はマルチラレーション法）が一般的に考えられる。マルチスタティック方式へ拡張するにあたり、まずレーダ装置二台（送受信機1, 受信機1）を用いたバイスタティックレーダによる二次元速度ベクトルと位置ベクトルをマルチラレーションにより推定する方法を検討した。マルチラレーションとは複数のレーダセンサから得られる目標とレーダセンサ間の距離和と速度和を用いて、直角座標系における目標の位置ベクトル、速度ベクトルを算出するものであるが、多目標時には2次元推定点の候補が複数点現れるアンビギュイティが課題である。そこで、マルチラレーションと追尾フィルタを組み合わせたアンビギュイティ解消法を提案し、シミュレーションにより有効性を示した。

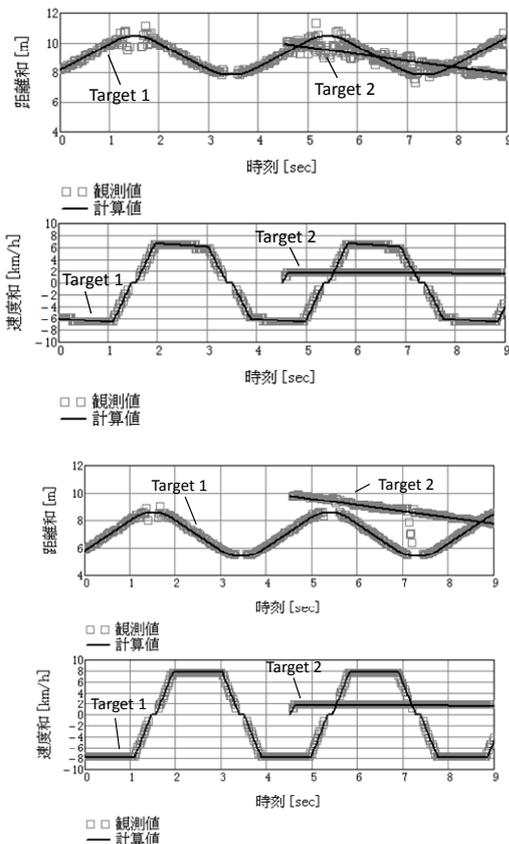


図7. 各レーダ（上レーダ1, 下レーダ2）で得られる距離および速度和

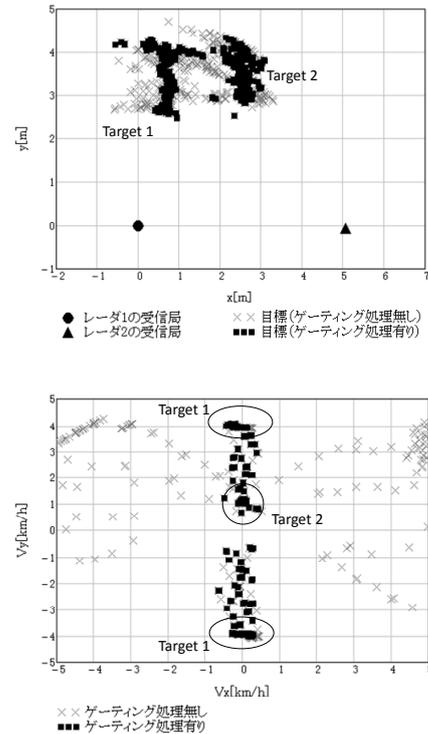


図8. バイスタティックレーダを用いた目標の速度・位置ベクトル推定結果

また、バイスタティックレーダシステムを構築し、2周波ICW方式を送信波とした基礎実験にて、マルチラレーション時のアンビギュイティ問題をゲーティング処理にて対処することで、従来のレーダ装置に受信局をただ1つ追加するだけで位置ベクトルと速度ベクトルが可能であることを実験的に示した（発表論文[6]）。

### 4. 2. 多周波ステップ CPC レーダを用いた横方向速度推定

従来のモノスタティック方式から複数のレーダを用いるバイスタティック方式へ拡張するアプローチをとる一方で、目標に対し高い分解能で各反射点の距離と速度の計測が可能である多周波ステップCPC(Complimentary Phase Code)ミリ波レーダの出力を用い、目標の形状を仮定した目標の二次元速度ベクトル推定法を提案し、原理検証実験により有効性が示された（発表論文[3], [5]）。

### 4. 3. 多周波ステップ CPC 方式およびPC-HPRF方式のマルチスタティック化の検討

4. 1に示すように、研究期間前半は、アンテナ間距離を比較的長くとするマルチラレーション法の検討を行った。

後半は、マルチスタティック化に用いるレーダの数を大幅に増やし、複数の送信アンテナとアレーアンテナ配置した受信アンテナによる大開口に電波による高い角度分解能（1度程度）の実現性について検討した。研究背景で述べた通り、変調方式には独自の多周波ステップCPC方式を用いることで、高い角度分解能と高い距離速度分解能を両立させる。

送信シーケンスとしてまずPC-HPRF方式の適用を考え、目標距離・速度・角度を一連の処理にて推定する信号処理法の提案を行い、計算機シミュレーションにて提案法の有効性を検証した（参考文献2）。同様に、多周波ステップCPCレーダのMIMO化についてアンテナ配置および送信シーケンスを検討した。ここで、アンテナ間の直交性を保つために異なる組同士の相互相関の和がすべて0、自己相関の和が $\tau=0$ でのみ1、その他すべて0である完全相補符号（Complete Complementary Code）を用いた。多周波ステップCPC方式のMIMO化に伴う完全相補符号系列の増加は、速度視野の低下につながる。この多周波ステップCPC方式の速度視野の回復が課題となるが、多周波ステップCPC方式の送信周波数の順序をランダムとすることで、速度視野の低下を緩和させる手法を合わせて示し、シミュレーションにより有効性を確認した（研究論文[1]）。

## まとめ

本研究では、一対のアンテナで送受信を行うモノスタティック方式から二次元的な速度、位置ベクトルの推定が期待されるマルチスタティック（MIMO）方式へ拡張をする次世代車載レーダの基盤技術研究を行った。

マルチスタティック化にむけてまず二台のレーダを用いるバイスタティック方式によるシミュレーションおよび基礎実験を実施した。マルチラテレーションと追尾フィルタを組み合わせたマルチラテレーションにおけるアンビギュイティ解消法を提案し、シミュレーションにより有効性を示した。また、モノスタティック方式のまま、目標の形状を仮定し、同方式において目標の二次元的な速度ベクトルを推定するアルゴリズムを開発し、基礎実験により有効性を確認した。

次に、PC-HPRF方式および多周波ステップCPC方式を変調方式として用い、三台以上から構成されるマルチスタティック（MIMO）方式へ拡張し、その有効性についてシミュレーションにより検証した。

多周波ステップCPC方式およびPC-HPRF方式を用いたマルチスタティックレーダの有効性についての実験的検証が今後の課題である。

## 参考文献

- [1] M.I. Skolnik, Introduction to Radar

System, McGraw-Hill, New York, 1962.

- [2] 山下遼, 秋田学, 稲葉敬之, "車載マルチスタティックレーダにおける送信シーケンスおよび信号処理法に関する一検討", 信学技報 SANE2013-115, 2014-01

## 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）

- [1] 秋田学, 渡辺優人, 稲葉敬之, 完全相補符号を用いた MIMO 多周波ステップCPCレーダの検討, 2016年電子情報通信学会総合大会, B-2-37, 2016-03.
- [2] 渡辺優人, 秋田学, 中村真帆, 稲葉敬之, 多周波ステップCPCレーダを用いた目標車両位置・速度ベクトル推定法の検討, 2016年電子情報通信学会総合大会, B-2-36, 2016-03.
- [3] 中村真帆, 秋田学, 渡辺優人, 稲葉敬之, 2周波CWレーダを用いた人物等認識における各種アルゴリズムの適用評価, 2016年電子情報通信学会総合大会, B-2-35, 2016-03.
- [4] 秋田学, 梅村昇平, 渡辺優人, 稲葉敬之, 超分解能法を用いた多周波ステップCPC方式における近接角度分離法, 2015年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-2-25, 2015
- [5] 早貸舜, 秋田学, 稲葉敬之, "多周波ステップCPCミリ波レーダを用いた横切り車両の横方向速度推定", B-2-10, 2015年電子情報通信学会総合大会, 2015-03.
- [6] 日原健人, 秋田学, 小菅義夫, 稲葉敬之, "2周波ICWを送信波としたバイスタティックレーダによる測位・測速", 信学技報 SANE2014-112, 2015-1.
- [7] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, "多周波ステップCPCレーダの提案と原理検証実験", 電気学会論文誌C, Vol. 135 (2015) No. 3, pp.285-291, 2015
- [8] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, "UWBインパルスレーダにおけるパルス間符号変調による遠距離性の改善", 電子情報通信学会論文誌B, Vol. J97-B, No. 7, pp.556-564, 2014
- [9] 秋田学, 深町弘毅, 渡辺優人, 稲葉敬之, "2周波CWレーダを用いた歩行人物の特徴量抽出", 電子情報通信学会論文誌B, Vol. J97-B, No. 8, pp.677-687, 2014

〔雑誌論文〕（計 3 件）

〔学会発表〕（計 5 件）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

秋田学 (Manabu Akita)

電気通信大学大学院情報理工学研究科  
助教

研究者番号：50619393