

# 超広帯域コヒーレントレーダ技術の研究開発 (175003002)

## Research and Development of Ultra-Wideband Coherent Radar

### 研究代表者

稲葉敬之 電気通信大学  
Takayuki Inaba The University of Electro-Communications

### 研究分担者

秋田学 芝隆司 渡辺一宏 木村徳典 電気通信大学  
Manabu Akita Takashi Shiba Kazuhiro Watanabe Tokunori Kimura  
The University of Electro-Communications

研究期間 平成 29 年度～平成 30 年度

### 概要

本研究開発では、1 m～数十mの遠距離の物体に対して距離分解能 7.5cm (高距離分解能化と高検知距離性能の両立) を達成する 79GHz 帯レーダ技術を確認するとともに、複数のレーダを同一周波数帯・同一時間に共存させる多システム同時運用基盤技術および別レーダの信号をコヒーレントに合成することで、高分解能化やマルチパスフェージング対処のための周波数利用改善の基盤技術を確認した。

### 1. まえがき

歩行者・高齢者事故等の低減による道路交通の安全・安心確保、および省エネ・低炭素社会実現のための自動運転の実現等は社会的課題として広く認識されている。衝突回避システムや自動運転システムの実現については、政府方針においても、2020 年までの数値目標や実用化目標が策定され、政策的課題として位置づけられており、レーダセンサにおいては今後、衝突回避レーダ、道路交通監視インフラレーダ、自動運転車載レーダなどのシステム開発が求められている。また、周波数資源を用いるレーダセンサにおいて、周波数の有効な利用技術開発は、優先的に実施すべき技術開発であるとされている。

自動運転システムの実現など政策的課題解決のために、車載レーダ向けミリ波帯の超広帯域化の法整備(79GHz/76GHz 帯の 4GHz/1GHz への拡大、140GHz 帯(10GHz 幅)の準備)が推進されている。しかし、レーダにおいて広帯域化により高分解能を求める代償として、受信機雑音の上昇に起因して探知距離の大きな劣化が避けられないという深刻な問題に対処することが必要である。そこで、研究代表者らはこの重要問題解決のアプローチとして合成帯域法と相補符号パルス圧縮法を融合した多周波数ステップ CPC 方式を提案し 76GHz 帯等における 500MHz 帯域幅での原理検証実験に成功してきた(電波資源拡大のための研究開発「狭帯域・遠近両用高分解能小型レーダ技術の研究開発」(平成 26 年度～平成 28 年度))。本技術の超広帯域への拡張にともない、速度視野低下問題、レンジウォーク・ドップラウォーク問題、目標反射率の目標間周波数特性問題等の技術的諸問題を抱えることとなる。このため探知距離劣化を抑制し、かつ超広帯域を有効活用した高信頼性レーダ方式の技術開発が必要となる。以上の背景より本研究開発では「課題(ア)広帯域レーダ変復調技術の研究開発」、「(イ)超広帯域レーダ技術の研究開発」、「(ウ)離隔周波数帯域合成レーダ基盤技術の研究開発」に取組み「超広帯域コヒーレントレーダ技術」を確認した。

### 2. 研究内容及び成果

#### 2. 1. (ア) 広帯域レーダ変復調技術の研究開発

課題(ア)では、60GHz 帯および 76GHz 帯(帯域幅 500MHz) で開発した基盤技術である多周波数ステップ CPC 方式を 79GHz 帯に適用するため、基礎実験を行い同周波数帯における高検知能力(高分解能、高信頼性、遠距離性)、多目標同時計測等の技術的要求事項を満足させるレーダ変復調方式の技術を確認した。また、周波数の共同利用を可能するために、複数のレーダを同一周波数帯・同一時間に共存させる多システム同時運用基盤技術を確認した。

立する(誌上発表リスト[1])。

#### 送信帯域幅 500MHz にて距離分解能 15cm (送信帯域幅と比較して 1/2 の距離分解能) の実験的検証

研究代表者らは、H29 年度に 79GHz 帯に適合した多周波数ステップ CPC 方式および信号処理アルゴリズムを開発した[1](誌上発表リスト[2])。H30 年度には H29 年度に開発した信号処理アルゴリズムについてシミュレーションにより評価した。また、上記アルゴリズムにより送信帯域幅 500MHz にて距離分解能 15cm の実験的検証を実施した。その結果、図 1 に示すように、送信帯域幅 430MHz にて距離分解能 17cm (送信帯域幅と比較して 1/2 の距離分解能) の実験的に確認された[2]。また、この再帰的信号減算周波数推定法を前処理として近接目標の角度分離を簡素なモノパルス測角で可能とする信号処理構成を提案した。本手法の有効性についてシミュレーションにより定量的に評価した[2](誌上発表リスト[3])。

#### 2. 2. (イ) 超広帯域レーダ技術の研究開発

課題(イ)では、多周波数ステップ CPC 方式を 79GHz 帯の超広帯域に拡張するために、速度視野低下問題等の技術的諸問題を解決する信号処理技術の研究開発を行う。また、超広帯域内での周波数有効活用技術の研究開発する。

#### 超広帯域多周波数ステップ CPC 方式のシミュレーションによる評価

多周波数ステップ CPC 方式の超広帯域化に伴う速度・距離視野の低下に対し、観測時間を変更せず速度視野を、周波数ステップのランダム化により緩和し、周波数ステップ間隔のスパース化により距離視野を回復する。スパース化に伴うサイドローブ電力に対して、課題(ア)で研究開発した再帰的信号減算周波数推定法に基づく自動検知により対処する図 2 に示す信号処理構成(超広帯域多周波数ステップ CPC 方式)を提案(申請特許リスト[3])し、4GHz に相当する距離分解能が速度視野と距離視野を確保しつつ得られることをシミュレーションにより評価した[3]。

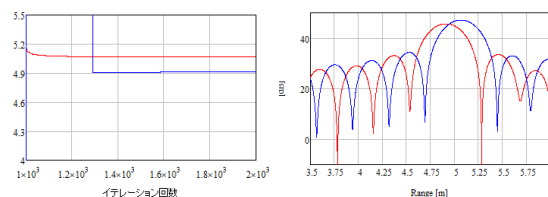


図 1 送信帯域幅 430MHz にて距離分解能 17cm (送信帯域幅と比較して 1/2 の距離分解能) の実験的検証結果

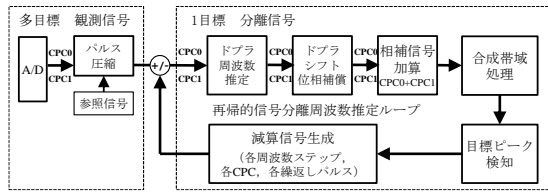


図 2. 再帰的信号減算周波数推定法に基づく超広帯域多周波ステップ CPC 方式の信号処理ブロック図

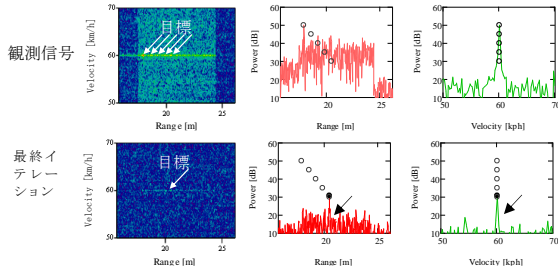


図 3. 超広帯域多周波ステップ CPC 方式による電力差を有する複数目標の検知

**超広帯域多周波ステップ CPC 方式による距離分解能 7.5cm 以下の達成の総合的評価**

図 3 に、超広帯域多周波ステップ CPC 方式 (周波数ステップ幅  $\Delta f = 13.4\text{MHz}$ 、 $3.43\text{GHz}$  の帯域幅) による 5 目標の目標条件における距離-速度の電力プロファイルを示す。図 3 の距離プロファイルにより 3dB 電力幅が約  $0.034\text{m}$  となり、 $3.43\text{GHz}$  帯域幅の分解能 ( $0.037\text{m}$ ) が得られていることが確認できる。以上より、多周波ステップ CPC 方式の超広帯域化に伴う速度視野・距離視野の低下に対して、周波数ステップのランダム化することにより対処し、周波数ステップ間隔のスパース化に伴うアンビギュエティの電力に対して再帰的信号減算周波数推定法に基づく信号処理構成とする超広帯域多周波ステップ CPC 方式により、電力差のある複数目標の分離および距離分解能 7.5cm 以下の達成が確認された [3][4]。

**2. 3. (ウ) 離隔周波数帯域合成レーダ基盤技術の研究開発**

課題 (ウ) では、超広帯域コヒーレント信号処理技術を  $79\text{GHz}$  帯から隣接する  $76\text{GHz}$  帯、さらに  $60\text{GHz}$  の離隔した周波数帯に拡張し、これらの別レーダの信号をコヒーレントに合成することで、高分解能およびマルチパスフェージング対処のための基盤技術を確立する。

**離隔周波数コヒーレント合成高分解能化アルゴリズムの開発とシミュレーション評価**

本研究開発では、図 4 に示すようなコヒーレンスが確保される比較的狭い帯域幅を離隔した周波数に複数配

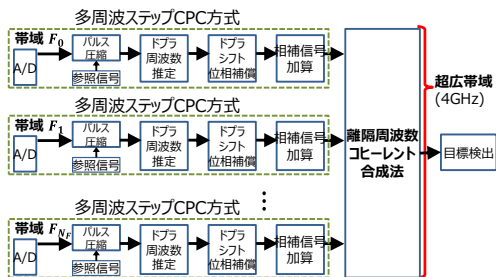


図 4. 離隔周波数コヒーレント合成法信号処理ブロック図

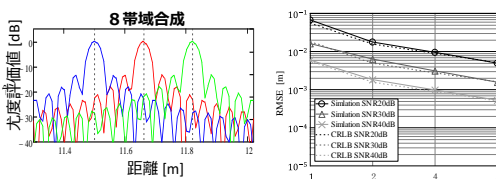


図 5. 離隔周波数コヒーレント合成高分解能化アルゴリズムのシミュレーション評価

置し、互いにコヒーレンスが保証されていない各帯域信号をコヒーレントに合成する「離隔周波数コヒーレント合成法」を開発した。本合成法は、「再帰的信号減算周波数推定法」を基本にして、複数の離隔帯域信号をコヒーレント合成するための複素振幅推定処理を加え、目標間干渉誤差を回避しつつ複数帯域を使った高い距離推定精度を実現する。多周波ステップ CPC 信号を用いた離隔した複数の周波数帯域の観測信号を使用し、計算機シミュレーションによる統計評価を行った結果、図 5 に示すように複数帯域をコヒーレント合成することで目標距離推定精度を向上できることを確認し、目標推定距離の RMSE が理論限界 CRLB にほぼ一致することを示した [5] (出願特許 [1][2])。

**3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取組み**

本研究開発では、今後さらなる広帯域化の動向に対処するために、個別の離隔した周波数帯域で動作する個別レーダの計測ノンコヒーレント信号をコヒーレント合成し超広帯域に相当する高分解能得る「離隔周波数合成法」や観測時間を長くすることなく (すなわち周波数ステップ数を増やさず) 距離や速度の視野を確保可能な「超広帯域多周波ステップ方式」に関する基盤技術を開発し 3 件の特許出願を果たすと同時に、実験的にもその有効性が期待されることを示した。今後さらなる周波数の有効利用のため、周波数ステップを単にランダムステップとするのではなくスパースで不等間隔なステップ間隔を各種用途に応じて設計する技術を研究開発 (「スパース周波数分割レーダの研究開発」(電波有効利用促進型研究開発 (先進的電波有効利用型フェーズ II)) する。この設計法により、周波数ステップ数のさらなる削減とともに、距離分解能の劣化なく複数レーダを同一帯域に共存させる周波数多重化や、マルチパス・干渉等環境下における周波数ステップの適応化基盤技術の構築を目指す。

**参考文献**

- [1] 山口, 渡辺, 秋田, 稲葉, "再帰的信号減算周波数推定法の基本特性の評価と多周波ステップ CPC への適用の検討", 信学技報 SANE2018-48, vol. 118, no. 239, pp. 23-28, 2018
- [2] 秋田, 山口, 稲葉, 再帰的信号減算周波数推定法を前処理とした多周波ステップレーダにおける近接角度分離法, 信学技報 WBS2019-8, vol. 119, no. 26, pp. 41-45, 2019
- [3] 稲葉, 渡辺, 秋田, 超広帯域多周波ステップレーダにおける再帰的信号減算周波数推定法を用いた自動検知法, 信学技報 SANE2018-46, vol. 118, no. 441, pp. 25-30, 2019
- [4] 太田, 秋田, 渡辺, 稲葉, 広帯域多周波ステップ CPC レーダの実験的検証と速度視野改善, 信学技報, vol. 117, no. 107, SANE2017-14, pp. 7-11, 2017
- [5] 渡辺, 秋田, 稲葉, 離隔周波数帯受信信号を用いた広帯域コヒーレント合成による目標推定距離精度の評価, 信学技報 SANE2018-49, vol. 118, no. 239, pp. 29-34, 2018

**【誌上发表リスト】**

- [1] 芝, 秋田, 稲葉, 周期相関符号を用いた多重化位相符号変調法における自己・相互相関特性の改善法, 信学論(B), Vol.J102-B, No.4, pp.328-341, 2019/04
- [2] 渡辺, 秋田, 稲葉, ELD-STAP と多周波ステップ CPC 方式による車載前方監視レーダにおけるクラッタ抑圧, 信学論(B), Vol.J101-B, No.12, pp.1093-1106, 2018/12
- [3] M. Akita, and T. Inaba, Angle Estimation using Super Resolution and Blocking Matrix in Stepped Multiple Frequency CPC Radar, 2018 IEEE Radar Conference, Oklahoma City, USA, April, 2018

**【申請特許リスト】**

- [1] 稲葉, 秋田, 渡辺, 特願 2017-024199, 離隔周波数合成レーダ装置、距離推定方法及びプログラム, 2017/02/13
- [2] 稲葉, 秋田, 渡辺, 特願 2018-022503, 離隔周波数合成レーダ装置、距離推定方法及びプログラム, 2018/02/09
- [3] 稲葉, 渡辺, 秋田, 特願 2019-018500, 目標検知装置、目標推定方法及びプログラム, 2019/02/05