

前方監視のための多周波ステップ CPC- SIMO ドップライメージング法の基礎検討

谷口 匠[†] 稲葉 敬之[†] 渡辺 一宏[†] 秋田 学[†]

[†] 電気通信大学 知能機械工学科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: taniguchi.takumi@inabalab.ee.ucc.ac.jp

あらまし

筆者らは、遠距離性と高距離分解能を両立する独自の変復調方式である多周波ステップ CPC 方式を用いたレーダ計測により得られる目標の距離・速度から目標位置の画像化を行うドップライメージングの研究を行っている。ドップライメージングにおいて前方監視を目的とした際に目標位置の左右判別がつかないこと、正面の分解能が劣化するという問題が生じる。本稿では、ドップライメージングと SIMO アレーアンテナによるビームフォーミングを併用し画像領域によって処理を変える多周波ステップ CPC-SIMO ドップライメージング法の基礎検討を行う。シミュレーションにより、従来のドップライメージングと提案法の比較を行い問題の改善が確認された。

キーワード レーダ, 多周波ステップ CPC 方式, ドップライメージング, 前方監視

A Fundamental Study on Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code-SIMO Doppler Imaging for Forward Looking

Takumi TANIGUCHI, Takayuki INABA, Kazuhiro WATANABE, and Manabu AKITA

Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications

1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: taniguchi.takumi@inabalab.ee.ucc.ac.jp

Abstract

Authors are conducting research about Doppler Imaging which performs imaging of target position from target range and velocity which are obtained from radar measurement using Stepped Multiple Frequency CPC method which is a proprietary modulation/demodulation method that can realize high range-resolution and long range detection. When Doppler Imaging is used for forward looking, the problems that right and left ambiguity and deterioration of resolution occur. In this paper, we do fundamental study on Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code - SIMO Doppler Imaging which uses Doppler Imaging and beam forming with SIMO-array antenna in combination and changes processing according to the image area will be conducted. From simulation, comparing the conventional Doppler Imaging with the proposed method, we confirmed the improvement of the problems.

Keywords Rader, Stepped Multiple Frequency CPC, Doppler Imaging, Forward-looking

1. まえがき

レーダを用いたイメージングとして、合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar, SAR) が広く研究、運用されている。これはレーダを移動させながら信号の送受信を行うことで仮想的に大きな開口長のアンテナを用いた計測と等価な高分解能出力を得る技術で、航空機や人工衛星等に搭載され、側方監視画像生成のため用いられている。

当研究室では画像レーダとして、多周波ステップ CPC 方式を用いたドップライメージングが研究されて

いる。多周波ステップ CPC 方式は当研究室が提案しているレーダ変復調方式であり、高距離分解能と遠距離性という、相反する 2 つの性能の両立を実現するもので、実験的にその有効性が示されている [1]。多周波ステップ CPC を用いたドップライメージングでは、DBS(Doppler Beam Sharpening)[2]を用いて前側方の静止物に対する距離と速度の二次元画像を生成する。目標角度と計測される速度は対応関係にあり、高い角度分解能を得るためには高い速度分解能が求められる。高い速度分解能は観測時間を長くすることで実現が可

能である。観測時間を長くすることによりレンジウォーク・ドップラウォークが生じてしまうが、それらを補償する手法が提案されており、同補償による距離と速度の2次元画像（RV マップ画像）の精度向上を確認し、実験データに対する有効性も示されている[3][4].

しかし、ドップライメージングを前方監視に適用する際に2つの問題が生じることが知られている[5][6]. 一つは目標角度の正負判別不可能という問題である。レーダに対して計測されるドップラ周波数は自速の目標視線方向成分となり左右対称であるために、目標位置の角度の正負判別がつかない。もう一つの問題は正面方向に対する分解能の劣化である。これは、正面方向の目標に対して計測されるドップラ周波数の変化が小さいため発生する。

本稿では、前方監視における角度の正負判別不可能と正面方向の分解能劣化という問題に対する改善策の一案として2台のSIMOアレーアンテナを用い、ビームフォーミングとドップライメージングを併用する「多周波ステップCPC-SIMOドップライメージング法」の基礎検討を行う。角度の正負判別不可能という問題点に対しては、ビームフォーミングを角度ゲートとして用いることで角度アンビギュイティを抑圧し、左右の判別を可能とする。また、正面の分解能の低下に対してはドップライメージングのDBS処理を角度ゲートとして角度視野領域を配慮したSIMO(Single-Input and Multi-Output)アレーアンテナによるビームフォーミングを行うことで分解能の向上を図る。

計算機シミュレーションを通して単独レーダによるドップライメージングと本構成によるドップライメージング結果に対して正面分解能と目標角度の判別という点から比較を行う。

2章では多周波ステップCPC方式におけるドップライメージングについて述べ、3章には本稿で検討する「多周波ステップCPC-SIMOドップライメージング法」について述べる。4章では計算機シミュレーション結果を示し、5章で結論を述べる。

2. 多周波ステップCPC方式におけるドップライメージング

2.1. ドップライメージングの概要

静止目標に対して、レーダ自速が既知とした場合、計測される速度と目標角度の関係は図 2.1 および以下の式で表される。

$$v = V_0 \cos\theta \quad (2.1)$$

ここで v は計測される速度、 V_0 はレーダ自速、 θ は目標角度である。ドップライメージングではレーダ計測で

得られる距離と速度の二次元画像である RV マップから、式(2.1)の関係を用いて目標位置の画像を生成する。

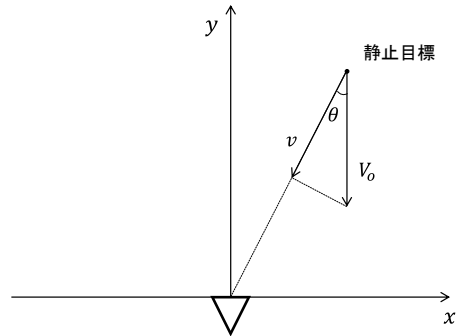


図 2.1 静止目標の角度と計測速度の関係

2.2. ドップライメージングの処理

多周波ステップCPC方式は時分割で送信周波数を切り替え、受信信号に対して周波数方向のサブバンド信号をコヒーレント合成する合成帯域処理を行うことで狭受信帯域かつ高距離分解能となる変復調方式である。ドップライメージングにおいて高精度な画像生成のため、高い速度分解能が必要となる。速度分解能に対応する観測時間を長くすることにより生じる目標の距離ビン移動であるレンジウォーク、速度ビン移動であるドップラウォークの補償を組み込んだ、多周波ステップCPC方式におけるドップライメージングの処理ブロック図を図 2.2 に示す。

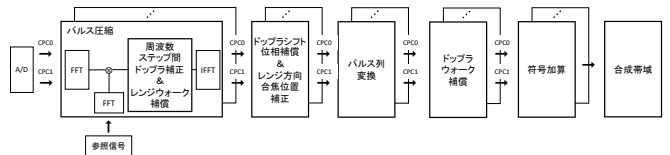


図 2.2 多周波ステップCPC方式におけるドップライメージングの処理ブロック図

ドップライメージングをレーダ前方の監視を目的とした場合、2つの問題が発生する。一つは目標位置の角度アンビギュイティの発生である。計測速度がレーダ自速の射影となることから式(2.1)において目標角度 θ の正負に関わらず計測速度 v が同じ値となり、目標位置の左右判別ができない。また、2つめの問題は正面の分解能劣化である。式(2.1)において目標角度 θ が0付近では計測速度 v の変化量が小さいため、正面付近の速度分解能に対して角度分解能が大きくなってしまい画像における目標位置の精度が劣化する。本稿では、この2つの問題を解決する方法を提案する。

3. 多周波ステップ CPC-SIMO ドップライメージング法

3.1. ドップライメージング法の概要

前方監視における2つの問題に対して、本稿で提案する多周波ステップ CPC-SIMO ドップライメージング法では側方領域用と正面領域用の2種類の間隔で素子配置された SIMO アレーアンテナの多周波ステップ CPC レーダを2台使い、イメージング領域によって使用するアンテナ素子及びレーダを切り替えることで改善を図る。

(ア) 側方領域

側方の領域におけるドップライメージングでは目標位置による計測速度の変化量が大きいためにより高分解能な画像が得られるが、図 3.1 に示すように角度アンビギュイティが生じ、目標位置の左右判別がつかない。この問題に対し提案法では側方領域用のアンビギュイティが発生しない半波長の素子間隔のアレーアンテナによるビームフォーミングを角度ゲートとして用いることを考える。高分解能なドップライメージング出力に対し角度アンビギュイティを抑圧することで左右判別が可能となる。また、ビームフォーミングの角度ゲートとしての効果を高めるために窓関数を用いる。

(イ) 正面領域

正面の領域におけるドップライメージングの分解能劣化という問題に対して、正面方向において分解能の劣化がないビームフォーミングを用いる。ここで、高い角度分解能を得るには大きな開口長が必要となり、アンテナ素子数の増加が問題となる。そこで、図 3.2 に示すようにドップライメージング出力を正面に対する角度ゲートとして用いることで、ゲート内でグレーティングローブが発生しないように角度視野領域を配慮し大きな素子間隔とすることができる。これにより少ない素子数で大きな開口長を実現でき正面の高分解能なイメージングが可能となる。

さらに、正面方向の分解能改善に関して、2つのレーダを中心から左右対称に離れた位置に設置し、より角度のつく方のレーダの計測結果を使用した画像化を行うよう、イメージング領域に応じて切り替えることで画像化する領域がレーダ正面となることを回避し、ドップライメージング出力の分解能劣化を避ける。これにより近距離の正面領域の高分解能化が期待される。

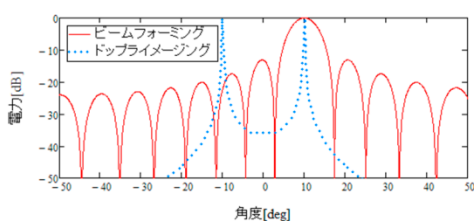


図 3.1 側方目標に対する信号処理利得

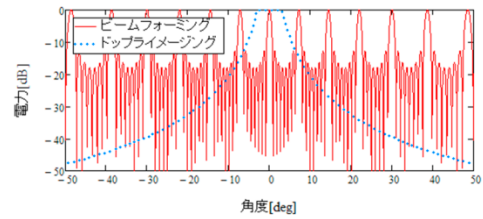


図 3.2 正面前目標に対する信号処理利得

3.2. ドップライメージング法の処理

提案法で用いるアレーアンテナは図 3.3 のように送信アンテナ素子1つに対し、角度アンビギュイティ抑圧用の半波長間隔と正面処理のための疎間隔の2通りの素子間隔で受信アンテナ素子を配置する。

提案法の処理では図 3.4 に示す多周波ステップ CPC 方式の処理としてレンジウォーク補償を含め合成帯域処理までを行う。次に、合成帯域処理後信号に対して図 3.5 に示すように領域ごとに正面と側方で二通りの処理を行う。側方領域のための処理は、半波長間隔の受信アンテナ素子を用いて窓関数を用いたビームフォーミングによる角度ゲート処理を行った後に、ドップラウォーク補償を伴うドップラ周波数推定を行う。正面領域のための処理は、疎間隔の受信アンテナ素子を用いてドップラウォーク補償を伴うドップラ周波数推定を行い正面の角度ゲート処理を行った後に、ビームフォーミングを行う。ビームフォーミング処理に関して、生成される画像の各直交座標 x, y ビンに対して角度が一意に決まるため以下の式を掛けることで行う。

$$\omega(x, y, ch) = \exp\left(-j2\pi \frac{d}{\lambda} \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} ch\right) \quad (3.1)$$

ここで λ は波長、 d は各素子間隔、 ch は素子番号とする。

左右の各レーダからドップライメージングの出力が劣化する角度を境に正面領域と側方領域をわけ、図 3.6 に示すように側方領域はドップライメージングの側方の高分解能という特性を生かすため角度のつく遠い方のレーダによる側方領域用処理のイメージング出力を用い、左右両レーダの正面となる領域に対しては正面領域用処理のイメージング出力をノンコヒーレント合成したものを用いる。

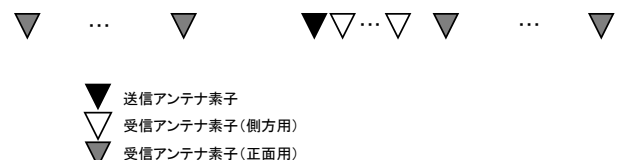


図 3.3 多周波ステップ CPC-SIMO ドップライメージングにおけるアンテナ素子配置

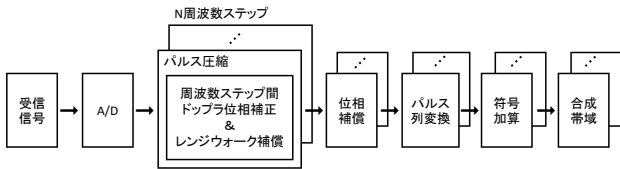


図 3.4 合成帯域までの信号処理ブロック図

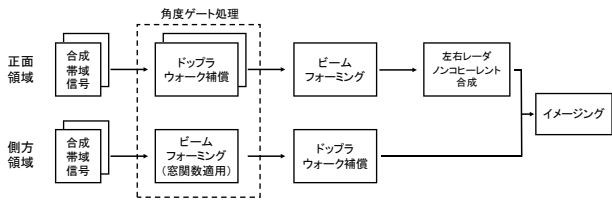


図 3.5 合成帯域後の処理ブロック図

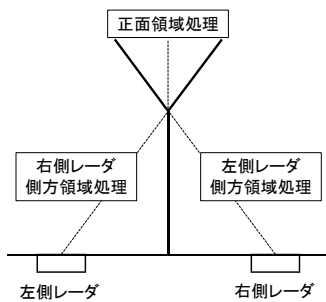


図 3.6 領域による処理切り替え

4. 計算機シミュレーション

4.1. シミュレーション条件

提案法による正面分解能劣化と左右判別不可能という前方監視の問題に対する改善を確認するために従来のドップライメージングと提案法でのドップライメージングの比較を行う。

使用するレーダパラメータは表 4.1 に、アレーアンテナパラメータを表 4.2 に、単一の点目標の座標パラメータを表 4.3 に示す。また、レーダの配置関係は図 4.1 に示すとおりとする。

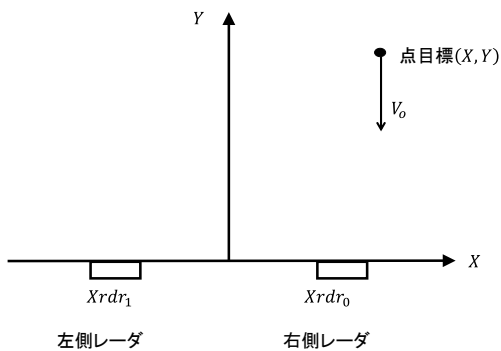


図 4.1 レーダ配置図

表 4.1 レーダパラメータ

送信周波数	60.5GHz
波長(λ)	0.005m
送信帯域幅	430MHz
周波数ステップ幅	50MHz
周波数ステップ数	8
パルス数	4096
全計測時間(1SPI)	228.8ms (8CPI)
レーダ X 座標 (X_{rdr})	0.7m
レーダ自速 (V_0)	50km/h

表 4.2 アレーアンテナパラメータ

送信素子	1
受信素子 (側方用)	16
素子間隔 (側方用)	0.002m (0.5 λ)
受信素子 (正面用)	8
素子間隔 (正面用)	0.04m (8 λ)

表 4.3 目標パラメータ

点目標 X 座標 [m]	点目標 Y 座標 [m]
2	10
0	10,20,30,40,50

4.2. シミュレーション結果

従来のドップライメージングと提案法それぞれの出力結果が以下となる。ここで以下に示す各パラメータに対する結果について、左側は出力画像となっており縦軸は Y 座標 [m] を、横軸は X 座標 [m] を表す。右側は目標 Y 座標で切り出した X 座標プロファイルとなっており縦軸はピークに対する電力 [dB] を、横軸は X 座標 [m] を表すものとする。

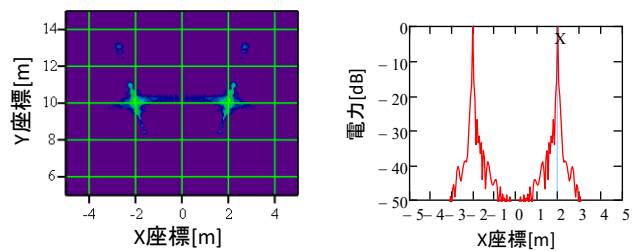


図 4.2 従来法 (点目標座標 X: 2m Y: 10m)

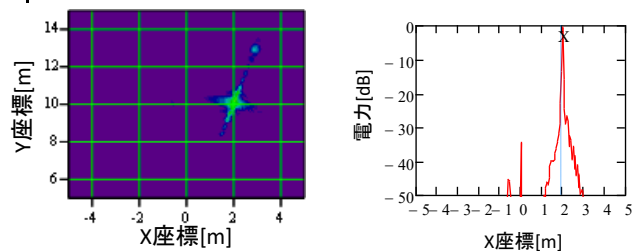


図 4.3 提案法 (点目標座標 X: 2m Y: 10m)

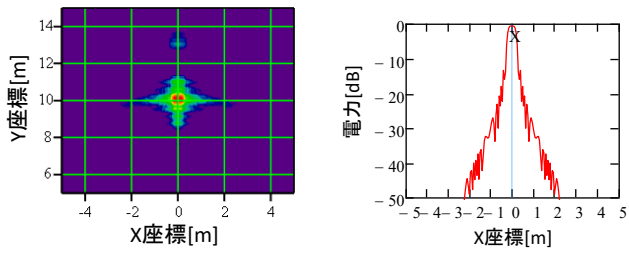


図 4.4 従来法 (点目標座標 X:0m Y:10m)

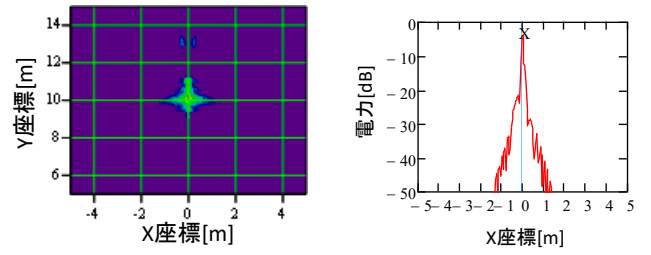


図 4.9 提案法 (点目標座標 X:0m Y:10m)

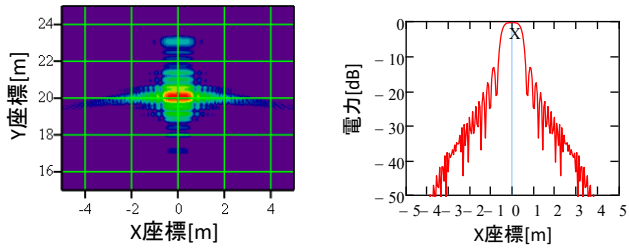


図 4.5 従来法 (点目標座標 X:0m Y:20m)

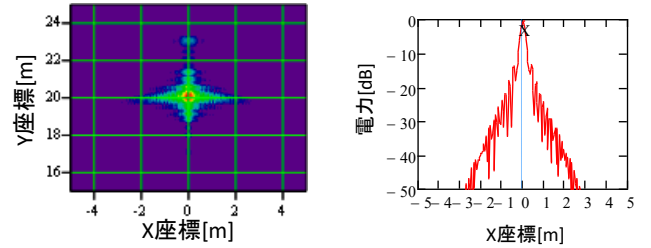


図 4.10 提案法 (点目標座標 X:0m Y:20m)

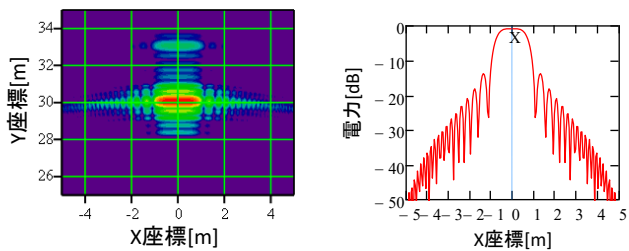


図 4.6 従来法 (点目標座標 X:0m Y:30m)

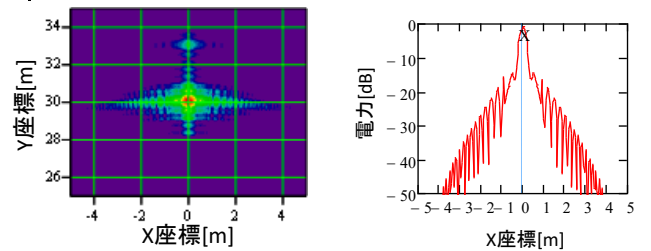


図 4.11 提案法 (点目標座標 X:0m Y:30m)

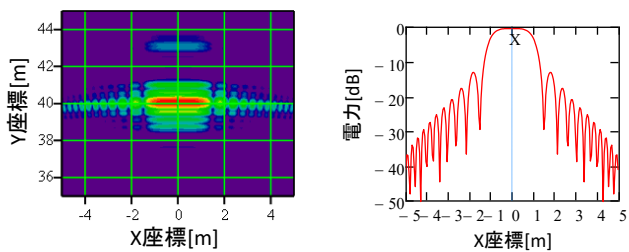


図 4.7 従来法 (点目標座標 X:0m Y:40m)

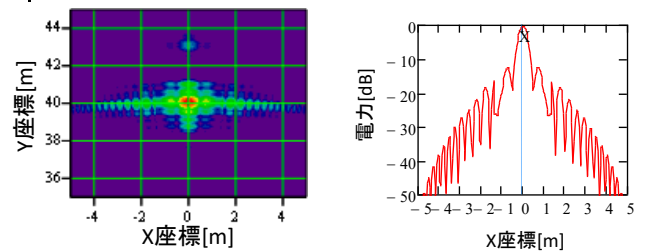


図 4.12 提案法 (点目標座標 X:0m Y:40m)

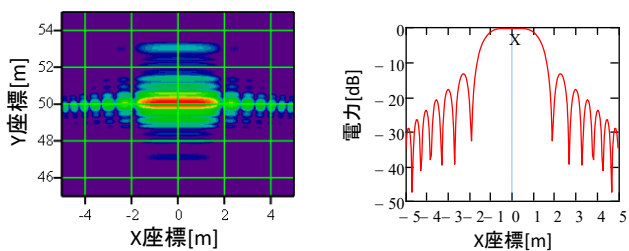


図 4.8 従来法 (点目標座標 X:0m Y:50m)

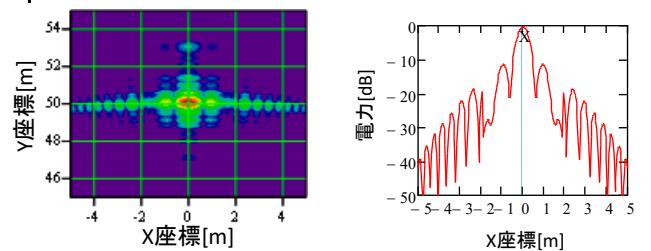


図 4.13 提案法 (点目標座標 X:0m Y:50m)

正面目標の X 座標分解能の Y 座標距離依存性を図 4.14 に示す。

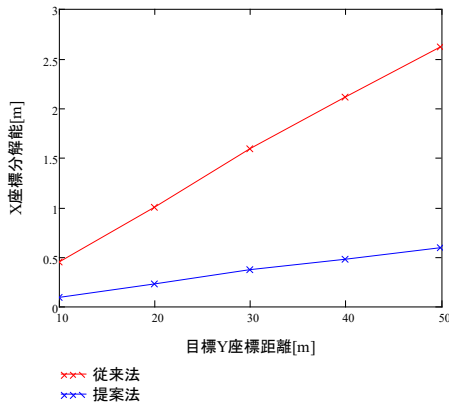


図 4.14 正面目標に対する X 座標分解能

シミュレーション結果から、側方目標に対して従来のドップライメージングでは図 4.2 に示すように左右判別がつかず、左右対称の画像となっているのに対し、提案法では図 4.3 に示すようにビームフォーミングにより角度アンビギュイティが抑圧されていることがわかる。また、正面目標に対する分解能に関して図 4.4 から図 4.13 より画像の分解能向上が確認でき、図 4.14 から目標 Y 座標 50m において従来法では X 座標分解能が 2.6m であったのに対し、提案法では 0.6m となり 4 倍以上高いことが確認された。

5. むすび

本稿では、前方監視イメージングに対する左右判別不可と正面分解能劣化という問題の改善のため「多周波ステップ CPC-SIMO ドップライメージング法」の基礎検討を行った。ドップライメージングとビームフォーミングを組合せ、領域によりそれぞれをゲートとして用いるように切り替えることで今回のシミュレーション条件において問題が改善され前方に対するイメージング性能が向上することが確認された。

今後は、正面領域の角度ゲート内におけるサイドローブ抑圧のため、アレーアンテナ素子配置の不等間隔化を検討する予定である。

参考文献

[1] 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, no.3, pp.285-291, 2015.

[2] G. Pietrzyk, P. Samczyński, A. Gorzelańczyk, and K. S. Kulpa, “Real-time implementation of Doppler beam sharpening technique with simple velocity estimation,” in Proc. Eur. Radar Conf. , Oct. 2004, pp. 185–188.

[3] 渡辺一宏, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, “多周波ステップ CPC 方式におけるドップライメージングの高精度化の検討” 信学技報, vol. 116, no. 115, SANE2016-16, pp. 37-42, 2016-6.

[4] 渡辺一宏, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, “多周波ステップ CPC 方式におけるドップライメージングの任意時刻合焦と高速化の検討” 信学技報, vol. 116, no. 469, SANE2016-118, pp. 1-6, 2017-2.

[5] Shengli DAI, Werner WIEBECK, “The Imaging Mode of Forward Looking SAR with Two Receiving Antennas,” IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No.99CH36293), 10.1109/IGARSS.1999.772092

[6] Junjie Wu, Jianyu Yang, Yulin Huang, Haiguang Yang, and Haocheng Wang, “Bistatic Forward-looking SAR: Theory and Challenges,” 2009 IEEE Radar Conference, 10.1109/RADAR.2009.4976959