

アレーアンテナを備える多周波ステップ CPC レーダにおける 到来時間差およびレンジウォーク補償

秋田 学[†] 渡辺一宏[†] 稲葉敬之[†]

[†]電気通信大学大学院 情報理工学研究科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: akita.manabu@uec.ac.jp

あらまし

本稿では、アレーアンテナを備える多周波ステップ CPC レーダにおいてアンテナ方向で発生する到来時間差によるレンジビンにずれに対する補正処理について検討する。また、本方式の周波数ステップの周波数差に起因するドップラ差の補正、レンジウォーク補償の有無による信号処理利得の差異について考察する。シミュレーション結果により、筆者らが開発した多周波ステップ CPC ミリ波レーダのレーダパラメータにおいては、車幅に受信アンテナをアレー配置したときにおいて周波数ステップの周波数差に起因するドップラ差の補正の有無で 2.5dB 程度の差が見られるが、レンジウォーク補正およびアンテナ方向の時間遅延補正の有無による差は 0.3dB 程度以下にとどまることが示された。一方、現在開発を進めている 79GHz 帯における超広帯域多周波ステップ CPC レーダのレーダパラメータにおいては、到来方向によってはアンテナ方向の時間遅延補正の有無によるコヒーレント積分による信号利得差は 1.7dB 程度の改善、さらに、周波数ステップの周波数差に起因するドップラ差の補正、レンジウォーク補償の有無によりそれぞれ 8dB 程度、5dB 程度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、アレーアンテナ、レンジウォーク

Compensation of Time Difference and Range Walk in Stepped Multiple Frequency CPC Array Radar

Manabu AKITA[†] Masato WATANABE[†] and Takayuki INABA[†]

Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications 1-5-1 Choufugaoka,
Choufu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: akita.manabu@uec.ac.jp

Abstract

In this paper, we consider a method to compensate the delay of range bin due to the time difference of arrivals in antenna direction in stepped multiple frequency CPC array radar. We also consider the effect of the compensation process of the frequency dependence of the Doppler frequency and range walk. From the simulation results, it is indicated that the effect of compensation in antenna direction is limited to 0.3dB for the radar parameters adopted by the millimeter wave radar using stepped multiple frequency CPC developed by our research group. On the other hand, it is also indicated that the compensation in antenna direction, range walk, frequency dependence of the Doppler frequency improves S/N of 1.7dB, 5dB and 8dB, respectively.

Keywords Radar, Stepped Multiple Frequency CPC, Array antenna, Range walk

1. まえがき

次世代の車載レーダ等には、高距離分解能、探知距離性能、高角度分解能が求められる。筆者らは次世代車載レーダや交差点監視レーダ等への応用を想定した多周波ステップ CPC(Complementary Phase Code)方式[1]というレーダ変復調方式を開発している。多周波数ス

テップ CPC 方式は、CPC 符号を用いたパルス圧縮と合成帯域[2]を融合させた新しいレーダ変復調方式である。合成帯域法を用いて従来手法 [3]より狭受信機帯域幅（すなわち S/N に優れ、探知距離性能に優れる）にて送信帯域幅と同等の分解能を得る方法である。これまでに、送信帯域幅に比べ、狭受信機帯域幅で送信

帯域幅に相当する距離分解能が得られることを、本方式を搭載したミリ波レーダを開発し実証している[4].

本レーダにおいて、各周波数ステップで得られるドップラ周波数は周波数に依存するが、送信周波数に対し、送信帯域幅が十分小さいこと、また、運用上想定される最大ドップラと観測時間から、観測時間内における各周波数のドップラ周波数差に依存する位相差は小さく、復調処理では送信周波数帯域幅内でドップラ周波数は同一であるとみなしドップラ周波数の推定をFFTとすることで計算時間の低減を図っている。一方で、この各周波数のドップラ周波数差が及ぼす影響についても検討している[5]。また、観測時間を長くとる場合や目標の相対速度が大きい場合には、観測時間内で目標距離が変化するいわゆるレンジウォーク[6]が発生する。多周波ステップCPC方式において、上記のドップラ周波数の周波数依存性とレンジウォークの双方を補償可能な手段として、両者を考慮したパルスドップラフィルタおよび位相補償処理についても検討しており、パルスドップラフィルタにおけるSN改善への有効性について報告している[6]。

次世代車載レーダや交差点監視レーダには、高距離分解能や探知距離性能だけでなく高角度分解能も求められる。筆者らはこれまでに車載レーダの角度分解能を高める一手法として、車両のバンパー幅に複数のアンテナを配置（アレーアンテナ）した車載マルチスタティックレーダについて検討を行っている[7]。高角度分解能が得られる本手法は、送信波設計と信号処理すなわち距離推定を組み合わせることで、自車前方のレーダによる画像化のみならず、距離毎の角度分布の推定が期待される。ここで、パルスレーダの角度推定処理は同一のレンジビンに対してデジタルビームフォーミング(Digital Beam Forming, DBF)を行うのが一般的である。しかし、信号が超広帯域である場合や大きな開口長を有するアレーアンテナの場合、目標の到来角度によっては、アンテナ方向の到来時間差により同一サンプリング時刻が同一レンジビンに対応しないことが起こり得る。このアンテナ方向で発生する到来時間差によるレンジビンにずれに対する補正処理が必要となる。

本稿では、アレーアンテナを備える多周波ステップCPC方式において、上記のドップラ周波数の周波数依存性とレンジウォークを補償する方法をアンテナ方向に適用することにより、上記レンジビンのずれを補正する方法について検討する。また、シミュレーションにより、①アンテナ方向の到来時間差の補正、②周波

数ステップの周波数差によるドップラ差の補正、③レンジウォーク補正の有無による信号利得の改善効果について示す。

2.アレーアンテナを備える多周波ステップCPCレーダ

2.1.多周波数ステップCPC方式の受信信号

2.1.1 受信アンテナが一つのとき

筆者らが提案する多周波数ステップCPC方式は、CPCパルス圧縮と合成帯域法を複合した新しいレーダ変調方式である。時分割で2つの相補符号の送信と複数個の送信周波数切り替えを行う。時分割送信によるドップラシフトに対する位相補正処理を行い、相補のCPC受信信号の加算により距離サイドローブを抑圧、さらに、複数ステップの周波数方向に合成帯域することにより、送信帯域幅と比較して狭受信機帯域幅で高距離分解能を得る。図1に送信シーケンスを示す。

$$s_{ic}(n, t_m, \tau) = g \left(\tau - \frac{2R(t_m)}{c} \right) \cdot \exp \left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2R(t_m)}{c} \right) \quad (1)$$

また、受信パルス番号*m*におけるslow time t_m は、図1の送信シーケンスより下式で与えられる。

$$t_m = 2T_{pri}(N \cdot m + n) + T_{pri} \cdot ic \quad (2)$$

ここで、式内の各変数は下記のとおりである。

<i>c</i>	光速
τ	fast time
t_m	slow time
<i>g</i>	送信符号の複素振幅
<i>R</i>	目標距離
f_0	ステップ0の送信周波数
Δf	送信周波数ステップ間隔
T_{pri}	パルス繰返し周期
<i>N</i>	送信周波数ステップ数
<i>n</i>	送信周波数ステップ番号(0... <i>N</i> -1)
<i>M</i>	パルス数
<i>m</i>	パルス番号(0... <i>M</i> -1)
<i>ic</i>	CPC符号番号(0,1)

式(1)で与えられる多周波ステップCPCの受信信号 $s_{ic}(n, t_m, \tau)$ の fast time τ でのフーリエ変換 $S_{ic}(n, t_m, f_\tau)$ は(3)式のようにになる。

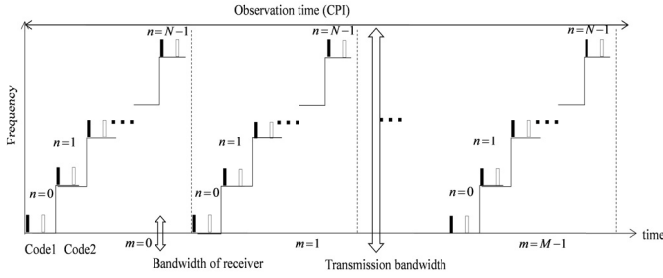


図 1. 多周波ステップ CPC 方式の送信シーケンス

ここで、 f_t は各周波数ステップ帯域内の fast time 方向の周波数で、 $G(f_t)$ は $g(\tau)$ のフーリエ変換である。

$$\begin{aligned}
 S_{ic}(n, m, f_t) &= G(f_t) \cdot \exp\left(-j2\pi f_t \frac{2R(t_m)}{c}\right) \\
 &\quad \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2R(t_m)}{c}\right) \\
 &= G(f_t) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_t) \frac{2R(t_m)}{c}\right)
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$R(t_m) = R_0 - v_0 t_m \quad (4)$$

ここで、 t_0 における距離を R_0 、目標相対速度を v_0 とする。式(3)は式(5)のようになる。

$$\begin{aligned}
 S_{ic}(n, m, f_t) &= G(f_t) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_t) \frac{2(R_0 - v_0 t_m)}{c}\right) \\
 &= G(f_t) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_t) \frac{2R_0}{c}\right) \\
 &\quad \cdot \exp\left(j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_t) \frac{2v_0}{c} t_m\right)
 \end{aligned} \quad (5)$$

2.1.2 アレーアンテナを備える多周波ステップ CPC レーダの受信信号

図 2 に示すようなアレーアンテナを備える多周波ステップ CPC レーダの各受信アンテナにおける受信信号は、式(5)に受信波のアンテナ間の経路差を考慮することにより式(6)で与えられる。

$$\begin{aligned}
 S_{ic}(n, m, f_t, ch) &= G(f_t) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_t) \frac{2R_0}{c}\right) \\
 &\quad \cdot \exp\left(j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_t) \frac{2v_0}{c} t_m\right) \\
 &\quad \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_t) \frac{2d \cdot ch \cdot \sin\theta}{c}\right)
 \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)の第三項がアンテナ方向の時間遅延に対応する。

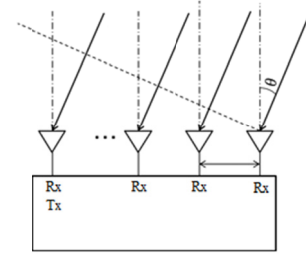


図 2. アレーアンテナの例

2.2 多周波ステップ CPC 方式の信号処理

図 3 に多周波ステップ CPC 方式の CPC 符号加算までの信号処理ブロック図を示す。受信信号は、送信信号とミキシング後 LPF を通過した後、A/D 変換器でサンプリングされる。各 PRI の受信信号に対してパルス圧縮、同一レンジビンに対してパルスドップラフィルタ処理をした後、CPC の符号加算処理を行う。この出力に対して最後に合成帯域処理を施すことにより、狭帯域受信機により送信総帯域幅に相当する距離分解能を有する距離・速度マップを得る[1]。

2.3.1 ドップラ差を考慮したパルスドップラフィルタによるレンジワーク補償

パルスドップラフィルタにおいて各周波数のドップラ周波数差を考慮したパルスドップラフィルタのステアリングは式(5)から以下となる。

$$\alpha(n, t_m, \tilde{v}) = \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2\tilde{v}}{c} t_m\right) \quad (7)$$

さらに各周波数ステップ帯域内の周波数差を考慮すると、式(8)のようになる。

$$\alpha(n, t_m, \tilde{v}) = \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_t) \frac{2\tilde{v}}{c} t_m\right) \quad (8)$$

ここで、送信周波数帯域幅内でドップラ周波数は同一であるとみなしたステアリング

$\alpha(n, t_m, \tilde{v}) = \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{2\tilde{v}}{c} t_m\right)$ 、に対して、式(8)における第二項の $n\Delta f$ を考慮したものが周波数ステップの周波数差によるドップラ差の補正、第三項の f_t を考慮したものがレンジワーク補正にそれぞれ対応する。ここで、fast time 周波数領域の各周波数 f_t に対してコヒーレント積分 (slow time) を行うため処理量は大きくなるが、これを高速化する方法をすでに検討している[6]。

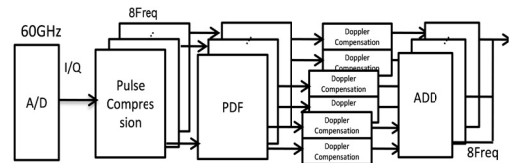


図 3. 多周波ステップ CPC 方式の信号処理ブロック

2.3.2 アンテナ方向の到来時間差の補正

本稿では、ドップラ差を考慮したパルスドップラフィルタによるレンジワーク補償と同様の方法によりアンテナ方向の時間遅延を補正しつつ、角度 θ に対するビームフォーミングおよび合成帯域処理を同時に実行する。CPC の符号加算処理後の信号は以下で与えられる。

$$ADD_{\tau,m}(n, f_r, ch) = \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f)\frac{2R_0}{c}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f + f_r)\frac{2d \cdot ch \cdot \sin\theta}{c}\right) \quad (9)$$

式(9)についてレンジワーク補正と同様にアンテナ方向をスロータイム方向として考え、アンテナ方向にキーストーン変換を適用すると、

$$ADD_{\tau,m}(n, ch) = \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f)\frac{2R_0}{c}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi(f_0 + n\Delta f)\frac{2d \cdot ch \cdot \sin\theta}{c}\right) \quad (10)$$

式(9)は式(10)に置き換えられる（アンテナ方向の時間遅延補正）。式(10)に対して距離-角度の二次元ビームフォーミングにより、距離-角度マップを得る。

$$SWWBF_{Vbin}(R, \theta) = \sum_{ch=0}^{CH-1} \sum_{n=0}^{N-1} ADD_{\tau,m}(n, ch) \cdot \exp\left(j2\pi(f_0 + n\Delta f)\frac{2R}{c}\right) \cdot \exp\left(j2\pi(f_0 + n\Delta f)\frac{d \cdot ch \cdot \sin\theta}{c}\right) \quad (11)$$

3. 計算機シミュレーション

3.1. アレーアンテナを備える多周波ステップ CPC レーダ

表 1 にアレーアンテナを備える多周波ステップ CPC レーダのパラメータ緒元と目標パラメータを示す。本稿で用いる多周波ステップ CPC のレーダパラメータは電気通信大学が開発した多周波ステップ CPC ミリ波レーダ[4]のレーダパラメータを踏襲する。図 4 に、アレーアンテナを備える多周波ステップ CPC レーダの信号処理による各出力 ((a) PDF 出力 (周波数ステップによるドップラ周波数差補正あり, なし) (b)PDF 入力 (レンジワーク補正あり, なし) (c)二次元ビームフォーミング入力 (アンテナ方向時間遅延補正あり, なし), (d) 二次元ビームフォーミング出力) を示す。

表 1. 多周波ステップ CPC 方式のレーダパラメータ

レーダ緒元	スペック
送信周波数	60.32-60.67GHz
CPC パルス幅	80MHz
受信アンテナ間隔	0.5λ
受信アンテナ数	512
開口長	1.269m
角度分解能	0.224deg

表 2. シミュレーションにおける目標パラメータ

レーダ緒元	スペック
目標速度	60km/h
目標角度	60 deg

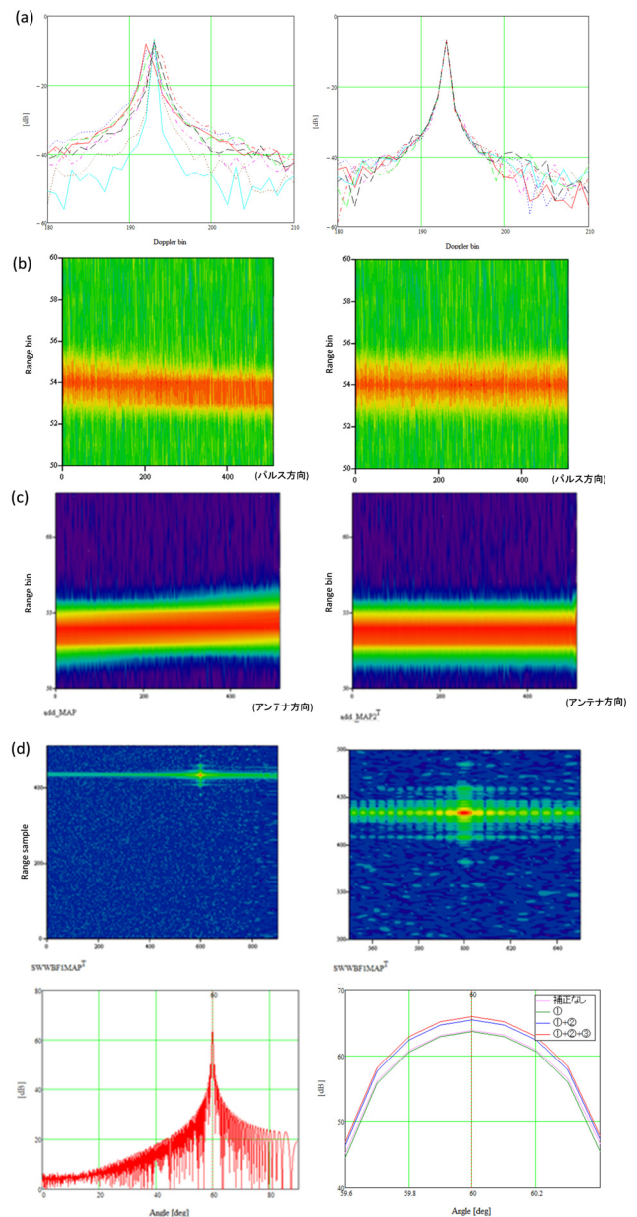


図 4. アレーアンテナを備える多周波ステップ CPC レーダの信号処理による各出力 ((a) PDF 出力 (周波数ステップによるドップラ周波数差補正あり, なし) (b)PDF 入力 (レンジワーク補正あり, なし) (c)二次元ビームフォーミング入力 (アンテナ方向時間遅延補正あり, なし), (d) 二次元ビームフォーミング出力)

表 3.超広帯域多周波ステップ CPC 方式のレーダパラメータ

レーダ緒元	スペック
送信周波数	79.00-80.72GHz
CPC パルス幅	320MHz
受信アンテナ間隔	0.5λ
受信アンテナ数	512
開口長	0.972m
角度分解能	0.224deg

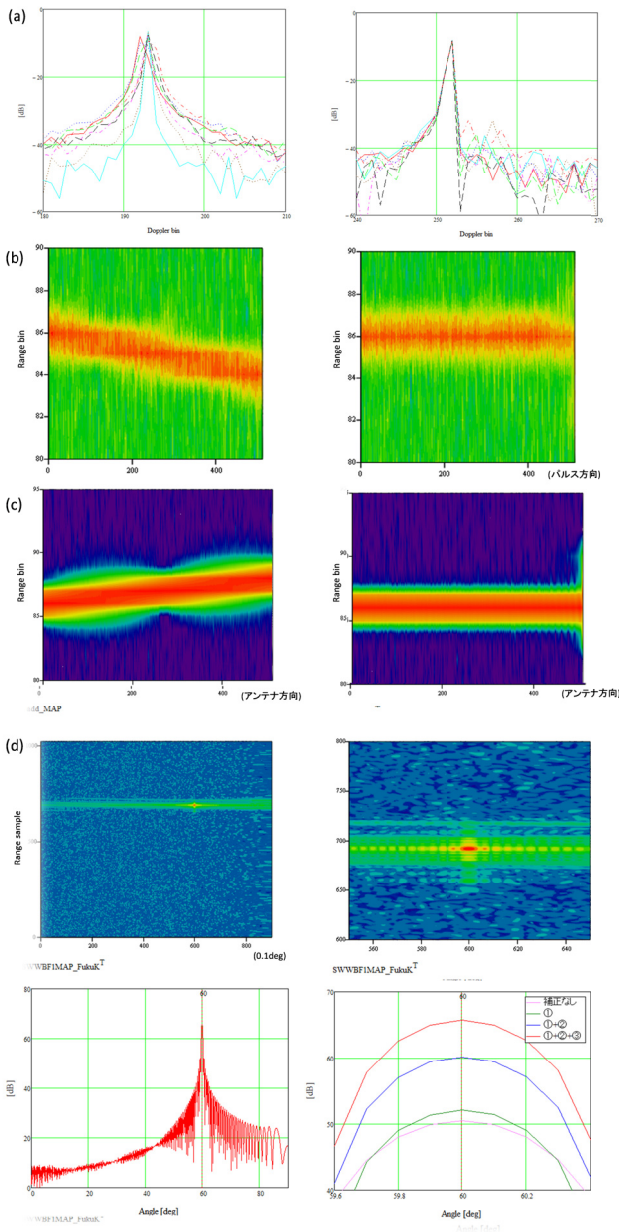


図 5. アレーアンテナを備える超広帯域多周波ステップ CPC レーダの信号処理による各出力 ((a) PDF 出力 (周波数ステップによるドップラ周波数差補正あり, なし) (b)PDF 入力 (レンジウォーク補正あり, なし) (c)二次元ビームフォーミング入力 (アンテナ方向時間遅延補正あり, なし), (d) 二次元ビームフォーミング出力)

なお, 図 4(d)に示す距離-角度マップ (R-θ マップ) は, ドップラビン毎に 3次元マップとして得られるが, こ

こでは最大電力を有するドップラビンに対する結果を示す。図 4(d)より, レンジウォーク補正, アンテナ方向の有無によるコヒーレント積分による信号利得差は 0.3dB 程度以下にとどまっている。一方で, 周波数ステップの周波数差に起因するドップラ差の補正の有無により 2.5dB 程度の差が確認される。

3.2. アレーアンテナを備える超広帯域多周波ステップ CPC レーダ

表 3 に, 筆者らが現在開発を進めている 79GHz 帯における超広帯域多周波ステップ CPC レーダのパラメータ緒元の一例を示す (サブバンドの帯域幅を 4 倍とする)。図 5 に, 表 2 に示す目標パラメータに対する各処理における入出力を図 4 と同様に示す。図 5 より, 79GHz 帯における超広帯域多周波ステップ CPC レーダのパラメータにおいてはレンジウォーク補正, アンテナ方向の有無によるコヒーレント積分による信号利得差において 3dB 程度の改善が確認される。さらに, 周波数ステップの周波数差に起因するドップラ差の補正の有無により 8dB 程度, レンジウォーク補正によりさらに 5dB 程度の改善が確認される。

2.まとめ

車載レーダの角度分解能を高める手法として, 車幅に受信アンテナをアレー配置したとき, 信号が広帯域であり大きな開口長を有するアレーアンテナの場合, 目標の到来角度によっては, アンテナ方向の到来時間差により同一サンプリング時刻が同一レンジビンに対応しないことが起こり得る。本稿では, このアンテナ方向で発生する到来時間差によるレンジビンにずれに対する補正処理についてドップラ周波数の周波数依存性とレンジウォークを補償する方法をアンテナ方向に適用することにより, 上記レンジビンのずれを補正する方法について検討した。シミュレーションにより, ①アンテナ方向の到来時間差の補正, ②周波数ステップの周波数差によるドップラ差の補正, ③レンジウォーク補正の有無による信号利得の改善効果について示し, 筆者らが開発した多周波ステップ CPC ミリ波レーダのレーダパラメータにおいては, 車幅に受信アンテナをアレー配置したときにおいて②の有無で 2.5dB 程度の差は見られるものの①, ③の有無による差は 0.3dB 以下にとどまることが確認された。一方, 現在開発を進めている 79GHz 帯における超広帯域多周波ステップ CPC レーダのレーダパラメータの一例においては, アンテナ方向の到来時間差補正の有無によるコヒーレント積分による信号利得差において 1.7dB 程度の改善,

さらに、周波数ステップの周波数差に起因するドップラ差の補正の有無により 8dB 程度、レンジウォーク補正によりさらに 5dB 程度となり、車幅に受信アンテナをアレー配置したときにおいてはすべての処理において信号処理利得および分解能の改善が確認された。なお、本稿では簡単のため送信アンテナを 1 機、受信アンテナを 5 1 2 とする構成例を示したが、同等の角度分解能を達成するために必要なアンテナ素子数を低減する方法[7]を採用し、本手法を適用することも可能である。

謝辞

本研究開発は総務省 SCOPE(受付番号 175003002)の委託を受けたものです。

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] N. Levanon and E. Mozeson, Nullifying ACF Grating Lobes in Stepped-Frequency Train of LFM pulses, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol.39, No.2, pp.694-703, 2003
- [3] Stimson, G.W., Introduction to Airborne Radar, 2nd Edition”, Scitech. Publishing Mendham, 1998.
- [4] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 多周波ステップ CPC レーダの鉄道環境への応用のための基礎実験, 電気学会論文誌 C, Vol.135, No.5, pp.513-520, 2015
- [5] 福島冬樹, 稲葉敬之, パルスドップラーレーダにおける FFT-超分解能測距のためのドップラー補償法, 状処理学会論文誌, Vo. 49, No.9, pp.1-9, 2008
- [6] 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, pp. 37-42, 2016.
- [7] M. Akita, M. Watanabe, T. Inaba, Development of millimeter wave radar using stepped multiple frequency Complementary Phase Code and concept of MIMO configuration, 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), DOI: 10.1109/RADAR.2017.7944184, 2017