

# 超広帯域 (79GHz 帯域 4GHz 幅等) に向けた 狭受信機帯域レーダ方式の提案

稲葉 敬之<sup>†</sup> 秋田 学<sup>†</sup> 渡辺 優人<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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: inaba@ee.uec.ac.jp

## あらまし

本稿では、多周波ステップ CPC 変復調方式において周波数ステップをランダムステップとすることで、速度アンビギュイティ問題を回避しつつより狭帯域化することが可能であることを示す。更に、この狭帯域の多周波ステップ CPC を複数のサブバンドにて同時送受信し、かつそれらサブバンドでの CPC 加算後（合成帯域前）信号を入力とした離隔周波数合成処理を備える「超広帯域多周波ランダステップ CPC 方式」を提案する。この方式により、79GHz 帯（総送信帯域幅 4GHz）を例として、周波数ステップ数 32×サブバンド数 8 にて、数 10MHz（距離分解能 10m 程度）という狭受信機帯域幅であるにも関わらず、総送信帯域幅相当の距離分解能を超える距離差 2cm（完全等速）の目標距離分離が期待されることを示した。高分解能という市場ニーズ、超広帯域化という電波法令動向の中で、提案方式は高分解能と探知距離の両立を図る有効な一方式となることが期待される。

**キーワード** レーダ, UWB, 広帯域, 多周波ステップ CPC 方式, 合成帯域

## Concept of Ultra Wideband Radar realized by Narrow Receiver Bandwidth

Takayuki INABA<sup>†</sup> Manabu AKITA<sup>†</sup> and Masato WATANABE<sup>†</sup>

Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan  
E-mail: inaba@ee.uec.ac.jp

**Abstract** In this article, Stepped Multiple Frequency CPC by narrower receiver bandwidth that mitigates the velocity ambiguity by employing the random frequency step sequence is described. Furthermore, “Ultra-wide band Random Stepped Multiple Frequency CPC” that is realized by multiple narrowband Random Stepped Multiple Frequency CPC operated in separated sub-bands is proposed. The radar has also Coherently Combining Sparse-Multiband Processing (CCSM) using the output of CPC pulse compression in the sub-bands. The results indicated that the proposed radar could be expected to isolate the two targets having the range difference of 2cm, which is less than the range resolution equivalent to the transmission band width) and same velocities. Considering the trend of the market needs and wireless law of Japan, the proposed method can be one of the effective and promising methods.

**Keywords** Radar, UWB, ultra wide band, Stepped Multiple Frequency CPC

## 1. まえがき

近年、安全安心のための運転支援や自動運転のためのセンサとして、ミリ波レーダの活用が注目されている。電波法令的にも従来の 76GHz (500MHz 幅) が 1GHz 幅に拡張され、79GHz 帯も 4GHz に拡張されることで、76GHz 帯とつながり全体で 5GHz におよぶ広帯域の活

用が可能となる。広帯域を活用することで、距離分解能(m)=光速/(2×帯域幅)の関係から、高い距離分解能が期待される。

一方で、単にパルスレーダやパルス圧縮レーダのように瞬時帯域を広くとる方式は、帯域内受信機雑音(kTB)が増加し、検知距離が劣化してしまうという深刻

な課題を抱えている。そこで、著者等は、狭受信機帯域幅（すなわち遠距離性）と高距離分解能という相反する能力を兼ね備えた多周波ステップ CPC レーダを提案し 60GHz 帯や 76GHz（ともに送信帯域幅約 430MHz）にて実験的にもその有効性を示して来た [1]-[20].

本稿では、この多周波ステップ CPC レーダ方式に基づき、769GHz 帯超広帯域において分解能と探知距離の点で優れる方式の提案を行う。具体的には、送信帯域幅をこれまでの約 8 倍の 4GHz に拡張し、一方で、受信機帯域幅や A/D 変換速度を従来の 160MHz から数 10MHz 程度の数分の 1 以下に狭帯域化する方式に関するパラメータスタディを行う。

今回採用する方式は、76GHz 帯（500MHz）の多周波ステップ CPC のパラメータを踏襲する。すなわち約 430MHz 帯域幅の多周波ステップ CPC を 4GHz 帯域内に 8 バンド程度を収納し、並列同時送信する。一方で、430MHz 帯域幅内の周波数ステップ数をこれまでの 8 段から 32~64 段へと増加させる。この結果、CPC パルスの帯域幅は上記の数 10MHz 帯へと狭帯域化される [21]. 一方で、全 4GHz 帯域幅となる 8 バンドの多周波ステップ CPC の合成は、たとえば文献[22][23]にて提案した離隔周波数のコヒーレント合成法を採用する。この結果、最終的に、4GHz の帯域幅に相当する距離分解能を備えるレーダ方式が、数 10MHz という狭受信機帯域幅にて構成することができる。このため、A/D に入力する受信機雑音は  $23\text{dB}(=10 \cdot \log(8\text{GHz}/40\text{MHz}))$  も低減され、探知距離の大幅延伸が期待される。また、この方式は、8 バンド分多周波ステップ CPC の並列信号処理が必要であるが、帯域幅が数 10MHz レベルに狭帯域化されており、ハードウェア負荷としては 10 分に小さいものである。

一方、最終段の離隔周波数のコヒーレント合成法は特徴的な手法と言える。その狙いは、離隔した周波帯域（60GHz と 76GHz 帯など）を合成する手法としてだけでなく、79GHz 等の超広帯域内の複数の帯域のコヒーレント合成法として活用できる。超広帯域となるとその帯域内での送受信利得平坦性（振幅および位相）の確保がハードウェア的に困難となる。また、目標のレーダ反射断面積も目標各部の形状違いによる周波数特性が異なり、超広帯域での多目標分離を目的とするとその影響を無視できない。提案法での最終段の離隔周波数コヒーレント合成法[24]は、上記のように帯域内の信号コヒーレンシーが維持されていないことを想定した手法であり、その点でもロバスト性が期待される。

## 2. 提案する超広帯域多周波ランダムステップ CPC

### 2.1 送信シーケンス

従来の多周波ステップ CPC の送信シーケンスをサブバンドとし、中心周波数をずらした 8 サブバンドを採用した超広帯域多周波ランダムステップ CPC の送信シーケンスを図 1 に示す。

採用している CPC 符号の数は 2 であり同一周波数で連続する 2 つのパルス繰り返し区間に送受信することは、従来と同様である。

このとき CPC1 または CPC2 でのパルスドップラ処理による速度視野は、約 80km/h 程度であり、車載レーダへの応用を想定すると、視野不足となる。車載レーダへの応用において信頼性の高い速度視野は  $\pm 200\text{km/h}$  では不十分であり  $\pm 500\text{km/h}$  の確保が必要と思われる。速度視野解決方法としては、CPC1 と CPC2 各パルスドップラ出力の位相差や、その他の複合シーケンスを採用するなどの方法を提案してきた。しかし、本稿では、図 2 に示すより単順で、かつ耐干渉対策としても有利となるランダム周波数ステップによるシーケンスを採用することとする。

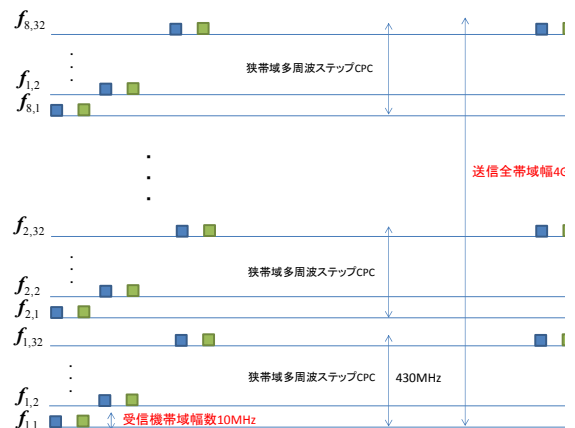


図 1 マルチバンド多周波ステップ CPC シーケンス

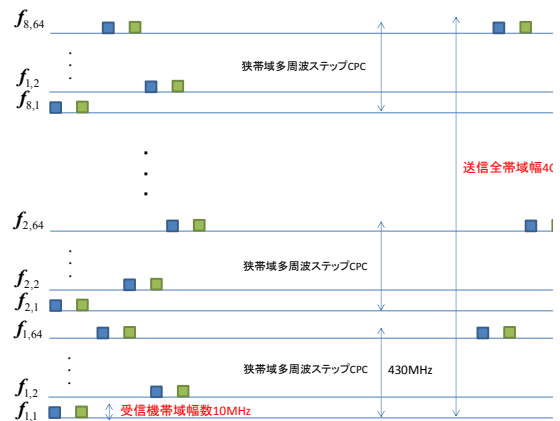


図 2 マルチバンド多周波ランダムステップ CPC シーケンス

## 2.2 超広帯域多周波ランダムステップ CPC 処理

図 2 の送信シーケンスにより受信波形の信号処理となる、超広帯域多周波ランダムステップ CPC の処理構成概念を図 3 に示す。

8 サブバンド（約 500MHz 帯域幅）からなる多周波ステップ CPC の受信信号は各サブバンドフィルタで、それぞれのサブバンドに分別される。分別された多周波ステップ CPC 受信信号は、これまでの多周波ステップ CPC 方式と同様に、時分割により周波数ステップ  $f_1 \sim f_{64}$ （図 2 の例）信号とミキシングされ狭帯域のベースバンド CPC パルス信号へ周波数変換される。

このため、ベースバンド受信機帯域幅や A/D 変換器速度は数 10MHz の低速とすることができる。

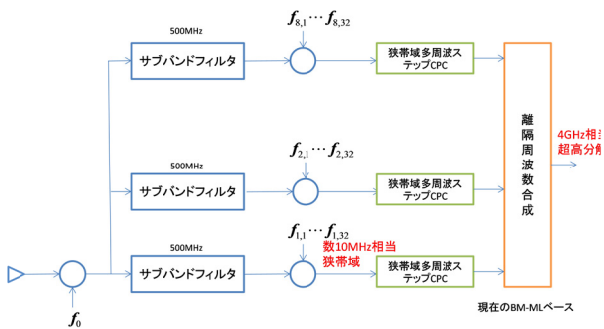


図 3 マルチバンド多周波ステップ CPC 機能ブロック図

送信周波数ステップをランダムにした多周波ステップ CPC の処理を図 4 に示す。これまでの多周波ステップ CPC 処理との変更はパルスドップラフィルタ (PDF) が等間隔サンプリングの FFT であるところ、不等間隔であることを考慮した DFT に置き換えるのみである [21]。

これまで周波数ステップを 8 としていたところを 32~64 に増加させているため（より狭帯域化を図るため）、サブバンド毎の SWW 入力 8 が 32 に増加する一方でパルスドップラ入力点数は約 512 が 130 程度と少なくなり、結果的に FFT を不等間隔 DFT に置き換えることによる計算量の増加を緩和するパラメータとなる。

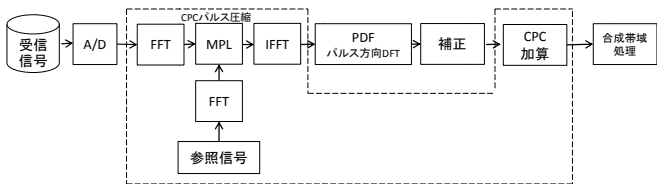


図 4. 多周波ランダムステップ CPC 信号処理

次に、多周波ステップ CPC の合成帯域前（CPC 加算後）の信号位相は、距離を周期とした正弦波信号である。よって、文献 [22][23] で提案した手法がそのまま利用できる。図 5 に超広帯域多周波ステップ CPC 信号処

理概念を示す。図 5 の離隔周波数合成処理は [24] で提案した方法でありその処理構成を図 6 に示す。

この離隔周波数合成処理では、数各サブバンドの CPC 加算後信号を離隔周波数信号とみなし、サブバンド間のコヒーレンシー確保を前提とせず、目標毎の複素振幅差を推定しつつサブバンド信号を合成することで高分解能な距離推定が可能である。なお、離隔周波数合成処理 [24] に含まれる BM (Blocking Matrix) とそれを用いたイテレーション法は [25] で示唆したように、Relax 法やその関連法など各種の拡張が考案可能である。

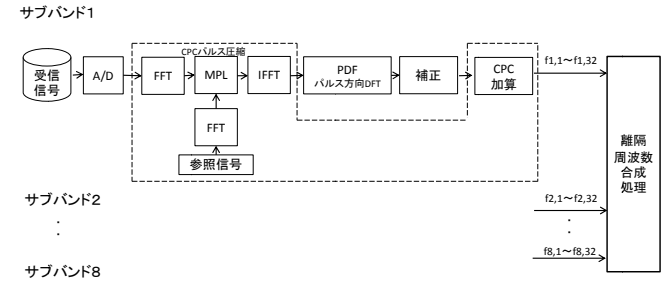


図 5. 超広帯域多周波ランダムステップ CPC 信号処理

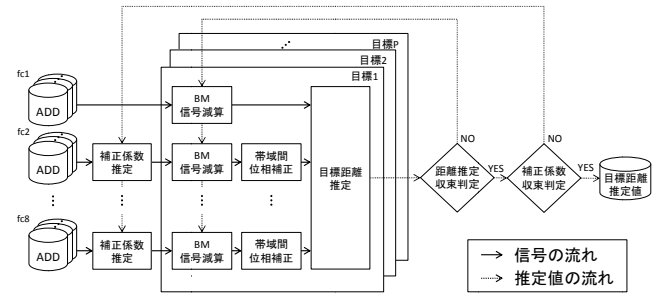


図 6. 離隔周波数合成処理

## 3. 超広帯域多周波ステップ CPC のパラメータ設計

送信周波数帯 (79GHz), 総観測時間 (約 30msec (速度分解能が決まる)), 距離視野 (400m) を与える。

次に、サブバンド帯域幅 (約 450MHz), サブバンド内の周波数ステップ数 (8~64 程度) と CPC 相補符号チップ数 (16~64 程度) を与える。周波数ステップ数  $N$  と総帯域幅から周波数ステップ幅および CPC 符号チップ幅が決まる。

これにより、要求される受信機帯域幅と A/D サンプリングレートが決められる。次に、CPC 相補符号チップ数と、CPC 符号チップ幅からパルス幅、パルス幅と要求される距離視野からパルス繰り返し時間が決まる。

このプロセスで決定した、超広帯域多周波ステップ CPC のレーダパラメータを表 1 に示す。図 1 に示す通常の線形周波数ステップ多周波ステップ CPC での

CPC1, CPC2 それぞれでの速度視野は±15.6km/h であるところ、図 2 に示すようなランダム周波数ステップとすることで±500km/h に拡大される。

以上より、車載レーダ等の近距離レーダへの応用を想定し、距離と速度、ともに視野が 10 分に大きく、アンビグイティがないパラメータを実現可能となる。更に、各サブバンドの合成帯域処理 (SWW) を離隔周波数合成処理に置き換えた超広帯域多周波ステップ CPC にて、距離分解能は送信総周波数帯域幅の 4GHz (約 4.2cm に相当) 以上の高分解能が期待される。

このとき、信号帯域幅は 21.5MHz であり、受信機帯域幅や A/D サンプリングレートは、30~40MHz という狭帯域・低速にて構成可能であることが特徴である (表 1. ではオーバーサンプリング 2 の 43MHz を採用.)

以上のように、20MHz 程度の受信機帯域幅にて、79GHz 帯の 4GHz という超広帯域にて得られる高分解能レーダを構築可能となる。また、高分解能の実現にとどまらず、狭受信機帯域幅であるがゆえに受信機雑音が小さく遠距離性に優れることが期待される。受信機帯域幅 8GHz (信号帯域幅 4GHz) と 40GHz (信号帯域幅 20MHz) の差は 23dB にも及ぶ。この値は距離に換算して 3.8 倍の検知距離延伸に相当する。

表 1. レーダ緒元

送信周波数	79GHz 帯(79-83GHz)
送信帯域幅	4GHz
距離視野	400m
観測時間	29.974msec
周波数ステップ数:	32
CPC1,CPC2 符号チップ数	16
サブバンド間隔	500MHz
サブバンド帯域幅	448MHz
周波数ステップ幅	13.4MHz
CPC チップ帯域幅	21.5MHz
CPC パルス幅	0.744 μ sec
サンプリング周波数	43MHz
パルス繰返し間隔	3.418 μ sec
同一周波数平均パルス数	137
速度視野 (ランダム時)	±499.872km/h
距離分解能 (4GHz 相当値)	4.2cm
速度分解能 (30msec 相当)	0.228km/h

#### 4. 計算機シミュレーション

機能確認のための簡単な計算機シミュレーションを実施する。

ここで、目標諸元は以下とする。完全等速の目標が距離差 2cm (信号帯域幅 8GHz 相当) であるとする。また、A/D 直後でのそれらの信号 S/N は -3dB とした。

表. 目標緒元

目標距離 R (距離差 2cm)	20m, 20.02m
目標速度 V (完全等速)	100km/h
目標 S/N(A/D 出力時)	-3dB

#### 4. 1 多周波ランダムステップ CPC の出力

ここでは、一つのサブバンド内での処理出力について定性的確認を行う。

CPC1 と CPC2 の 2 つのパルス繰返し周期を一組として、送信周波数ステップの選択を乱数にて決める。こ図 7 に、採用した周波数ステップ数である 1~32 の間を乱数にて定めた結果を示す。(図 7 では初めの 32 パルス繰返し周期の組を表示している。)このとき、全各周波数ステップのパルス数は、周波数ステップ毎に一定ではなく、約 137 を平均として図 8 に示す数となる。すなわちランダムパルスドップラ処理では、各周波数においてこの数を入力として、出力の数は同数となる不等間隔 DFT を行う。

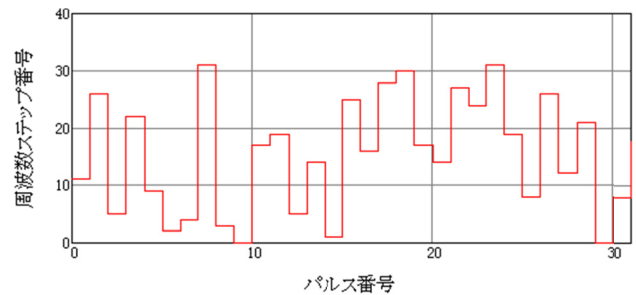


図 7. ランダム周波数変化

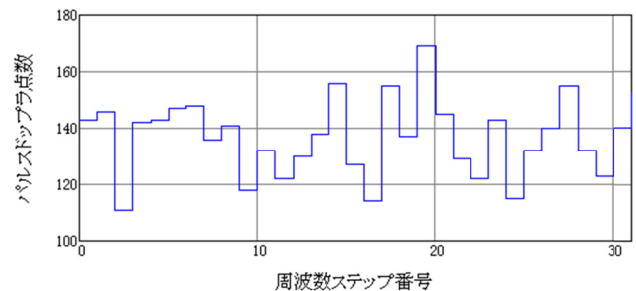


図 8. 各周波数のパルスドップラ数

ランダムパルスドップラ処理後に、周波数ステップや CPC1/CPC2 の時間差送信、およびそれらに起因するドップラ周波数依存性を補正する処理を行い、その後 CPC 合成することで、ドップラ周波数に依存せず、低サイドローブが実現される。

図 9 (a)(b)に、CPC 合成後の出力信号 ((a)距離軸方向, (b)速度軸方向)を示す. 距離軸方向の狭帯域化したことにより分解能は約 10.8m である. 次に参考として, 図 10 (a)(b)に、合成帯域後の出力信号 ((a)距離軸方向, (b)速度軸方向)を示している. 距離軸方向の分解能はサブバンド帯域幅 448MHz に相当する約 34cm まで高められている. しかし、設定した 2 目標の距離差は 2cm であり、当然分離困難である.

一方、ここで重要な点は、通常であれば速度視野が 15.6km/h にとどまるところ、2 目標の速度が 100km/h という折り返しが発生する条件においても、図 9 (a), 10 (a)に見られるように、折り返しは抑圧され、目標の正しい速度ビン (速度分解能 0.228km/h の整数倍 =439) に信号ピークが得られることがわかる. 図 10 (a)において、信号対ドップラ方向の信号フロアレベル比は約 30~40dB である.

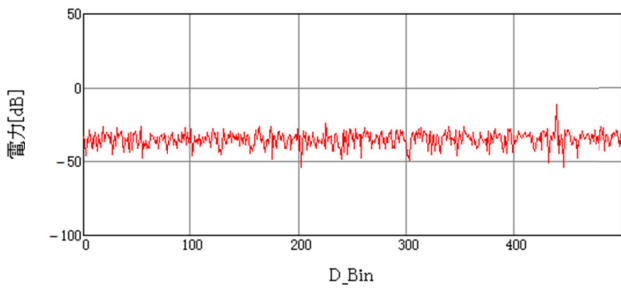


図 9 (a). CPC 加算後 速度方向

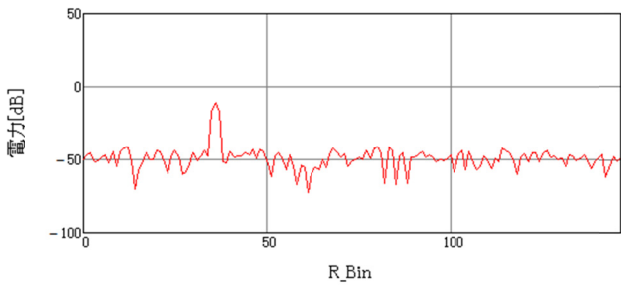


図 9 (b). CPC 加算後 距離方向

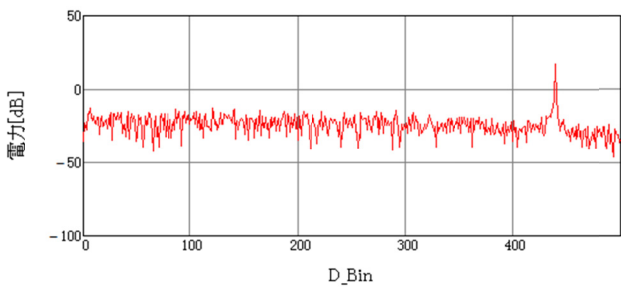


図 10 (a). 合成帯域処理後 速度方向

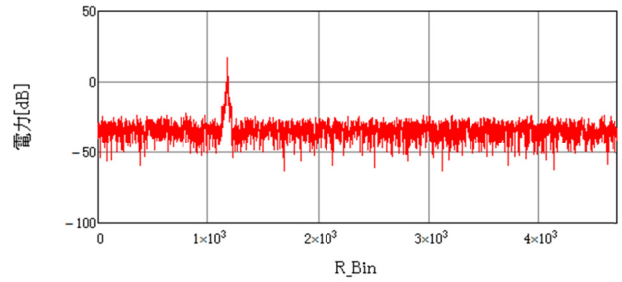


図 10 (b). 合成帯域処理後 距離方向

#### 4. 2 離隔周波数合成の出力

次に図 9 (a), (b)に示した CPC 加算後信号のそれぞれ全 8 サブ帯域域分を入力信号とし、離隔周波数合成処理を適用する.

離隔周波数合成では、BM により自信号以外を除外しつつ尤度を最大にすることで目標個別の距離の推定を行う. 図 11 に、目標 1、目標 2 それぞれに対する尤度値結果を示す.

この目標 1 (BMML\_Tgt1)、目標 2 (BMML\_Tgt2) の尤度が最大となるのは、それぞれ距離 20.004m、20.022m であった. 真値が 20.000m、20.020m であることから、それぞれ誤差 4mm、2mm であるが、総送信帯域幅約 4GHz に相当する距離分解能 4.2cm の約 2 倍である距離差 2cm の分離が (数 10MHz の受信機帯域幅にて) 可能であることが確認された.

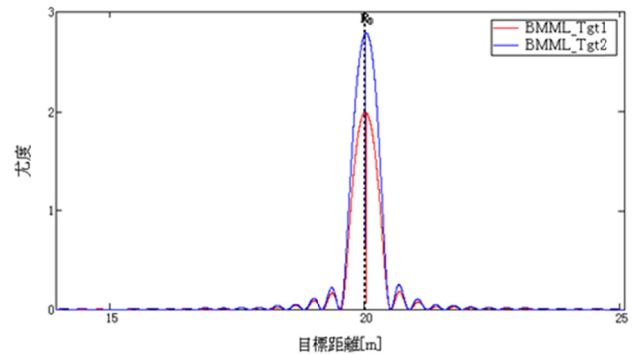


図 11. 離隔周波数合成処理 尤度値

#### 5. まとめ

本稿では、多周波ステップ CPC 変復調方式において周波数ステップをランダムステップとすることで、速度アンビギュイティ問題を回避しつつより狭帯域化することが可能であることを示した. 更に、この狭帯域の多周波ステップ CPC を複数のサブバンドにて同時送受信し、かつそれらサブバンドでの CPC 換算後 (合成帯域前) 信号を入力とした離隔周波数合成処理



を備える「超広帯域多周波ランダステップ CPC 方式」を提案した。この方式により、79GHz 帯（総送信帯域幅 4GHz）を例として、周波数ステップ数 64×サブバンド数 8 にて、数 10MHz（距離分解能 10m 程度）という狭受信機帯域幅であるにも関わらず、総送信帯域幅に相当する距離分解能を超える距離差 2cm(完全等速)の目標距離分離が期待されることを示した。高分解能という市場ニーズ、広帯域化という電波法令動向の中で、提案方式は高分解能と探知距離の両立を図る有効な一方式となることが期待される。今後、各処理の高精度化や実験的検証を進める。

#### 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, 電学論 C, vol. 135, no.3, pp.285-291, 2015
- [2] M. Akita, M. Watanabe, T. Inaba, Development of Millimeter Wave Radar Using Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code and Concept of MIMO Configuration, Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference(RadarConf17), Paper 5039, 2017
- [3] M. Akita, Y. Ota, M. Watanabe, T. Inaba, Experimental Comparison of Stepped Multiple Frequency CPC with Pulse Compression, Proceedings of IEEE 2017 International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM2017), pp. 115-118, 2017
- [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 SANE2016-118, vol. 116, no.469, pp.1-6, 2017
- [5] 渡辺一宏, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 多周波ステップ CPC レーダによる ELD-STAP のフィールド実験とクラッタ抑圧性能評価, 信学技報 SANE2016-97, vol. 116, no.427, 2017
- [6] 稲葉敬之, 渡辺優人, 秋田学, 渡辺一宏, 次世代車載ミリ波レーダに向けた変復調方式・信号処理技術, Microwave Workshops and Exhibition (MWE2016), MWE2016 FR2A-2, 2016
- [7] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 多周波不等間隔ステップ CPC 方式の距離サイドローブ特性, 信学技報 SANE2015-90, vol. 115, no.403, pp. 47-52, 2016
- [8] 渡辺一宏, 横川貴洋, 高橋陸, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 各種環境での多周波ステップ CPC レーダを用いた計測実験と ELD-STAP の特性評価, 信学技報 SANE2015-93, vol. 115, no.403, pp. 65-70, 2016
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 秋田学, 山下遼, 渡辺優人, 渡辺優人, 稲葉敬之, 多周波 CW 方式における速度・距離視野拡張法, 電気学会論文誌 C, vol.136, no.4, 2016
- [12] 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 SANE2016-16, vol. 116, no.115, pp. 37-42, 2016
- [13] M. Akita, M. Watanabe, T. Inaba, A Study on Maximal Ratio Combining in Stepped Multiple Frequency CPC Radars for Multipath Fading, IEICE Technical Report, vol. 116, no.319, 2016
- [14] M. Watanabe, M. Akita, T. Inaba, Angle Estimation Method using Blocking Matrix in Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code Modulation, IEICE Technical Report, Vol. 116, no.319, 2016
- [15] 山下遼, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 多周波ステップ CPC ミリ波レーダにおける最尤推定法を用いた到来方向推定, 信学技報 SANE2014-111, Vol. 114, No. 397, pp.41-46, 2015.
- [16] 稲葉敬之, 渡辺優人, 渡辺一宏, 秋田学, 次世代高度運転支援システムのためのレーダ技術の研究開発(招待講演), 2015 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, AS-1-2, 2015
- [17] 秋田学, 新田大輔, 渡辺優人, 稲葉敬之, 等価時間サンプリング符号変調 CW 方式の提案, 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J98-B, no.10, pp.1155-1168, 2015
- [18] 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
- [19] T. Inaba, K. Hihara, S. Ogawa, Suppression of Interference Wave by Employing Staggered PRI on Two Frequency Interrupted CW Radar, ITS WORLD CONGRESS DETROIT 2014, 2014
- [20] 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, Vol.113, No.387, pp.13-18, 2014
- [21] 太田裕也, 秋田学, 渡辺優人, 稲葉敬之, 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, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会(6月), 2017
- [22] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 離隔周波数帯コヒーレント合成処理による高距離分解能化, 電子情報通信学会総合大会, B-2-20, 2017
- [23] 秋田学, 山口達輝, 渡辺優人, 稲葉敬之, BM 法を前処理とした離隔周波数帯コヒーレント合成処理による高距離分解能化, 電子情報通信学会総合大会, B-2-21, 2017
- [24] 山口達輝, 秋田学, 渡辺優人, 稲葉敬之, BM 法を用いた離隔周波数帯コヒーレント合成による高距離分解能化, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会(6月), 2017
- [25] 秋田学, 廣瀬太亮, 渡辺優人, 稲葉敬之, 多周波ステップ CPC 方式における目標自動検知法の検討, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会(6月), 2017