

# 狭受信機帯域による超広帯域コヒーレントレーダ技術

Ultra Wideband Coherent Radar by Narrow Receiver Bandwidth

稲葉 敬之 秋田 学 渡辺一宏  
Takayuki Inaba Manabu Akita Kazuhiro Watanabe  
電気通信大学大学院情報理工学研究科

Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

## 1. まえがき

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、狭帯域（すなわち遠距離性に優れる）にて高距離分解能が得られる多周波ステップ CPC (Complementary Phase Code)方式を提案し、60GHz や 76GHz 帯（約 430MHz 瞬時帯域幅）にて同方式を採用した実時間動作レーダ装置を開発しその有効性を実験的にも実証してきた。一方近年の自動運転の実現等の社会的ニーズの高まりから 79GHz 帯が 4GHz に拡大され超広帯域を活用可能な法整備が整いつつある。すなわち、遠距離性を犠牲にすることなく高距離分解能が得られる変復調方式技術の確立はより重要性を増している。以上の背景より本研究では、多周波ステップ CPC を基盤技術として、距離視野、速度視野を確保した上で上記特徴を備える以下の変復調方式を提案する[1]。

### (1) 離隔多周波ランダムステップ CPC 方式

### (2) スパース多周波ランダムステップ CPC 方式

前者は、従来の多周波ステップ CPC を一つのサブバンドとし、複数のサブバンド間の多周波ステップ CPC 出力信号がノンコヒーレントである場合においても、目標毎にコヒーレント合成することを特徴とする。一方後者は、超広帯域内において受信信号がコヒーレントであると仮定して、周波数ステップがスパース（後述する速度視野対策のため）であるにも係わらず、合成帯域処理に圧縮センシングを適用し距離アンギュイティを抑制する方式である。

## 2. 離隔多周波ランダムステップ CPC 方式

### 2.1 送信シーケンスおよび復調処理

この方式は、60GHz と 76GHz の離隔した別周波数帯域の多周波ステップ CPC をコヒーレント合成する。あるいは超広帯域（79GHz 帯等）の帯域内をサブバンドに分割し、それらが別周波数帯域のようにノンコヒーレントである場合においても、コヒーレント合成することで高距離分解能を得る方式である。なお、基盤とする多周波ステップ CPC 方式の信号帯域幅は、更なる遠距離性向上のため従来の 80MHz より狭帯域化を図る。このため、一つのサブバンド内での周波数ステップ数は 8 から 32 に増加させることができる。しかし、周波数を時分割でステップ（このため受信機帯域幅が狭い）している多周波ステップ CPC において周波数ステップ数を増やすことは、速度視野の低下に繋がる。その対策として 2 つの CPC 符号の送受信からなる 2 つの PRI(Pulse Repetition Interval)を 1 組として周波数をランダムにステップさせる。一つのサブバンド（約 450MHz）内に 32 ステップの多周波ランダムステップ CPC が収容され、全帯域幅の 4GHz で計 8 サブバンドとなるシーケンス例を図 1 に示す。超広帯域の場合、各サブバンド間のレーダコヒーレンシーを確保することは装置の複雑化に繋がる。また目標の反射電力の周波数依存性が目標毎に異なり、無視できないと考えられる。そこで、各サブバンド間の複素振幅係数は未知数である場合においても、その係数を推定しデータベクトル長を全周波数ステップ数へと合成拡大す

ることで超高分解能を得る処理が「離隔周波数合成」である。以上より、離隔多周波ランダムステップ CPC は、① CPC パルス圧縮、②ランダムステップパルスドップラ、③補正、④CPC 加算、⑤離隔周波数合成の各処理からなる。

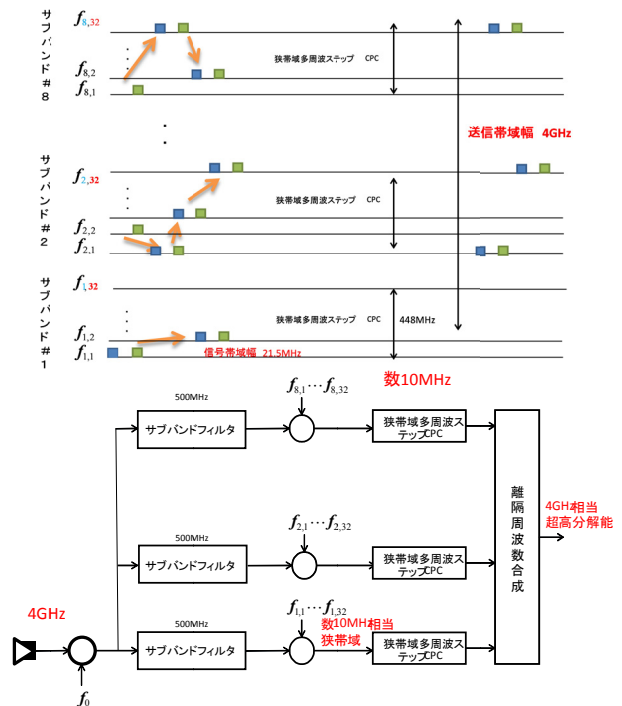


図 1. 離隔多周波ランダムステップ CPC シーケンス (上), ブロック図 (下)

以上のコンセプトにて設計した離隔多周波ランダムステップ CPC 方式のレーダパラメータを表 1 に示す。従来の多周波ステップ CPC 送信シーケンスでは、速度視野が  $\pm 15.8\text{km/h}$  に低下するが、ランダム化により高速道路での対向車を対象として必要となる  $\pm 500\text{km/h}$  まで拡大することが期待される。一方、信号帯域幅は 21.5MHz という狭帯域（という狭帯域（距離に換算すると約 7m）化が図られている。離隔周波数合成は、この狭帯域信号にて高距離分解能を得ることが目的である。

### 2.2 計算機シミュレーション

離隔多周波ランダムステップ CPC レーダのパラメータ一覧を表 1 に示す。シミュレーションにより、2 目標の分離性能を評価する。目標速度は完全に等速の 100km/h とし、通常速度視野  $\pm 15.8\text{km/h}$  より大きな値とした。図 2 はある一つのサブバンドの多周波ステップ CPC 出力の速度方向出力であり、ランダム化によりアンギビュイティ雑音が約  $-30\text{dB}$  以下に抑圧され本来の速度 bin にのみ信号ピークが得られることが分かる。

表 1. 離隔多周波ランダムステップ CPC レーダパラメータ

設計パラメータ値	
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	0.744μsec
サンプリング周波数	43MHz
パルス繰返し間隔	3.418μsec
同一周波数平均パルス数	137
速度視野(ランダム時)	±499.872km/h
速度分解能(30msec相当)	0.228km/h

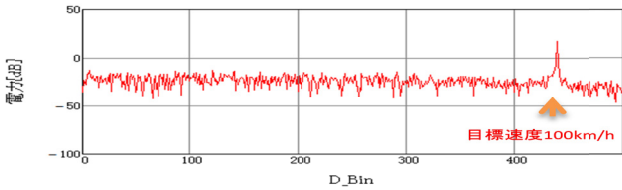


図 3. 多周波ランダムステップ CPC の出力 (横軸: 速度ビン)

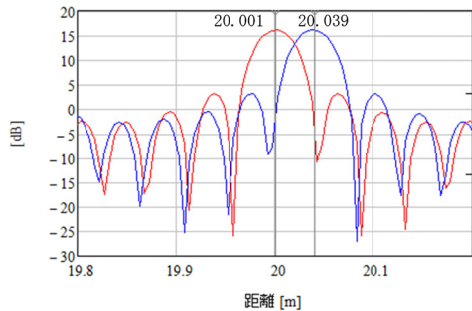


図 4. 離隔周波数合成後の目標距離推定 (縦軸: 尤度値)

一方、⑤離隔周波数合成(Maximum Likelihood Estimation based on Blocking-Matrix using Relax Iteration)の評価では、2 目標の距離差を 4GHz での分解能に相当する約 4cm(20m と 20.04m)とし、④CPC 加算出力を模擬した周波数軸上での周期信号(S/N=20dB)を入力とした。このときの離隔周波数合成結果の一例を図 4 に示す。距離差 4cm の目標分離が可能でありそれぞれ、20.001m、20.039m という推定結果が得られた。同一条件にての統計評価(目標間位相差・帯域間位相差と雑音の種を変更)では推定距離平均は 20.000m、20.039m、標準偏差 5.3mm、5.7mm、が得られた。以上の結果より、同方式により距離視野、速度視野を確保したうえで、信号帯域幅 21.5MHz という狭帯域にも係わらず送信全帯域幅相当(4GHz)以下の高距離分解能を得ることが期待される。

### 3. スパース多周波ランダムステップ CPC 方式

#### 3.1 送信シーケンスおよび復調処理

79GHz 帯 4GHz 帯域幅等で受信信号がコヒーレントである場合は、より容易な多周波ステップ CPC 拡張法が考えられる。周波数ステップ幅を前記 13.4MHz とすると 4GHz 帯域幅内で 256 周波数ステップとすることができる。しかし、この場合も移動目標に対する速度視野を確保するためには周波数ステップ数は前記と同じ 32 ステップ程度に抑えることが必要となる。そこで今回は、図 5 に示すように全 256 周

波数ステップの中で、周波数# 1 ; 1,2,17,18,33,34,49,50, . . . 241,242 のようにスパースな周波数ステップを採用する。

レーダ#	PRI 1,2	PRI 3,4	PRI 5,6	PRI 7,8	PRI 9,10	PRI 11,12	PRI 13,14	PRI 15,16	..	PRI 511,512
周波数ステップ番号	1	2	17	18	33	34	49	50	..	242

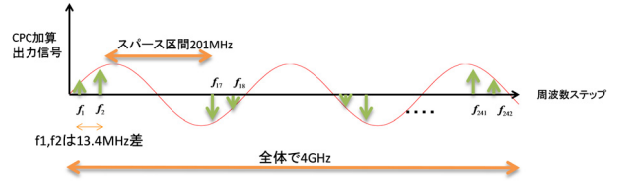


図 5. スパース多周波ランダムステップ CPC シーケンス

次に、実際には前記したように速視野対策のため周波数(1,2), (17,18), (33,34) . . . (241,242)のそれぞれを 1 組としてランダムに周波数を選ぶ。復調処理は①, ②, ③, ④は同様であり、④CPC 加算の出力信号はある程度十分な S/N となるが、図 5 のようにスパースなサンプリングとなる。そこで、この信号に対し⑥圧縮センシングを適用し、距離アンギュイティの抑圧を図る。なお、周波数ステップの組を変えた同様なシーケンスにて、複数(上記パラメータ例では 8 台)のレーダを同一周波数帯域内に共存させることも可能である。

### 3.2 計算機シミュレーション

図 5 のスパース周波数ステップにおいて、2.1 と同様に④CPC 加算出力を模擬した周波数軸上での周期信号を入力としたときの、⑥圧縮センシング(Lasso-ADMM)出力結果の一例を示す。2 目標の距離と S/N は 2.1 と同様である。図 6 上図より、フーリエ変換では距離アンギュイティ(20.7m など)が発生するが、⑥圧縮センシングではアンギュイティが抑圧されている。また、下の拡大図より、2 目標が 4cm 差で正しく分離されていることも確認される。この結果より、離隔多周波ランダムステップ CPC と同様に、21.5MHz という狭信号帯域幅にて、速度視野、距離視野を犠牲にせず送信全帯域幅相当(4GHz)以下の高距離分解能を得ることが期待される。

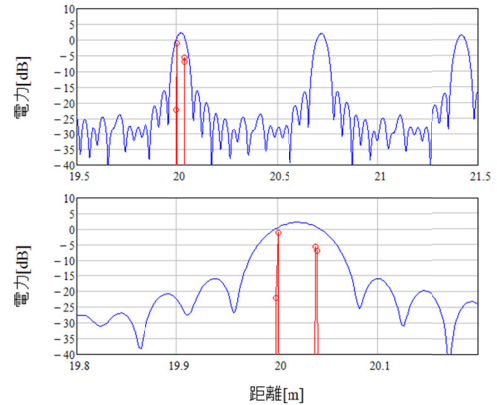


図 6. フーリエ変換(青線)と圧縮センシング(赤○)

### 4. むすび

多周波ステップ CPC 方式を基盤として①離隔多周波ランダムステップ CPC 方式、および②スパース多周波ランダムステップ CPC 方式を提案した。ともに信号帯域幅 21.5MHz であるにも係わらず、送信全帯域幅相当(4GHz)に相当する高分解能が期待されることを示した。今後、実験データ解析とともにアルゴリズムの拡張・改善を図る予定である。

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]稲葉敬之, 秋田学, 渡辺優人, “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”, 信学技報, June,2017.039