

# 超広帯域多周波ステップレーダにおける 再帰的周波数推定法を用いた自動検知法

稲葉敬之<sup>†</sup> 渡辺一宏<sup>†</sup> 秋田学<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 電気通信大学大学院 情報理工学研究所 〒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

筆者らは、送信帯域幅と比較して狭受信機帯域幅にて送信帯域幅に相当する距離分解能を実現し、遠距離目標の高い検知能力とを両立する独自のレーダ変復調方式（多周波ステップ方式）を提案している。近年 79GHz 帯において 4GHz の超広帯域幅が活用可能な法整備が整いつつあり、超広帯域を有効利用可能なレーダ技術の研究開発が求められている。多周波ステップ方式は、超広帯域化においてその方式としての有効性がより顕著なものとなると考えられる。一方で、多周波ステップ方式は周波数を時分割で切り替える方式であるため送信周波数幅の拡大は速度視野の低下につながる。周波数帯域が 4GHz に及ぶ超広帯域となる場合、観測時間一定のもとパルス繰り返し数を確保するためには、周波数ステップ間隔を不等間隔（スパース）とせざるをえず、速度視野だけでなく距離視野の低下が課題となる。本稿では、周波数ステップのランダム化により速度視野の低下を緩和しつつ、周波数ステップ間隔のスパース化に伴うアンビギュイ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自動検知により対処する構成を提案し、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示す。

**キーワード** レーダ, 79GHz 帯, 超広帯域, 多周波ステップ方式, 合成帯域

## Detectable Velocity and Range Ambiguity Mitigation for Ultra-Wideband Stepped Multiple Frequency Radar

Takayuki INABA<sup>†</sup> Kazuhiro WATANABE<sup>†</sup> Manabu AKITA<sup>†</sup>

<sup>†</sup>The University of Electro-Communications 1-5-1 Choufugaoka, Choufu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan  
E-mail: Inaba@ee.uec.ac.jp

## Abstract

Authors have proposed Stepped Multiple Frequency Modulation which can achieve both a high range resolution and a long-range detection performance by a narrow receiver bandwidth compared to transmitting bandwidth. In recent years, the legal system for short range radar has been changed for use of the ultra-wide bandwidth of 4 GHz in 79 GHz band. The advantage of this method itself must be more remarkable for use of the ultra-wide bandwidth. On the other hand, it will suffer from the deterioration of the detectable velocity accompanied by expansion of transmission bandwidth, since it adopts the method of switching the frequencies in time-division. In the case of use of 4GHz bandwidth, we will also face the range ambiguity problem, since the frequency steps also must be sparse for keeping the number of pulse repetitions. In this article, we propose the radar modulation/demodulation method based on stepped multiple frequency radar which is composed of random frequency step and Recursive Signal Subtraction Frequency Estimation. We also show that the proposed method can obtain the range resolution corresponding ultra-wideband without ambiguity in both velocity and range directions.

**Keywords** Radar, 79GHz band, UWB, Stepped Multiple Frequency Modulation, Synthetic Bandwidth

## 1. まえがき

限られた送信帯域幅と送信電力にて分解能と検知能力を両立させることはレーダ技術において恒久的な課題である。一般的なパルスレーダでは送信帯域幅と受信機帯域幅は同じであり送信帯域幅の広帯域化は、受信機雑音の増加に直結し探知距離性能の劣化を招く。筆者らは、周波数を時分割にて切り替え、瞬時の受信機帯域幅を狭帯域とし後の信号処理で合成して送信帯

域幅に相当する分解能を得る合成帯域法を基本とした多周波レーダ変復調方式を提案してきた。文献[1]において、合成帯域法に基づくレーダにおける移動目標対処のために、合成帯域処理の前に同じ周波数に対して FFT による目標速度推定処理を前処理とし、周波数を切り替えるタイミングを考慮した位相補償を施すことで、周波数ステップ方向の位相勾配は距離情報のみ含むこととなり、目標速度・距離推定が簡易な FFT の組み合わせにより可能であることを示した。目標速度推

定処理において、送信周波数に対して各周波数の差は小さく、各周波数における目標速度は同一のフーリエ変換出力チャンネルとなるため、上記の処理がFFTで可能であるが、各周波数の差が無視できないような場合についても、同処理をDFTに置き換えるのみでよいことも併せて示している[2][3].

上記を実現する送信シーケンスとして、一つの周波数ステップ区間を要求される速度分解能を得るために必要な観測時間幅として周波数をステップさせる方法 (case1) と、周波数を時分割でステップさせ同要求を満たすために必要な観測時間だけ繰り返す方法 (case2) について検討し、case2の方がデータレートおよび目標の観測時間内におけるRCSの揺らぎに対するロバスト性の面等で有利であることを示した[1]. さらに近距離レーダとして要求される最大インストルメント距離、速度分解能、速度視野すべてを満足させるcase2の送信シーケンスが成立可能であることを示し、送信波をパルス化して時間遅延による距離ゲート化により合成帯域法の位相アンビギュイティの課題に対処する多周波ステップICW方式を提案している[1][2]. この方式をもとに、送信波をLFMパルス圧縮波とし送信デューティを向上させる方式(多周波ステップLFM方式)を提案している[4]. また、送信波を符号拡散したパルス圧縮波とし、近距離レーダを想定して短い符号長にて電力アイソレーションを確保するためにCPC符号を採用した多周波ステップCPC方式を提案し、同方式の有効性を実験的にも実証してきた[5][6].

近年79GHz帯近距離レーダにおいて4GHzの超広帯域幅が活用可能な法整備が整いつつあり、超広帯域を有効利用可能なレーダ技術の研究開発が求められている。しかし、上記のように通常のパルスレーダやパルス圧縮レーダでは、超広帯域化に伴う受信機雑音増加による探知距離の劣化や処理負荷の増大という深刻な課題がある。多周波ステップ方式は超広帯域化におけるこれら問題に対してその方式としての有効性がより顕著なものとなると考えられる。

一方で、多周波ステップ方式(とくに2つの相補符号を用いるCPC方式)は周波数を時分割で切り替える方式であるため送信周波数幅の拡大は速度視野の低下につながる。筆者らはこの速度視野低下の課題に対してこれまで観測時間と占有周波数帯域幅を一定の条件のもと、速度推定用ステップを採用した送信周波数シーケンスとすることで、速度視野を拡張する方法を検討しており、多周波ステップ方式の基本となる多周波CW方式においてその有効性が示されている[7][8]. また、多周波ステップCPC方式において連続して送信する2つのCPC符号間の位相差から速度アンビギュイティを解く方法も検討している。近年では、圧縮セン

シングにより速度アンビギュイティを解く方法を提案している[9]. 圧縮センシングにより速度アンビギュイティを解く方法は、上記2つの手法と同様一定のS/Nが確保されている条件における有効性が確認されている。低S/Nにおける条件においてもロバストな方法として周波数をランダムにステップすることにより速度アンビギュイティを解く方法を提案している[10]. 周波数をランダムにステップさせる方法では、速度方向のアンビギュイティの電力は、最大目標反射電力の-35dB程度に抑えられることがシミュレーションにより確認されている。なお、同アンビギュイティの電力分布は雑音の分布と異なりこれが誤検知の要因となる可能性は低いことがシミュレーションにより示唆されている[11].

さらに周波数帯域が4GHzに及ぶ超広帯域となる場合、観測時間一定のもとパルス繰り返し数を確保するためには、周波数ステップ間隔を不等間隔(スパス)とせざるをえず、このとき速度視野だけでなく距離視野の低下が課題となる。筆者らは上記距離視野低下の課題に対してこれまで、多周波CW方式において初期送信周波数をわずかに変えた線形的に周波数をステップさせる2組の送信シーケンスを用いることで距離視野を拡張する方法を検討している[12]. また、速度アンビギュイティと同様に合成帯域処理を圧縮センシングに置き換えることによる距離アンビギュイティ対策を検討している。同法では圧縮センシングを信号処理最後段とすることで、比較的S/Nが良好な条件において距離アンビギュイティ対策における有効性がシミュレーションにより確認されている[13].

本稿では、低S/Nにおいて、速度および距離アンビギュイティを解決する手段として、周波数をランダムにステップさせる方法と再帰的信号減算周波数推定法[16][17]に基づく自動検知というアプローチ[14][15]を組み合わせた方法を提案する。再帰的信号減算周波数推定法を多周波ステップ方式へ適用する最も簡素な方法としては、合成帯域処理への適用が考えられるが、本稿ではより速度方向の目標間の電力アイソレーションが要求される場合を想定して、ランダムパルスドップラ処理前の信号を減算するというループ構成とする。なお、パルス圧縮前の信号を減算するというループ構成も考えられるが、実環境においてA/D前に挿入されるローパスフィルタの影響による再帰的信号減算周波数推定法の波形減算効果の低下を避けるため、ランダムパルスドップラ処理前の信号を減算するループ構成とする。本構成により、多周波ステップ方式の超広帯域化に伴う速度および距離アンビギュイティの課題解決が期待される。

本稿では、多周波ステップCPC方式を例として

4GHz という超広帯域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、再帰的信号減算周波数推定法に基づく自動検知により振幅の大きな目標のサイドローブフロアに埋もれた振幅の小さな目標を自動検知できることを示す。

## 2. 多周波ステップレーダ方式における再帰的減算周波数推定法による自動検知法

### 2.1. 多周波ステップ CPC 方式

筆者らが提案してきた多周波数ステップ CPC 方式は、CPC パルス圧縮と位相差を用いた距離推定（合成帯域法）を複合したレーダ変調方式である。時分割で2つの相補となる CPC(Complimentary phase code)符号の送信と複数個の送信周波数切り替えを行い、受信時に送信周波数毎に復調する。受信信号をパルス圧縮処理した後ドップラー周波数推定を行う。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する。さらに、複数ステップの周波数方向に受信信号を合成する合成帯域法により、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とともに遠距離性も両立している。また、パルス化することにより、距離ゲート内を最大距離視野とすることが可能となっている。図1に送信シーケンス、図2に多周波ステップ CPC 方式の信号処理ブロック図を示す。

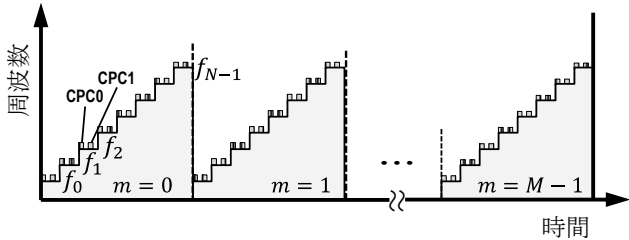


図 1. 多周波ステップ CPC 方式の送信シーケンス

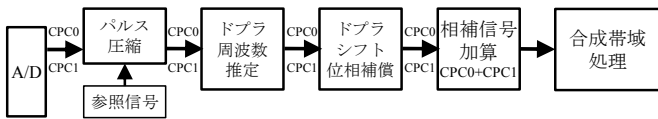


図 2. 多周波ステップ CPC 方式の信号処理

### 2.2. 超広帯域多周波ステップ CPC 方式

79GHz 帯のように周波数帯域幅が 4GHz におよぶ超広帯域へ多周波ステップ CPC 方式の適用を考えた場合、距離分解能と遠距離性の両立という観点で多周波ステップ方式の有効性がより顕著となるものの、観測時間を一定にすると周波数時分割切り替えのため距離視野が狭くなる問題が生じる。周波数ステップ数  $N$  を 256、周波数ステップ幅  $\Delta f$  を 13.4MHz とした場合、約 4GHz の帯域をカバーできるが、観測時間が長くなる

問題があり  $N$  を 256 から 32 程度に間引いて選択する必要がある。図 3 に、距離 19.2m、速度 60km/h の 1 目標に対する上記送信シーケンスの多周波ステップ CPC 方式の帯域出力結果例を示す。この場合、速度視野だけでなく距離視野の劣化が生じる。 $N = 32$  のとき、速度視野（速度アンビギュイティが発生する間隔）が約 30km/h、距離視野（距離アンビギュイティが発生する間隔）が 1.2m となる。図 4 に同送信シーケンスの多周波ステップ CPC 方式の合成帯域出力結果例を示すように速度および距離方向においてアンビギュイティが発生しており、距離方向については約 7m の距離ゲート幅の中に多数存在している。

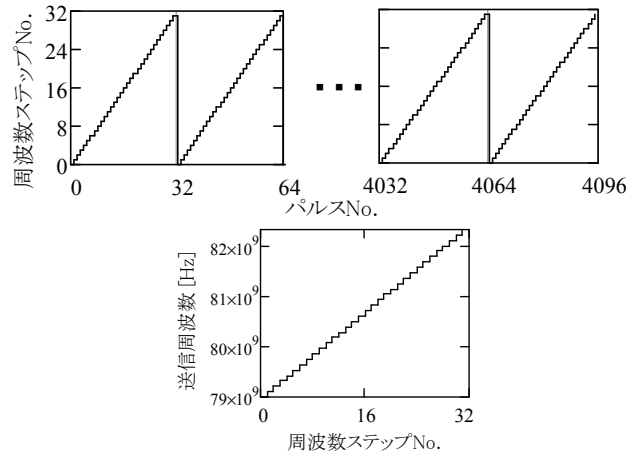


図 3. 多周波ステップ CPC 方式の超広帯域への拡張 (1)

( $N=32$ , 上：周波数切り替え順序線形, 下：等間隔周波数ステップ)

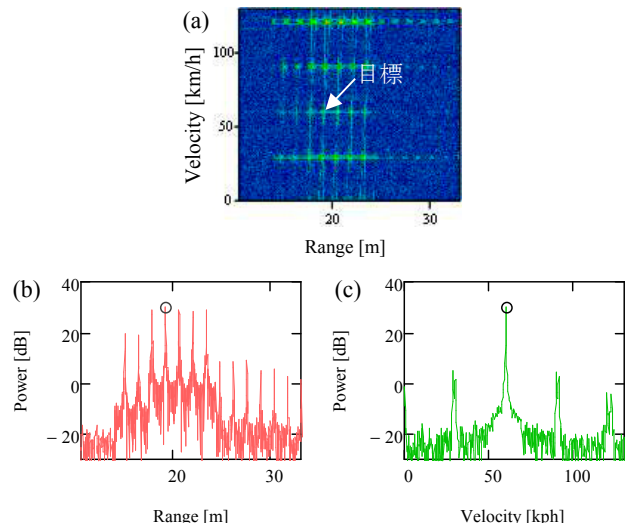


図 4. 多周波ステップ CPC 方式の超広帯域への拡張 (1) の送信シーケンスを用いたときの合成帯域結果出力 ((a)距離-ドップラマップ, (b)最大電力点の距離プロファイル, (c)最大電力点のドップラプロファイル)

### 2.3. 速度・距離視野の改善

速度視野改善対策として、図 5 に示すように送信す

る周波数順序をランダムとし同一送信周波数におけるサンプリング周期を不等間隔とすることで速度視野を確保する。さらに、距離視野改善対策として、周波数ステップ幅  $\Delta f = 13.4\text{MHz}$  刻みで用いる 32 個の周波数ステップをランダムに選択する。結果的に、周波数ステップは、不等間隔（スパース）ではあるが、広い距離視野に相当する周波数ステップの最小刻みがシーケンス内に含まれることになる。図 6 に、距離 19.2m、速度 60km/h の 1 目標に対する上記送信シーケンスの多周波ステップ CPC 方式の合成帯域出力結果例を示す。同一周波数におけるサンプリング周期および周波数ステップの不等間隔化により、速度および距離方向のアンビギュイティが緩和され、速度視野は 976km/h、距離視野は 11.2m に拡大されている。また、約 7m の距離ゲートにより 11.2m のアンビギュイティについては大きく抑圧される。

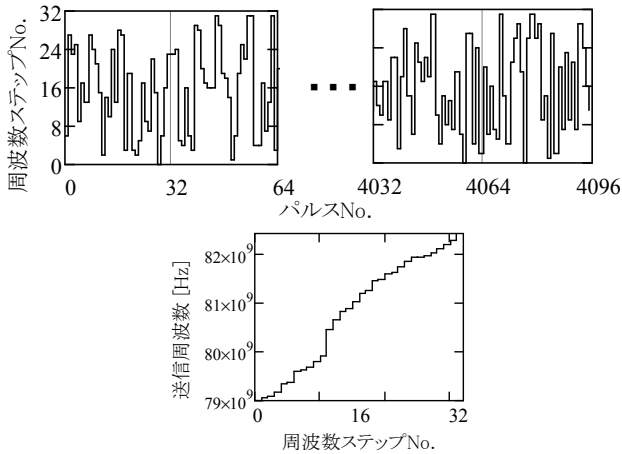


図 5. 多周波ステップ CPC 方式の超広帯域への拡張 (2)  
( $N=32$ , 上: 周波数切り替え順序ランダム, 下: 不等間隔周波数ステップ)

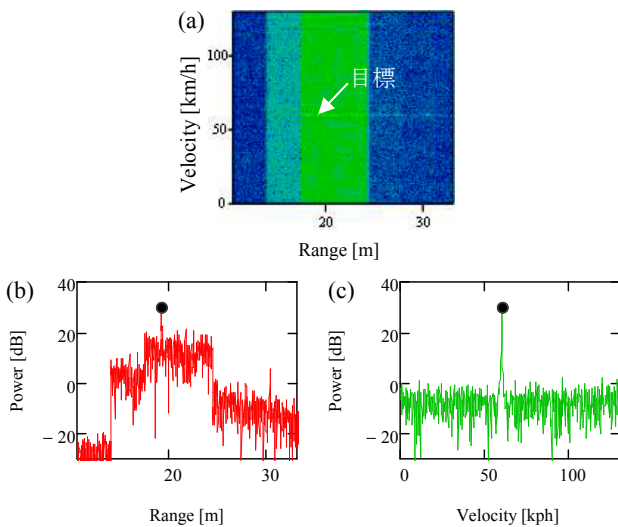


図 6. 多周波ステップ CPC 方式の超広帯域への拡張 (1) の送信シーケンスを用いたときの合成帯域結果出力 ((a) 距離-ドップラマップ, (b) 最大電力点の距離プロファイル, (c) 最大電力点のドップラプロファイル)

## 2.4. 再帰的信号減算周波数推定法による自動検知

送信する周波数順序をランダムとし同一周波数におけるサンプリング周期を不等間隔とすることで距離視野が確保されるが、図 6(b)に示すように周波数ステップ数  $N$  が 32 の場合、目標のサイドローブフロアが約 15dB となる。近接した距離に振幅差が 15dB 以上の振幅の小さな目標が存在する場合、目標はサイドローブフロアに埋もれ単純な目標ピーク探索による目標自動検知では誤検知を引き起こす可能性がある。そこで、多目標が含まれる観測信号から 1 目標ずつ信号を分離しながら分離目標の距離、速度、複素振幅をイテレーション推定する再帰的信号減算周波数推定法[16][17]を適用する。この手法は、多目標信号の目標数を仮定し、仮定する目標数を 1 からはじめ 1 つずつインクリメントさせることで、振幅の大きい順に目標を検出していき、既に検出した目標信号を減算することで、サイドローブフロアに埋もれた振幅の小さな目標に対する振幅の大きな目標の影響を緩和し、目標振幅差のある多目標すべてを自動検知することができる。検出した目標にもとづいて減算処理を行った際、検出した目標がノイズではなく正しい目標であれば減算後のサイドローブフロアは減算前より低下するので、低下しているあいだ仮定する目標数をインクリメントすることで、観測信号に含まれる目標数の全ての目標について自動検知を行うことができる。図 7 に再帰的信号減算周波数推定法による自動検知のブロック図を示す。

一般に、A/D 変換器の前にはアナログフィルタが挿入されており、パルス圧縮後の観測信号はフィルタの影響を受けたものとなっている。本検知法は、検出した目標の距離と速度から距離ビン毎のフィルタ特性の影響を受けた振幅を推定し、それをもとに観測信号から既検出の波形をフィルタの影響を受けた波形に合わせて減算する。そのため、波形の減算不足が生じにくく減算で残った波形を誤検知することを防げる。

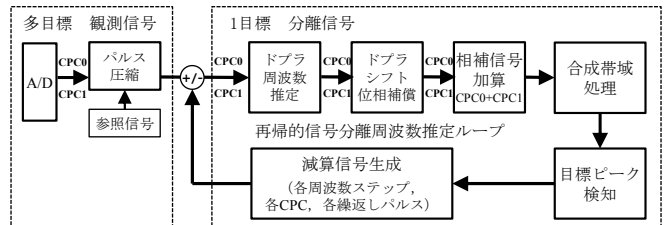


図 7 再帰的信号減算周波数推定法による自動検知

## 3. 計算機シミュレーション

### 3.1. シミュレーション条件

計算機シミュレーションにおける超広帯域多周波ステップ CPC 方式のレーダパラメータを表 1 に示す。

表 1. レーダパラメータおよび期待性能

パラメータ名	緒元
送信周波数 $f_0$	79.83GHz
送信帯域幅 $B_t$	3.43GHz
瞬時受信帯域幅 $B_r$	21.5MHz
周波数ステップ幅 $\Delta f$	13.4MHz
A/D サンプル周波数 $f_s$	43.0MHz
符号チップ数 $P$	16
パルス繰返し間隔 $PRI$	3.5 $\mu$ s
パルス数 $M$	128
観測時間 $T_{cpi}$	28.7ms
距離分解能	0.034m
速度分解能	0.211km/h

### 3.2. 距離分解能

図 8 に、周波数ステップ幅  $\Delta f = 13.4\text{MHz}$ 、 $3.43\text{GHz}$  の帯域幅をカバーする周波数ステップ数  $N=256$  から 32 の周波数ステップをランダムに選択し多周波ステップ CPC 方式で変復調した距離-電力プロファイルを示す。3dB 電力幅が約 0.034m となり、 $3.43\text{GHz}$  帯域幅の分解能 (0.037m) が得られていることが確認できる

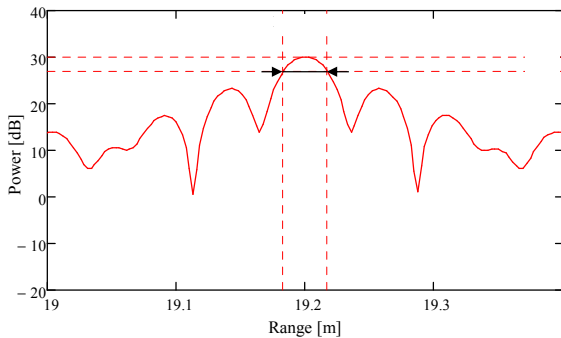


図 8. 距離-電力プロファイル

### 3.3. 等速度 5 目標の自動検知

目標速度 60km/h、目標間隔 0.64m の 5 目標とし、各目標の振幅差を 5dB としたとき (表 2) の、再帰的信号減算周波数推定法による等速度 5 目標の検知結果を図 9 に示す。白丸は目標距離・速度の真値を示し、黒丸は検知した値を示す。受信フィルタ特性は、12 次、帯域幅 95% の Butterworth フィルタとした。

表 2. 等速度 5 目標の目標条件

目標	距離 (m)	速度 (km/h)	入力 SN (dB)
目標 1	17.92	60.0	24
目標 2	18.56	60.0	19
目標 3	19.20	60.0	14
目標 4	19.84	60.0	9
目標 5	20.48	60.0	4

観測信号において、目標 3,4,5 は、振幅が最も大きい目標 1 の約 15dB の距離サイドローブフロアに埋もれているが (図 9 中央)、再帰的信号減算周波数推定法により振幅順に目標を検知し減算することで、埋もれた小振幅の信号の全てを検出できている。

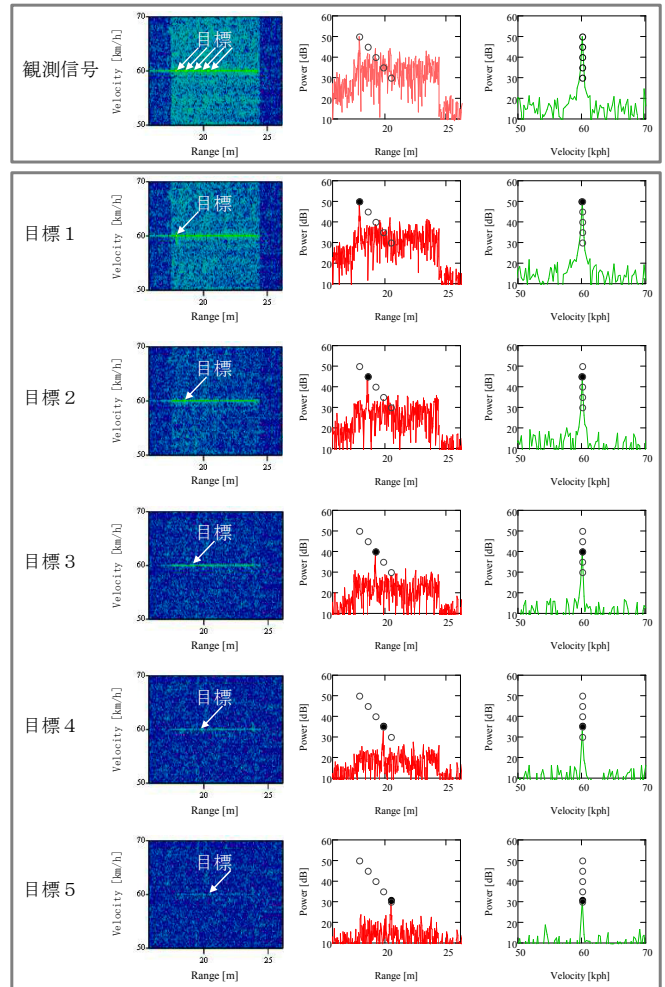


図 9. 等速度 5 目標の自動検知結果

### 3.4. 等速度 5 目標の自動検知

目標距離 19.2m、速度間隔 5km/h の 5 目標とし、各目標の振幅差を 5dB としたとき (表 3) の、再帰的信号減算周波数推定法による等距離 5 目標の検知結果を図 10 に示す。白丸は目標距離・速度の真値を示し、黒丸は検知した値を示す。受信フィルタ特性は、12 次、帯域幅 95% の Butterworth フィルタとした。

表 3. 等距離 5 目標の目標条件

目標条件 2	距離 (m)	速度 (km/h)	入力 SN (dB)
目標 1	19.20	55.0	44
目標 2	19.20	57.5	34
目標 3	19.20	60.0	24
目標 4	19.20	62.5	14
目標 5	19.20	65.0	4

観測信号において、目標 5 は、振幅が最も大きい目標 1 の約 35dB サイドローブフロアに埋もれているが (図 10 右)、再帰的信号減算周波数推定法により振幅順に目標を検知し減算することで、埋もれた小振幅の信号を検出できている。

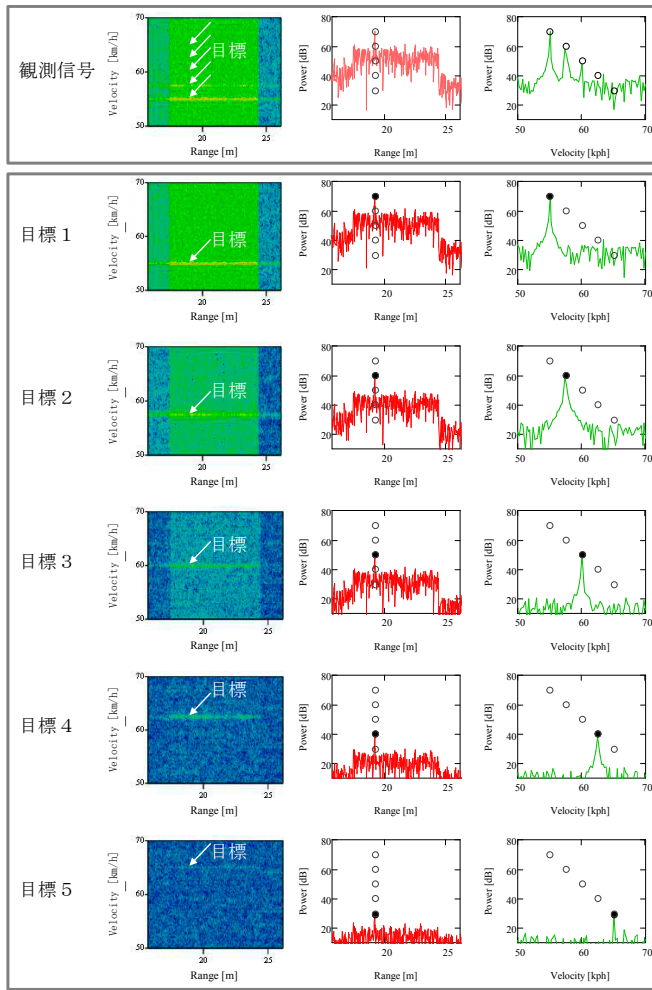


図 10. 等距離 5 目標の自動検知結果

### 3.5. 目標距離推定精度

図 10 に、等速の同振幅 5 目標（距離差 16cm）条件における目標推定精度の RMSE と CRLB（Cramer-Rao Lower Bound）の比較を示す。合成帯域入力 SN が 0dB 以上では、RMSE が CRLB とほぼ一致している。

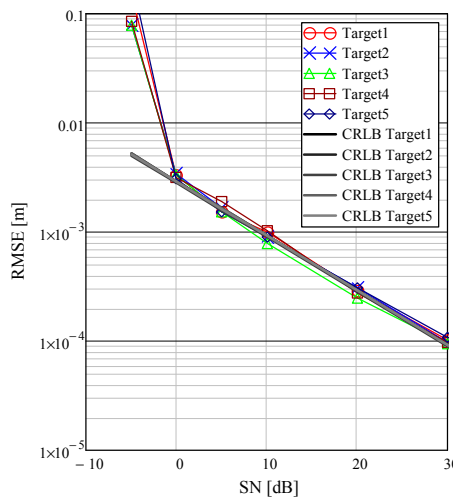


図 10. 超広帯域多周波ステップ CPC 方式の合成帯域入力 SN に対する RMSE

## 4. まとめ

本稿では、多周波ステップ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、速度視野の低下を周波数ステップのランダム化により改善し、距離視野の低下を周波数ステップ間隔のスパース化によって改善した。また、再帰的信号減算周波数推定法に基づく自動検知により振幅の大きな目標のサイドローブフロアに埋もれた振幅の小さな目標を自動検知できることを示した。

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] 稲葉, 多周波ステップ ICW レーダによる多目標分離法, 信学論(B), vol. J89-B, no.3, pp.373-383, 2006
- [2] 福島, 稲葉, 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, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.9, pp.1-9, 2008
- [3] 稲葉, 福島, 多周波ステップ ICW レーダによる距離・角度の超分解能推定法, 信学論(B), vol. J91-B, no.7, pp.756-767, 2008
- [4] 渡辺優, 稲葉, 多周波ステップ LFM 方式における CMSE 周波数ステップ, 電学論 C, vol.136, no.10, pp.1454-1459, 2016
- [5] 渡辺優, 秋田, 稲葉, 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
- [6] 渡辺優, 秋田, 稲葉, 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, 電学論 C, Vol.135, No.5, pp.513-520, 2015
- [7] 山下, 渡邊俊, 稲葉, 複合シーケンス多周波 CW による速度視野拡張, 信学技報 SANE2013-42, 2013
- [8] 秋田, 渡辺, 山下, 渡辺優, 稲葉, 多周波 CW 方式における速度・距離視野拡張法, 電学論 C, Vol. 136, No.4, pp.532-541, 2016
- [9] 太田, 秋田, 稲葉, 広帯域多周波ステップ CPC 方式における圧縮センシングを用いた速度視野改善法, 2018 年電子情報通信学会総合大会, B-2-38, 2018
- [10] 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 SANE2017-14, vol. 117, no.107, 2017
- [11] 芝, 太田, 秋田, 稲葉, 広帯域多周波ステップ CPC 方式レーダにおける周波数ステップランダム化による速度視野拡大効果の統計的確認, 2017 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-2-7, 2017
- [12] 渡邊, 山下, 稲葉, 2 つの初期周波数を用いた多周波 CW 方式の検討, 信学技報 SANE2012-130, 2013
- [13] 山田, 木村, 秋田, 稲葉, 圧縮センシングによるスパース多周波ランダムステップ CPC の距離アンビグエティ抑圧効果の統計的評価, 2018 年電子情報通信学会総合大会, B-2-37, 2018
- [14] 秋田, 廣瀬, 渡辺優, 稲葉, 多周波ステップ CPC 方式における目標自動検知法の検討, 信学技報 SANE2017-13, vol. 117, no.107, 2017
- [15] 芝, 廣瀬, 太田, 秋田, 稲葉, 多周波ランダムステップ CPC レーダにおける電力差の大きい等レンジ目標分離のための信号降順減算による目標自動検出法, 信学技報 WBS2017-76, vol. 117, no.346, 233-238, 2017
- [16] 山口和樹, 渡辺一宏, 秋田学, 稲葉敬之, "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, 2018/10
- [17] 渡辺一宏, 秋田学, 稲葉敬之, "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, 2018/10