

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

芝 隆司† 廣瀬 太亮† 太田 裕也† 秋田 学† 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: shiba.takashi@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし 多周波ステップ CPC 方式レーダの広帯域化による速度視野低下を抑えるため、ステップ周波数のランダムステップ化を検討している。この方式により、速度視野が拡張できる（既報）一方で、最小間隔のフルサンプリングでの速度推定（PD:FFTによるパルスドップラフィルタ）に比べると速度方向サイドローブの上昇は避けられない。しかし、レーダー反射断面積（Radar cross-section, RCS）の比で約 20dB 程度の差であれば、同一レンジの 2 目標分離も十分期待されることをシミュレーションによる統計評価にて示した。本稿では、より RCS 差の大きい目標を検出しそれぞれ距離推定を可能とする方法として、信号降順減算による目標自動検出法を適用し、計算機シミュレーションによりその有効性を示す。

キーワード 多周波ステップレーダ, ランダムステップ周波数, 目標検知, 信号減算

Same Range Target Detection with Large RCS Difference by Signal Descending Order Subtraction Target Detection Method for Multiple Frequency Random Stepped CPC Radar

Takashi SHIBA† Daisuke HIROSE† Yuya OTA† Manabu AKITA† and Takayuki INABA†

Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications 1-5-1 Chofugaoka,

Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: shiba.takashi@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract Random step frequency had been already studied to enlarge maximum detection velocity for multiple frequency stepped radar with complementary phase code. Wide maximum detection speed can be obtained by this random step frequency method, however, sidelobe increasing of velocity direction can not be avoided as comparing with minimum sampling time Pulse Doppler filter. We had studied that this sidelobe increasing is not effective for 2 targets in the same range with the lower radar cross section (RCS) difference than 20 dB. Targets separation method in the same range with the larger radar RCS difference by signal descending order subtraction method was reported in this paper.

Keywords multiple frequency stepped radar, random step frequency, target detection, signal subtraction

1. まえがき

多周波ステップ CPC (Complementary Phase Code) 方式 [1] の、広帯域化に伴う速度折り返し効果による速度視野減少の問題を、我々は、周波数ステップのランダム化 [2] [3] により改善できる事 [4] を示した。シミュレーションにより得られた速度方向のサイドローブは

サイドローブ電力とピーク電力の比で約 35dB であった。このサイドローブ電力比では、同一レンジビンに存在する異なる速度の 2 目標が存在し、例えば、それぞれの RCS (Radar cross-section) の比が 20dB (例えば車と人) であれば、ほぼ分離した目標と捉える事が可能 [5] と考える。しかし、それ以上の目標 RCS 比を持つ物体を分離する事は難しい。一方、呼吸計測等の応用において CW 信号を対象とし

たCA(Cyclic Algorithms)/RELAX 減算法が提案されている。我々は、レーダ変復調の一つである等価サンプリング符号変調波（およびFMCW波）に対し、信号減算による近接目標の分離法を提案[6]し、さらに、近年開発を進めている多周波ステップCPCレーダに、同様の信号の降順減算に基づく手法も報告[7]している。

本報告では、上記信号繰り返し信号降順減算による目標自動検出法を広帯域ランダム周波数ステップCPC方式に適用し、同一レンジ（距離）で高いRCS差を持つ目標の分離を試みる。

本報告の目的を達成するためには、他に順次周波数ステップ型でAmbiguity関数を求める方式、他の周波数コンポーネントを変換して1つの周波数の情報を増して周波数方向にサイドローブを形成させない方法等が考えられるが、今回は、上記信号繰り返し信号降順減算による目標自動検出法による信号減算方式の適用性に関して報告する。

2. 多周波ステップCPC方式レーダと広帯域化の課題

図1は多周波ステップCPC方式レーダの送信シーケンスと、その応用RF回路例を示している。キャリア周波数はステップ毎に変更され、それぞれの周波数でCPC符号を送信している。受信側での復調用キャリアも送信と同じ周波数としており、そのため、ベースバンドの帯域は、1つのステップ周波数帯域幅となり、比較的狭帯域な信号処理回路となる。そのため、雑音域も

RF帯域全体を復調する場合に比べ小さい。図2はベースバンド信号の受信信号処理フローを示している。先ず各CPC符号の自己相関特性により、信号をパルス圧縮し、その後、同一PRI信号（繰り返し信号の同一応答信号部分）のパルスドップラー処理により、周波数（速度）方向に分離し、次に位相補償、相補関係CPC相関出力の加算を行い、サイドローブフリーの相関信号を得て、最後に、多周波信号を合成する事でよりレンジ（距離）方向分解能を上げた信号が得られる。

この方式の特徴は、上記のように瞬時周波数帯域が狭いため、雑音を抑える事ができ、従って信号検知限（距離視野）の拡大が可能であり、また、ステップ周波数を拡大する事でよりレンジ分解能を上げる事ができるという利点を有している。そこで我々は、79GHz帯の周波数帯域が拡大された事を念頭に、ステップ数拡大による同方式の広帯域化を検討している。

この広帯域化を、従来と同様に順次にステップ周波数を上げる（あるいは下げる）方式で行う事とすると、図3に示すように、速度視野を上げる事ができない。

速度視野 $\pm V_{max}$ は、

$$V_{max} = \frac{\lambda}{4T_i} \quad \text{-----(1)}$$

と表される。ここで、 λ はキャリア周波数でのレーダ送信波の波長、 T_i は同一周波数のパルス周期であり、順次周波数ステップ方式の場合では T_i は T_{pi} （周波数ステップ時間）となる。従って、速度視野 V_{max} は、

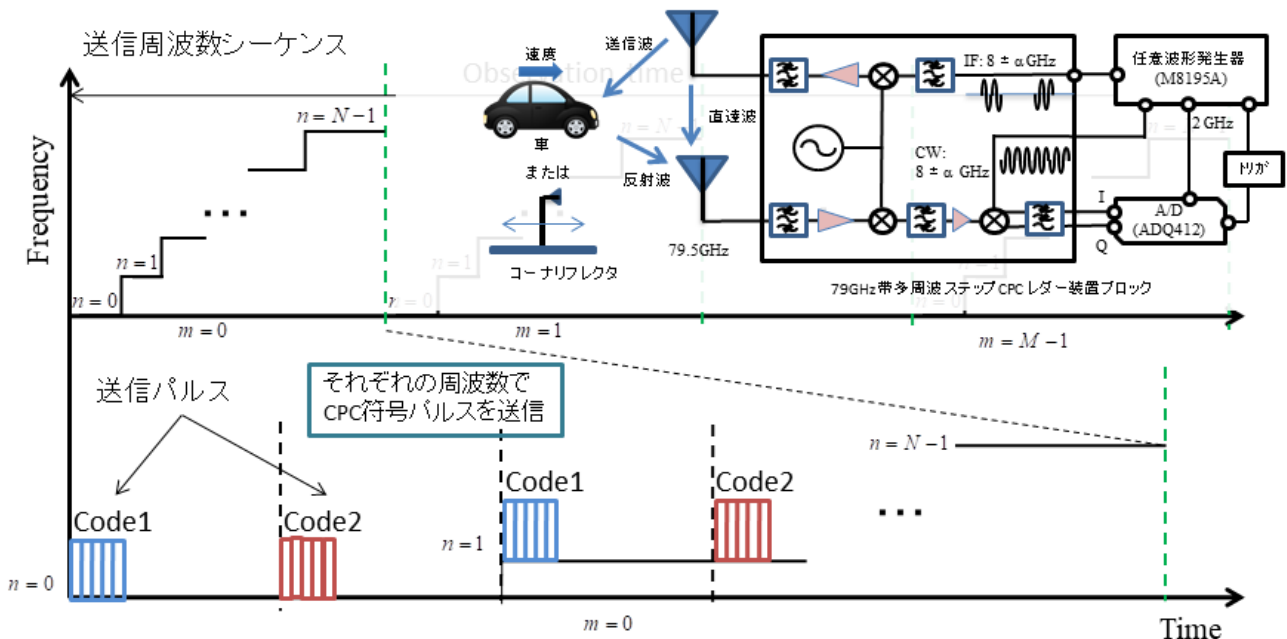


図1 多周波ステップCPC方式レーダの送信シーケンスとRF回路例

$$V_{\max} = \frac{\lambda}{4T_{fr}} \quad \text{-----(2)}$$

となる．この式に従うと，例えば，周波数ステップ数を4倍とすれば，速度視野は1/4となる事が分かる．

図4は順次ステップ型の多周波ステップCPC方式の周波数（速度）方向特性を，速度視野を従来と同等に広げて観測した結果である．位相の折り返しによる繰り返し信号が発生し，順次周波数ステップを増加（あるいは減少）させる方式では，従来と同等の速度視野が得られない事が分かる．

この問題を，我々は，次に示すように，周波数ステップをランダム化させる事で解決した．

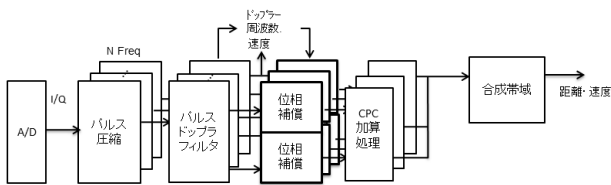


図2 多周波ステップCPC方式レーダの信号処理フロー

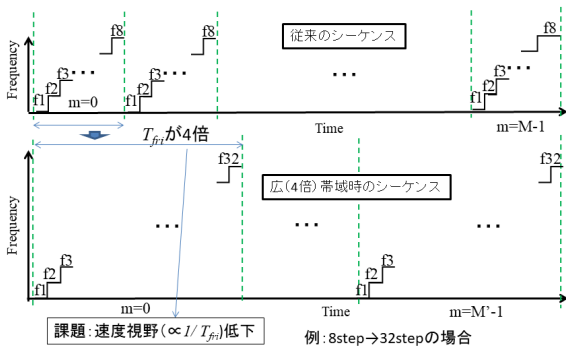


図3 多周波ステップCPC方式レーダの広帯域時の課題

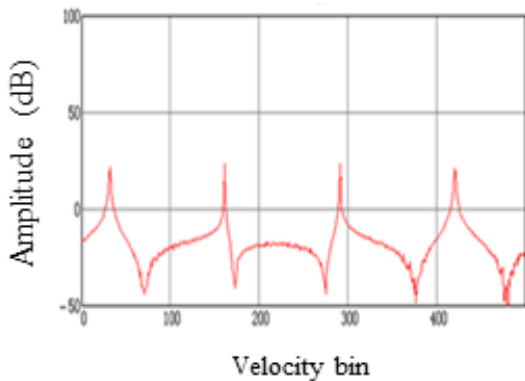


図4 通常（順次）ステップ周波数広帯域CPC方式レーダ速度方向特性例

3. 周波数ステップランダム化による速度視野の改善と課題

この問題を我々は，ステップ周波数をランダム化する事で解決した．図5は周波数ステップのランダム化を模式的に示したものである．パルスの最低周期は図に示したように隣り合うパルスの時間差，即ち $2T_{pri}$ となる．従って周波数ステップをランダム化した場合，前述の T_i は $2T_{pri}$ となる．ここで， T_{pri} はパルス間周期で

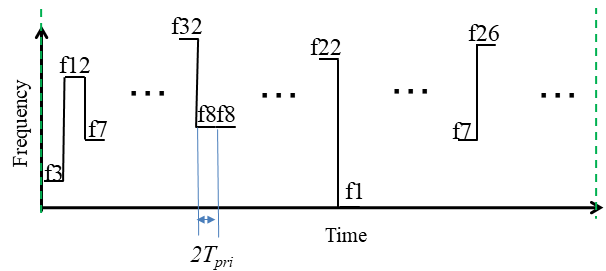


図5 ランダムステップ周波数CPC方式レーダの送信周波数イメージ

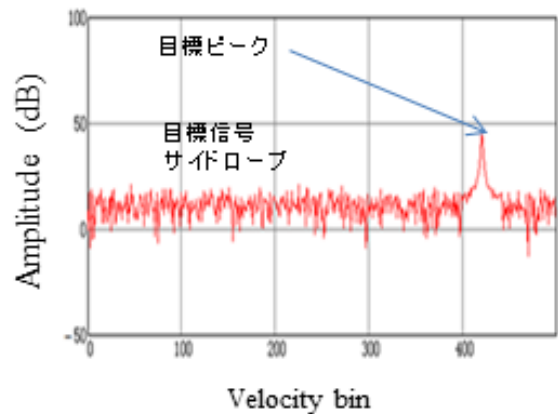


図6 ランダムステップ周波数広帯域CPC方式レーダの速度方向特性例

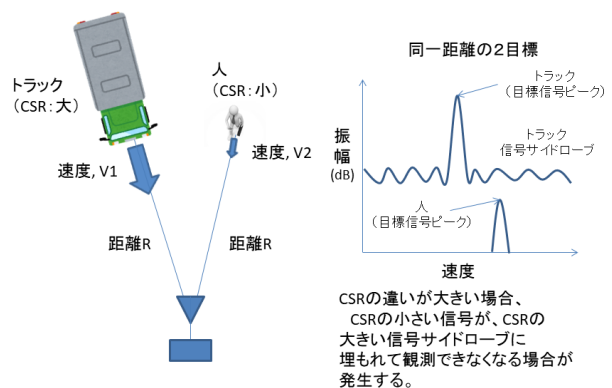


図7 ランダムステップ周波数広帯域CPC方式レーダにおける同一レンジ目標認識の課題

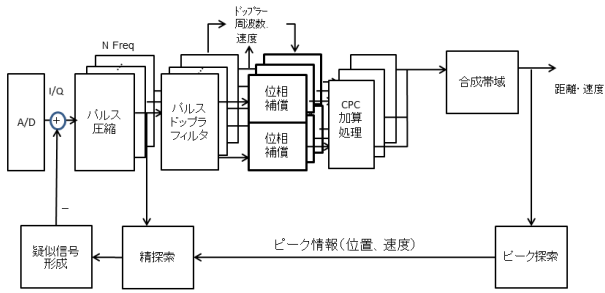


図8 ランダムステップ周波数方式の同一レンジ
目標認識の課題解決のための目標信号減算方式

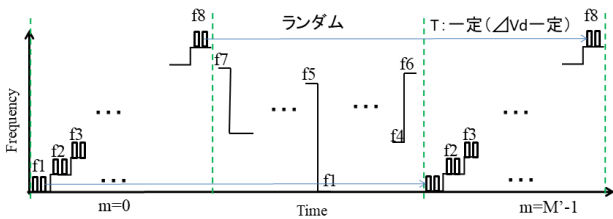
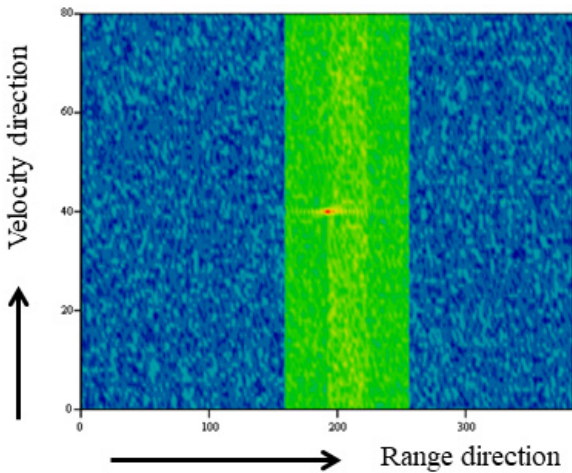
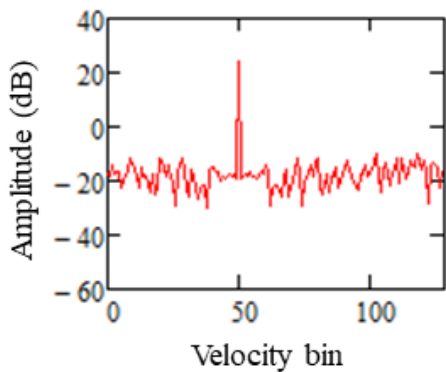


図9 各周波数での速度分解能一定化の一方法



(a) R-V マップ



(b) 速度方向特性

図10 1目標データの初期出力データ

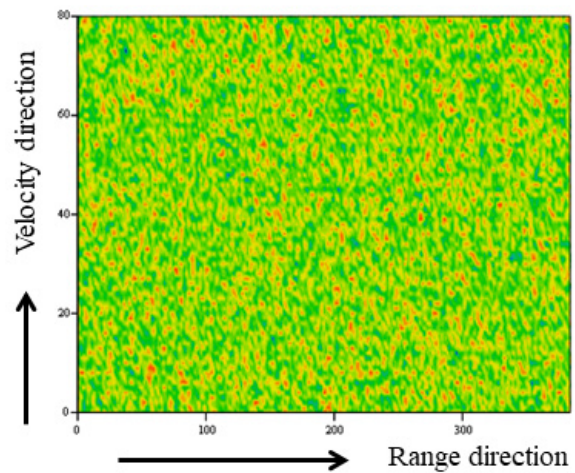
あり、CPC 符号が2符号の場合は、2符号のパルス列間の時間である。結果として、速度視野 V_{max} は、

$$V_{max} = \frac{\lambda}{4(2T_{pri})} \quad \text{----- (3)}$$

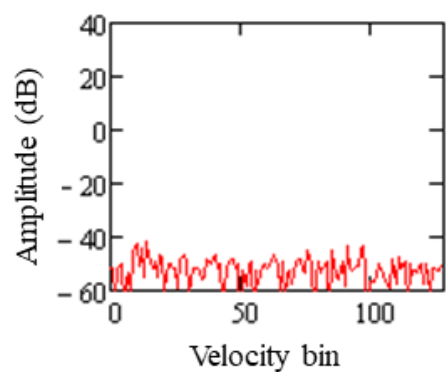
となり、速度視野の改善が期待される。

図6が得られた結果で、目標が有るBinの周波数(速度)方向特性を示している。従来と同等以上の速度視野特性が得られている。(3)式によれば、キャリア周波数79.5GHz、 $T_{pri}=3.5\mu s$ とすれば、 $\pm 485\text{km/h}$ の速度視野となる。

しかし、図から分かるように、従来に比べサイドローブの上昇が見られる。我々はこの問題を統計的に検討した結果、同一レンジ内の2(あるいはそれ以上)目標の認識が、RCS差20dB程度であれば統計的にも認識可能である事を見出ししている。しかし、図7に示したように、大きなトラックと人のように、RCS差が40dB程度もあるような状況では、図示したように、RCSレベルの小さい目標は、RCSが強い目標のサイドローブ



(a) R-V マップ



(b) 速度方向特性

図11 1目標データの1目標目の減算後出力データ

に埋もれ、検知する事が出来ないと予想される。

以下、この課題に対する目標信号の信号降順減算による目標自動検出法の適用方法に関して検討した結果を記載する。

4. 目標信号順次減算法による課題解決

前述の RCS 差の大きい同一レンジ 2 目標分離の課題を、我々は、図 8 に示すように目標信号を順次減算する事で、目標ピークと共に、そのサイドローブを減算し、サイドローブに埋もれている第 2 目標を検出しようと考えた。この目標信号の信号降順減算による目標自動検出法は、CA/Relax 等の方法で行う事が可能である事を既に報告 [7] している。ここでは、この手法を、前述の広帯域ランダム周波数ステップ CPC レーダに適用する事を検討した。

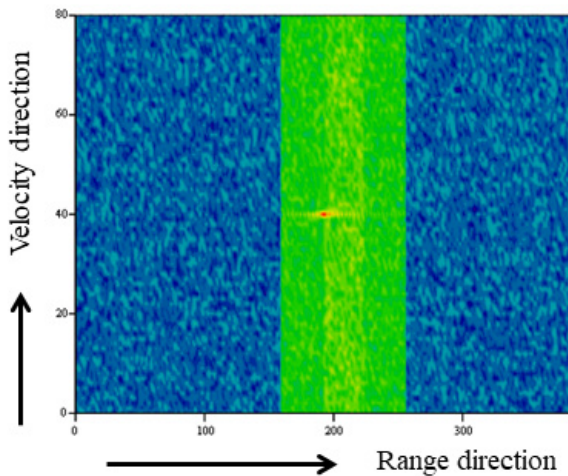
5. ランダムステップ法への CA 減算方式の適用結果

計算条件は、ランダム周波数ステップ CPC レーダへの、上記減算方式の有効性確認のための 1 目標に対する条

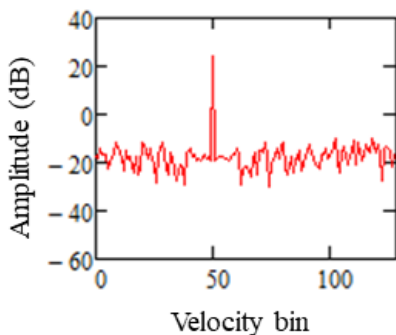
件と、本研究の目的である 2 目標の条件で行った。目標設定は、前述の条件を考慮し、1 目標目と 2 目標目の目標信号レベル差は 40dB とした。目標のレンジビンは帯域合成後で 192 ビン、1 目標目の速度ビンを 50 ビン、2 目標目を 70 ビンと設定した。

レーダのキャリア中心周波数は 79.5GHz、受信 A/D クロックは 160MHz、CPC 符号長は 16 チップとした。また、信号と雑音の電力比 $S/N=20\text{dB}$ とし、周波数ステップ数 $N=32$ 、周波数ステップは、図 9 の方式とし、信号全体の周波数繰り返し数を $N*M$ と考えると $M=128$ とした。ここで、 M は従来の順次ステップでは、同一周波数の繰り返し数となるが、ここでは周波数ステップがランダムであるため、上記の繰り返し数全体を N で割ったものと定義する事とした。計算は、本減算法が同一レンジビンの 2 目標に適用可能かどうかを確認する事が目的であるため、本検討は CA 法で行った。

図 10 は 1 目標の場合の、第 1 目標減算前の信号に対する R-V マップとピークで切り出した、速度方向の特性である。(a) が横軸レンジ方向、縦軸速度方向の R-V マップ、(b) がその R-V マップのピーク点を同一レンジビンで切り出した、速度方向特性である。以下

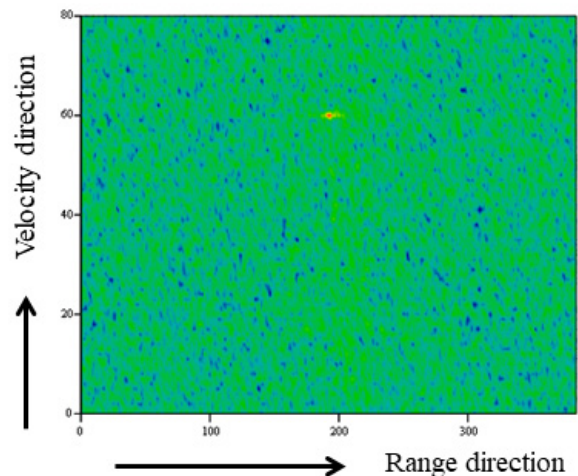


(a) R-V マップ

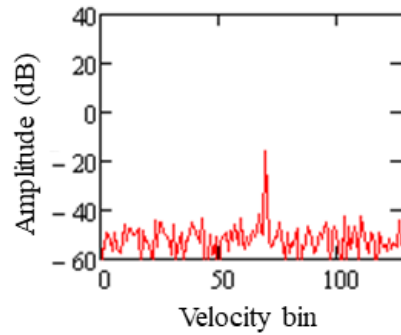


(b) 速度方向特性

図 1 2 2 目標データの初期出力データ



(a) R-V マップ



(b) 速度方向特性

図 1 3 2 目標データの 1 目標目の減算後出力データ

の図 1 1～図 1 4でも同様に、(a)は横軸レンジ方向、縦軸速度方向のR-Vマップ、(b)は速度方向特性である。R-Vマップはピーク点近傍を拡大したもので、レンジビン、速度ビン全体を表記したものではない。上記1目標目の信号ピーク及びサイドローブが観測されている。図 1 1は、1目標目の信号減算結果である。1目標目の信号は、雑音以下となり、本減算手法ランダム周波数ステップ法への適用効果を確認する事が出来た。

図 1 2は2目標信号に対する、初期出力結果である。第1目標を観測する事は可能であるが、2目標目は第一信号のサイドローブに埋もれ、この状況では検出する事が難しい。図 1 3は第1目標信号減算後の信号に対するR-Vマップとピークで切り出した、速度方向特性である。1目標目の信号ピークとサイドローブは減算処理により抑圧され、2目標目の信号ピークが検出されている。図 1 4は2目標目の信号減算後の特性であり、2目標目も減算により雑音レベル以下とする事ができた。

本報告では、2目標までを報告したが、本手法は、原理的に目標数の限定は無く、3目標以上の場合にも有効であると考えられる。

6. まとめ

周波数ステップのランダム化により速度視野問題に対処し、速度方向サイドローブ（電力アイソレーション）の低下という課題に対し、距離で分離できない電力差の大きい異なる速度の目標が共存する状況において、信号降順減算自動検知法により目標検出ダイナミックレンジの拡大が可能であることを示した。即ち、±485km/hにおよぶ広い速度視野を備え距離にもアンビギュイがない多周波ステップCPC方式の一つの有望な処理構成法となる可能性がある事を示した。

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。

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] 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 IEEE 2017 Radar Conference, pp. 129-134, 2017

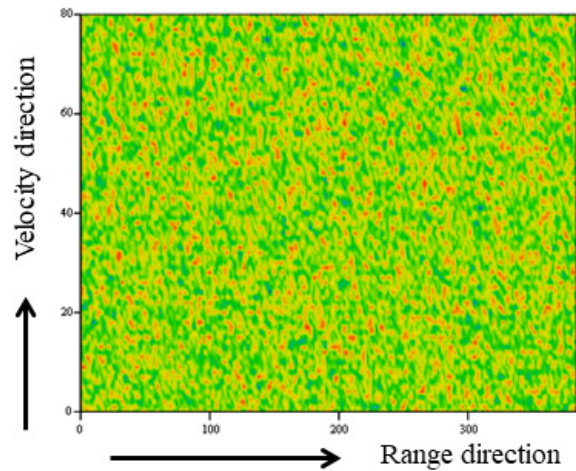
[3] 太田裕也, 秋田学, 渡辺優人, 稲葉敬之, ”広帯域多周波ステップCPCレーダの実験的検証と速度視野改善”, 信学技報 IEICE-SANE2017-14, 2015

[4] 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”, 信学技報 IEICE-SANE2017-14, 2015

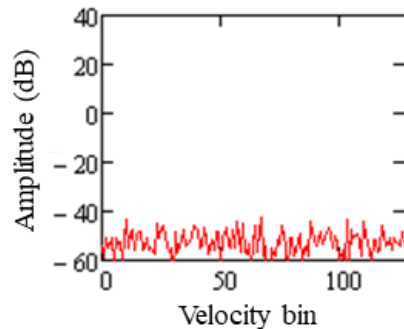
[5] 芝隆司, 太田裕也, 秋田学, 稲葉敬之, ”広帯域多周波ステップCPC方式レーダにおける周波数ステップランダム化による速度視野拡大効果の統計的確認”, 2017年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-2-7, 2017

[6] 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

[7] 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”, 信学技報 IEICE-SANE2017-13, 2017



(a) R-V マップ



(b) 速度方向特性

図 1 4 2 目標データの 2 目標目の減算後出力データ