

多周波ステップ CPC レーダによる小落下物検知

稲葉敬之, 秋田学, 芝隆司†

†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 空港滑走路上のボルト等の落下物は、航空機の離発着における直接的かつ重大な危険要因である。この落下物検知のためにレーダを用いた検出システムの開発も進められている。レーダによる小物体検知では、高い S/C (信号対クラッタ比) が得られることが重要である。筆者らはこれまでに、射影変換による車載レーダにおける干渉波抑圧法を提案しており、小物体検知に上記手法が有効であると考えられる。これまでレーダを用いた空港滑走路上の落下物検知の研究例では FMCW 方式が採用されている。FMCW 方式のビート周波数には、環境信号に滑走路外からの移動物等の信号の混信が避けられずクラッタ抑圧のための P 行列推定精度の劣化につながる。一方で、筆者らが提案する多周波ステップ方式は、パルスドップラフィルタを備え (すなわち周辺移動物等との信号の混信がない)、かつ狭受信機帯域幅で高距離分解能が得られることから上記提案法との適合性に優れていると考えられる。以上より、本稿ではレーダ変調方式として、多周波ステップ CPC 方式を採用し、地面クラッタ環境下における小物体検知応用に対する有効性についてフィールド実験結果を考察する。

キーワード 多周波ステップレーダ, クラッタ, 射影変換, FMCW レーダ, 落下物検知

Foreign Object Debris Detection based on Stepped Multiple Frequency CPC

Takayuki INABA, Manabu Akita, Takashi Shiba †

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

1-5-1 Choufugaoka, Choufu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: inaba@ee.uec.ac.jp

Abstract Foreign Object Debris (FOD) on the airport runway are possible to be serious risk for aircrafts. Detection system by using radar is being developed. For small object detections, it is important to obtain high S/C (Signal to Clutter) ratio. Authors have proposed an interference wave suppression method for automotive radar by using projection transform. It is considered to be effective for small object detection. FMCW radar modulation has been generally adopted for FOD detection on the airport runway. In the beat frequency of FMCW, interference signals such as from moving objects outside the runway contaminates the environment signal (reference signal) that is used to estimate P matrix for clutter suppression. On the other hand, the stepped multiple frequency pulse modulation proposed by the authors has a pulse Doppler filter (PDF), which enable us to avoid interference of signals from moving objects. That is why the proposed modulation is considered to be suit to the projection transform to suppress the clutter signals. In this article, stepped multiple frequency CPC is adopted as the radar modulation. The field experiment results are conducted to verify the proposed method for FOD detections.

Keywords Stepped Multiple Frequency Pulse Radar, Pulse Compression, FMCW, Foreign Object Debris Detection

1. まえがき

道路交通における落下物検知は安全な自動運転等の実現における課題の一つである。また、空港滑走路上のボルト等の落下物は、航空機の離発着における直接的かつ重大な危険要因である。この落下物検知のためにレーダを用いた検出システムの開発も進められている [1][2]。レーダによる小物体検知では、高い S/C (信号対クラッタ比) が得られることが重要である。ここで、信号とはレーダの分解能より小さい落下物である。クラッタは落下物の背景である地面からの反射であり、その大きさは地面の単位面積あたりの反射率とともにレーダのアジマスビーム幅、およびエレベーションビーム幅または距離分解能で決まる。ビーム幅はアンテナ規模で決まるが、実用上過度に大きなアンテナでな

いことが望ましい。一方、距離分解能は、送信周波数帯域幅で決まる。上記の通り、ビーム幅や距離分解能を高めることが有効であるが、さらに小物体が落下する以前の環境信号をあらかじめ取得しておき、逐次その環境信号を減算することで、地面反射というクラッタに埋もれた小落下物の検知能力向上が期待される。筆者らはこれまでに、上記「信号減算」に基づく目標信号の抽出手法の研究・開発に取り組んで来た。具体的には、注目目標信号以外の不要波信号(環境信号)の相関行列計測を既知条件とした MSN(Maximum Signal to Noise ratio), もしくは OP(Orthogonal Projection)に基づく射影変換による車載レーダにおける干渉波抑圧法を提案している [3]。また、射影変換を用いた周波数推定法については、FMCW 方式における

呼吸・心拍計測応用において、呼吸・心拍に伴う微小なビート周波数に環境信号（周辺静止物）が重畳した信号から環境信号の信号空間を減算することで微弱な生体信号を計測可能とすることを示した[4]。小物体検知に上記手法は有効である。環境信号を有効に減算するために、環境信号の信号相関行列 R を推定しその逆行列 P を検知対象データに作用させることで減算を実現する。逆行列 P は相関行列 R の固有展開を行い信号固有値に対応する固有ベクトルから求めることができる。すなわち、検知対象データのみならず環境信号においても S/N （信号対受信機雑音比）が高い計測が可能であることが、高精度で P 行列を推定し有効な地面クラッタ抑圧を可能とする。

これまでレーダを用いた空港滑走路上の落下物検知の研究例が報告されており、レーダの変調方式として FMCW 方式が採用されている[5]。FMCW 方式では、狭帯域受信機帯域（すなわち高 S/N ）で高い距離分解能を得ることができるが、FMCW 方式のビート周波数には、目標の距離と速度に関する成分が含まれて計測される。それゆえあらかじめ取得する環境信号に滑走路外からの移動物等の信号の混信が避けられず、クラッタ抑圧のための P 行列推定精度の劣化につながる。周辺移動物からのドップラ信号の混信に対して、パルスドップラフィルタにより分離することが望ましいため、パルス方式やパルス圧縮方式が望ましい。パルス方式では探知距離性能、パルス圧縮方式では少物体検知のために数 GHz に及ぶ信号帯域幅を用いる必要があり、パルス圧縮では A/D 変換器（10GHz 以上、16Bit 以上）への要求が高すぎて実現が困難である。一方、筆者らが提案する多周波ステップ方式[6]は、パルスドップラフィルタを備え、かつ狭受信機帯域幅（すなわち A/D 変換機への要求が小さいかつ優れた探知距離性能）で高距離分解能が得られることからより適合性に優れていると考えられる。

以上より、本稿ではレーダ変調方式として、多周波ステップ CPC 方式を採用し、地面クラッタ環境下における小物体検知応用に対する有効性について考察する。2 章で提案法の概要を説明する。3 章では 60GHz で開発済みの多周波ステップ CPC レーダ[7]を用いた検証実験の結果を示す。4 章では、実験結果に対する考察を示す。

2. 多周波ステップ CPC レーダを用いた直交変換法による小落下物検知

2.1 多周波ステップ CPC 方式による小落下物検知法信号処理ブロック図

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(a)に送信シーケンスを示す。図 1(b)に同方式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方式と同様、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、ドップラによる位相回転を補償する処理、CPC の加算処理を行う。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。

2.2 多周波ステップ CPC 方式による小落下物検知法における信号処理

2.2.1 パルス圧縮

A/D 変換後の受信信号を各 CPC 符号系列 ($code=0,1$)、各周波数ステップ ($n=0,1,\dots,N-1$)、各パルス ($m=0,1,\dots,M-1$)、各レンジビン ($s=0,1,\dots,S-1$) に分割された受信信号 $R[code,n,m,s]$ に対して参照信号 $Ref[s]$ （送信パルス波の時間反転複素共役）による畳み込み（パルス圧縮）を行う。

$$PC[code,n,m,s] = \mathfrak{I}^{-1}(\mathfrak{I}(R) \cdot \mathfrak{I}(Ref)) \quad (1)$$

2.2.2 パルスドップラフィルタ

式(1)より PRI 毎に得られるパルス圧縮出力に対して、パルスヒット方向にフーリエ変換を施す。

$$PD[code,n,m,s] = \sum_{k=0}^{M-1} PC[code,n,m,s] \cdot \exp\left(-2\pi j \cdot \left(\frac{m}{M}k\right)\right) \quad (2)$$

2.2.3 位相補償と CPC 加算処理

距離サンプル信号に対し、ドップラによる位相回転を補正する位相補償 (Phase Compensation) 処理を行う。

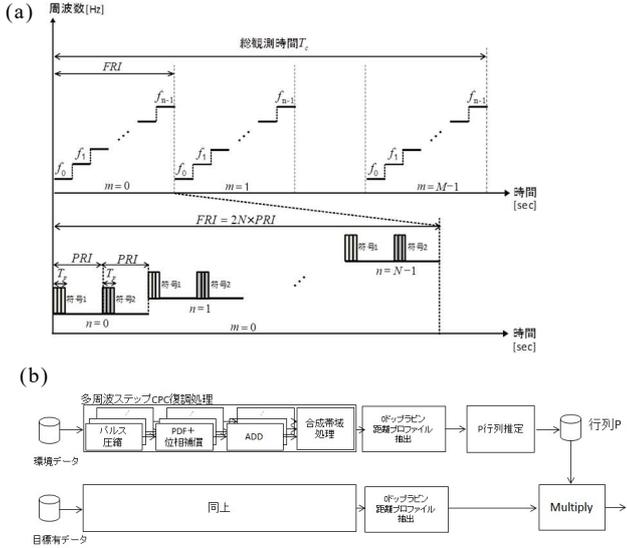


図 1. 多周波ステップ CPC 方式 ((a)送信シーケンスおよび (b)信号処理ブロック図)

$$PHC[code, n, m, s] = PD \cdot \exp\left\{2\pi j \frac{m}{2MN \cdot PRI} (s + PRI \cdot (2n + code))\right\} \quad (3)$$

周波数ステップ毎に得られる速度・距離マップについて CPC 符号系列の和をとる (CPC 加算処理).

$$ADD [n, m, s] = \sum_{code=0}^1 PHC [code, n, m, s] \quad (4)$$

式(8)および式(9)より, ドップラ位相補償を備える CPC 符号のパルス圧縮より優れた距離サイドローブ特性をもつレンジプロファイルが得られる.

2.2.4 合成帯域処理

CPC 加算処理後の距離サンプルについて周波数ステップ方向 n に合成帯域処理 (n 方向に IDFT) を行う.

$$SWW [m, s'] = \sum_{n=0}^{N-1} ADD [n, m, s] \exp\left(j \cdot \left(\frac{4\pi \cdot s' \cdot \Delta R}{c} n \cdot \Delta f\right)\right) \quad (5)$$

ここで, ΔR は合成帯域後のレンジサンプル幅, Δf は周波数ステップ幅である.

2.2.5 直交射影変換

環境信号に対して合成帯域後に得られる距離-速度マップ (RV マップ) SWW の速度ビン 0 (相対速度が 0) の距離プロファイル $\mathbf{X}_E \in \mathbb{C}^{N_r \times SS}$ とする. ここで, N_r はレンジサンプル数, SS はスナップショット数である. MSN 法の射影行列 \mathbf{P} として相関行列 $\mathbf{R} = \mathbf{X}_E \mathbf{X}_E^H$ の逆行列

$$\mathbf{P} = \mathbf{R}^{-1}$$

を求める. 相関行列 \mathbf{R} は, 環境信号の固有ベクトル

$$\mathbf{R} = \sum_{k=1}^K (\lambda_k - \sigma_n^2) \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}$$

と固有展開表現される. ここで, σ_n^2 は雑音の分散値である. 雑音の分散値を雑音の固有値の平均として,

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{N-K} \sum_{k=K+1}^N \lambda_k$$

から求め, この平均値を σ^2 とおき

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\sigma^2} \left(\mathbf{I} - \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k - \sigma^2}{\lambda_k} \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^H \right)$$

となる. あらかじめ, 環境信号から求めた射影行列 \mathbf{P} を用いて, 計測信号に対して合成帯域後に得られる RV マップの速度ビン 0 の距離プロファイル \mathbf{X} に対して以下に示す演算 (射影変換) を行う

$$\mathbf{Y} = \mathbf{P}\mathbf{X}$$

3. 実験的検証

3.1 レーダ装置とレーダパラメータ

本実験では筆者らの研究グループが開発した表 1 に示すレーダパラメータを採用した多周波ステップ CPC ミリ波レーダ[7]を用いる. 図 2 に実験のセットアップ図を示す.

表 1. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダパラメータ

| Radar Parameters | Specifications |
|----------------------------------|----------------|
| Transmission power | 10mW |
| Transmit frequency | 60.32-60.67GHz |
| Pulse bandwidth | 80MHz |
| Code length | 16 |
| Number of codes | 2 |
| consisting sequence set :CODE | 2 |
| Pulse Repetition Interval (PRI) | 3.5μsec |
| Number of Sequence Repetition: M | 512 |
| Frequency step width | 50MHz |
| Frequency step number: N | 8 |
| Transmission bandwidth | 430MHz |
| Observation time (CPI) | 29msec |
| A/D sampling frequency | 160MHz |
| Detectable Velocity | ±79km/h |
| Velocity Resolution | 0.31 km/h |
| Range Resolution | 0.34m |
| Antenna Beamwidth (Horizontal) | 27deg |
| Antenna Beamwidth (Vertical) | 2deg |

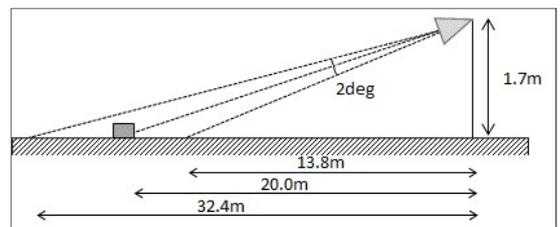


図 2 多周波ステップ CPC ミリ波レーダを用いた実験セットアップ図

3.2 実験セットアップと目標条件

本実験では、ミリ波レーダ RF 部を高さ 1.7m, その俯角を 5 度に設置する。図 3 に示すような屋外フィールド（日本大学理工学部交通総合試験路）において、表 2 に示す欧州とアメリカがそれぞれ定めている空港 FOD 検知のための指標である標準目標（直径と高さがともに 1 インチ）の金属の円柱[8]と図 4 に示すボルトを検知対象とする。なお、実験は両目標をレーダ視線方向に対して横向きに設置する。

3.3 実験結果と考察

図 5 および図 6 に、標準目標およびボルトを検知対象とした計測データに対し、合成帯域後に得られる RV マップの速度ビン 0 の距離プロファイルおよび射影変換後の距離プロファイルをそれぞれ示す。図 5 において射影変換前では、送信波の直達波成分のサイドローブと送信アンテナビーム幅内（13.8m~32.4m）においてクラッタの信号成分が確認される。一方、射影変換後では、直達波成分が最大で約 50dB, クラッタ信号成分が平均で約 9dB 程度の抑圧が確認され、距離 20m に置かれた標準目標の信号成分のピークが確認される。また図 6 においても同様に射影変換前では、送信波の直達波成分のサイドローブと送信アンテナビーム幅内においてクラッタの信号成分が確認される。一方、射影変換後では、直達波成分が最大で約 50dB, クラッタ信号成分が平均で約 9dB 程度の抑圧が確認され、距離 20m に置かれたボルトの信号成分のピークが確認される。



図 3 日本大学理工学部交通総合試験路におけるミリ波実験レーダを用いた落下物検知実験風景

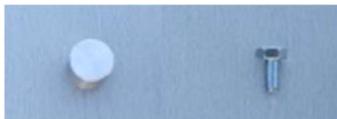


図 4 本実験における目標の写真（左：標準目標，右：ボルト）
表 1 本実験における目標条件

| 検知対象 | 距離 | 直径 | 長さ | 形状 |
|------|-------|--------|--------|--------|
| 標準目標 | 20.0m | 2.54cm | 2.54cm | 円柱 |
| ボルト | 20.0m | - | 2.50cm | 図 4 参照 |

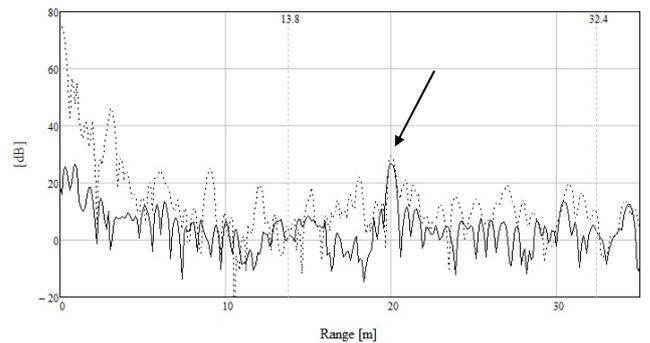
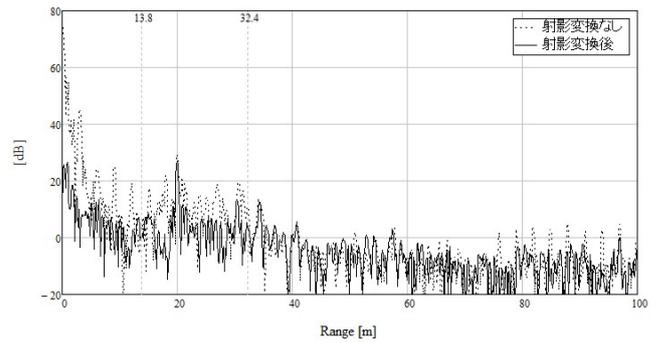


図 5 標準目標の計測データの距離プロファイル ((a)距離 0~100m の距離プロファイル, (b)距離 0~35m の距離プロファイル)

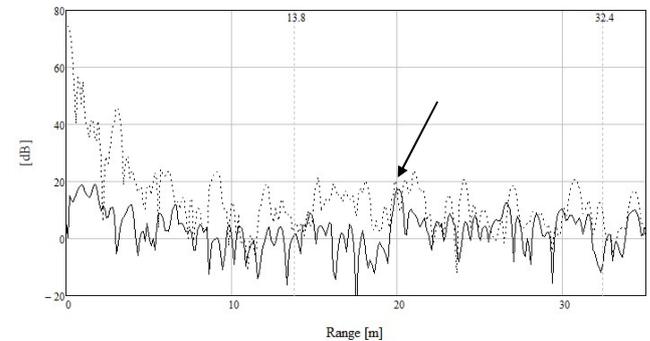
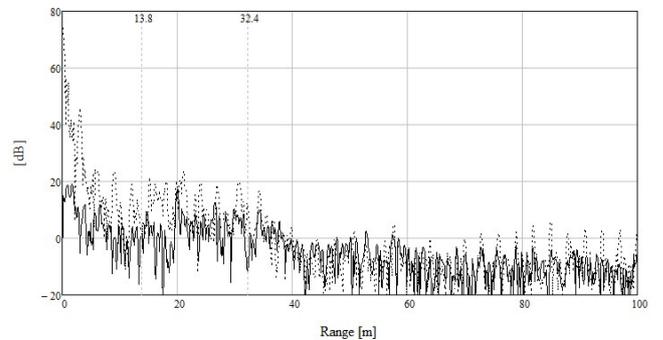


図 6 ボルトの計測データの距離プロファイル ((a)距離 0~100m の距離プロファイル, (b)距離 0~35m の距離プロファイル)

4. 考察

図 7 に、環境信号の合成帯域後 RV マップの速度ビン 0 の距離プロファイルを示す。図 7(b) から、漏れ込み信号のサイドローブ領域では、各スナップショット間で、振幅および位相が揃っていることが確認される。一方で、ミリ波レーダのビーム幅に対応する距離領域 (13.8m-32.4m) では、振幅および位相がスナップショット間でばらつきが確認される。図 7(c) に同領域における拡大図を示す。図 7(c) から、各スナップショット間の絶対位相にはばらつきが見られるが、相対位相 (レンジサンプル間の傾き) は一定であることがわかる。図 8 に、環境信号の合成帯域後 RV マップの速度ビン 0 の距離プロファイル X_E の相関行列の固有値分布を示す。図 8 から、3 個の主要固有値が確認される。速度ビン 0 の距離プロファイルにスナップショット間で、上記のような位相と振幅の差異が現れ、それに伴い主要固有値が 3 つ確認されるのは、設置した RF 部の微小な揺れによるものと考えられる。

図 9 に、標準目標の距離プロファイルの射影変換に用いる環境信号の相関行列の固有ベクトルの数を 1 ~ 3 に変化させたときの射影変換後の距離プロファイル

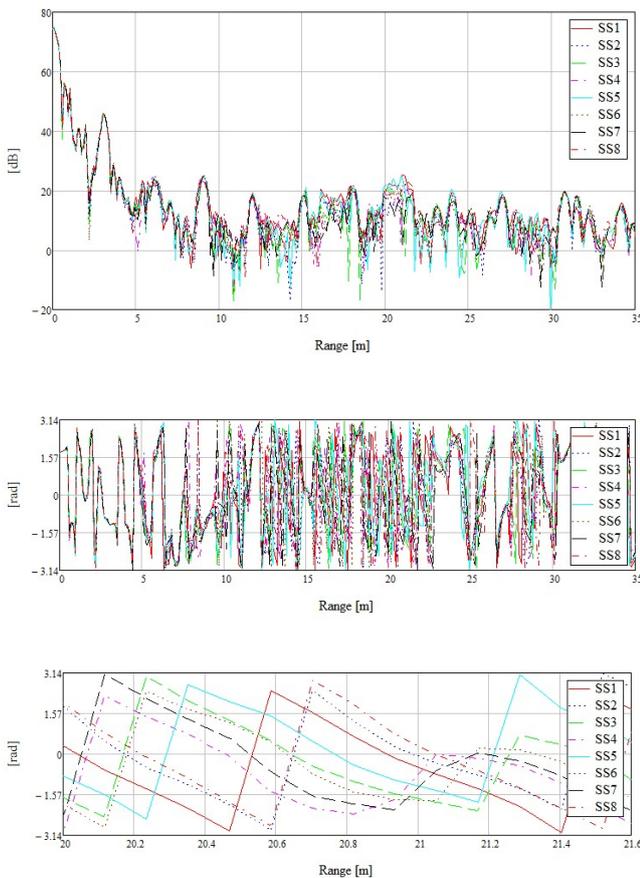


図 7 標準目標の計測データのスナップショット毎の距離プロファイル ((a)振幅, (b)位相, (c)位相拡大図)

を示す。図 9 からわかるように、固有ベクトルの数を 3 としたとき、環境信号がクラッタ信号も含めて抑圧されていることが確認される。

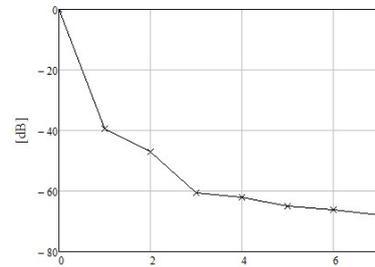


図 8 環境データの固有値分布

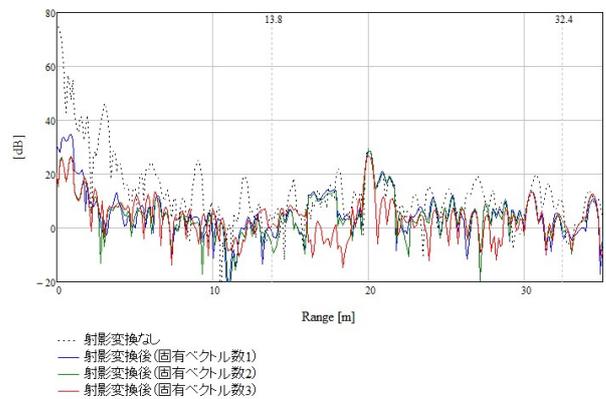


図 9 標準目標の計測データの射影変換に用いる固有ベクトル数を変化させたときの距離プロファイル

5. むすび

本稿ではレーダ変調方式として、多周波ステップ CPC 方式を採用し、地面クラッタ環境下における小物体検知応用に対する有効性について考察した。多周波ステップ CPC ミリ波レーダを用いた検証実験の結果を示し、提案法がクラッタおよび送信アンテナからの直達波成分を抑圧することが実験的に示された。

謝辞

本稿に示す研究内容は、科研費 A「自立型・協調型統合化自動走行システムの基盤技術に関する研究 (16H02344)」により実施されたものである。

文献

[1] S. Futatsumori, K. Morioka, A. Kohmura, K. Okada, and N. Yonemoto, "Design and Field Feasibility Evaluation of Distributed-Type 96 GHz FMCW Millimeter-Wave Radar Based on Radio-Over-Fiber and Optical Frequency Multiplier", Journal of Lightwave Technology, Vol. 34, No. 20, 2016

- [2] M. Ghulam and M. Jungang, Millimeter wave FMCW radar for Foreign object debris (FOD) detection at airport runways. 407-412. 10.1109/IBCAST.2012.6177589, 2012.
- [3] 稲葉敬之, 荒木純道, "干渉波環境での車載用レーダ信号処理構成の検討"電子情報通信学会論文誌 B, vol. J87-B, No. 2, pp. 199-212, 2014
- [4] 蔵田 真彦, 稲葉 敬之, "マイクロ波による微小変位計測の基礎検討", 信学技報 SANE2012-130, 2013-01
- [5] K. Mazouni, A. Kohmura, S. Futatsumori, N. Yonemoto, J-Y. Dauvignac, Ch. Pichot, C. Migliaccio, 77 GHz FM-CW radar for FODs detection, The 7th European Radar Conference, 11636334, 2010
- [6] 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 (2015) no. 3, pp.285-291
- [7] 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 D, vol135, no.5, 2015
- [8] European Organization for Civil Aviation Electronics, "Minimum aviation system performance specification for foreign object debris detection system," ED-235, 2016.