

次世代車載ミリ波レーダーに向けた変復調方式・信号処理技術

Signal Modulation/De-modulation and Processing Techniques for Next Generation Automotive Radar System

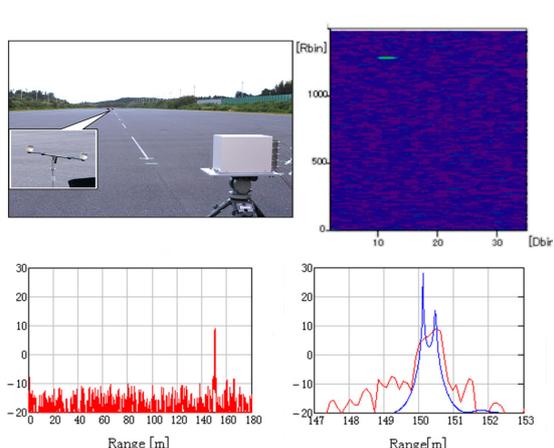
稲葉 敬之 渡辺 優人 秋田 学 渡辺一宏

Takayuki INABA Masato WATANABE Manabu AKITA and Kazuhiro WATANABE

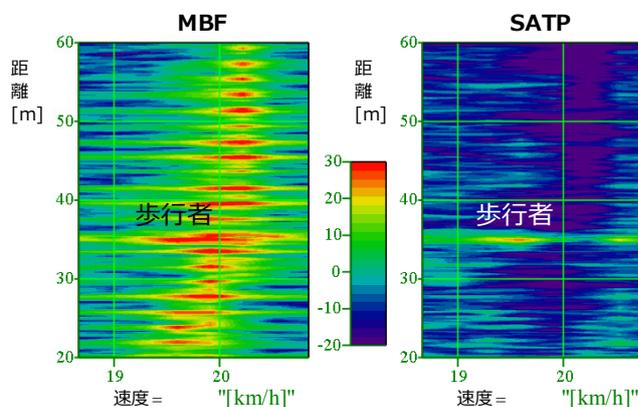
電気通信大学大学院情報理工学研究科 機械・知能システム学専攻

概要

道路交通の安全・安心のため、ミリ波レーダーを用いた自動車の衝突被害軽減機能等の技術が実用化されつつある。しかし、衝突回避の高信頼化や自動運転の実現には、より高性能な変復調方式の研究開発が望まれる。本稿では、遠距離性と分解能と言う相反する能力を両立可能とする多周波ステップCPC変復調方式の開発と機能検証実験、およびその出力に独自の時空間信号処理やドップライメージング処理を適用した検証実験結果を紹介する。これらの処理によりこれまで課題であった地面反射不要波の抑圧や前側方角度高分解能化（すなわち画像化）が期待できることを示す。



多周波ステップCPC変復調方式による特定小電力規格での150m先34cm差（等速）目標分離



パルスドップラ処理+マルチビームフォーミング 時空間信号処理 (ELD-STAP)
ELD-STAP 信号処理による地面・側面反射波の抑圧と低速歩行者の検出

図 遠距離高分解能実証実験

図 地面・側面反射不要波抑圧実証実験

Abstract

In this article, the development of the stepped multiple frequency CPC (Complementary Phase Code) Radar and the experimental verification for the basic performance are shown. Then the unique time-space adaptive processing, Doppler imaging technique, and the initial experimental results are also shown. These results described in this article indicate that the signal processing make it possible to mitigate the ground clutter and realize the high angular resolution in front and side circumstances around the vehicle.

1. はじめに

現在、衝突被害軽減ブレーキシステム等のためのセンサーとして主に FMCW 方式を採用したミリ波レーダーが実用化されるに至っている。一方で、自動運転の実現等に向け、益々のセンシング性能向上が求められている。ミリ波レーダーの第一世代とも言える FMCW 方式では、レーダー覆地の広角化に伴い必要となる多目標環境での分離性能や耐干渉性の課題か

ら、限界も見え始めている。欧州では多目標に対処のため FMCW の周波数掃引を高速化した Fast-FMCW 方式やパルス圧縮方式などが次世代方式として研究開発が進められている。しかし Fast-FMCW では、高速掃引による受信機帯域幅の広帯域化が避けられず必然的に探知距離の劣化に繋がる。パルス圧縮方式は耐干渉性には有利であるが、高分解能化のための広帯域化が必要であり同様に探

知距離の劣化が課題となる。

このような背景のもと、稲葉研究室では、

- 2周波 ICW
- 多周波 CW/多周波 ICW
- 多周波 FMCW
- 多周波ステップ CPC
- 位相符号化 HPRF
- OFDM

等のそれぞれに特徴のある各種変復調方式の提案、研究・開発を進めて来た。本稿では、耐干渉性、多目標分離能力を備え、遠距離性と高分解能と言う相反する性能を両立可能とする多周波ステップ CPC 変復調方式について紹介するとともに遠距離高分解能性に関する実証実験、およびその変復調方式に対し、ELD-STAP(Element Localized Doppler Space Time Adaptive Processing)や高性能ドップライメーシング方を適用した実証実験結果について紹介する。これらの変復調方式や信号処理は、自動運転等の実現に向け有効なレーダ方式、信号処理となることが期待される。

2. 多周波ステップ CPC 変復調方式

2.1 多周波ステップ CPC 変復調方式の基本原

多周波ステップ CPC 法は、合成帯域法により狭受信機帯域幅にて高分解能を得る方法である。合成帯域法で生じる距離アンビギュイティ問題に対処するために、距離サイドローブのない完全自己相関が得られる2つのCPC符号パルス圧縮を距離ゲートとして用い、このCPC符号パルス圧縮と前記合成帯域法で誤差要因となるドップラシフトに対しパルスドップラフィルタを融合させた処理構成にて対処する方式である[1]。図1に送信シーケンスとブロック図を示す。パルスドップラフィルタ(PDF)により速度を求め、その信号を用いて合成帯域することで高分解能な距離を得る。さらに、ブロック図では割愛しているが、その信号から角度を得るために、反射点間のアソシエーション問題がなく、また速度・距離が高分解能であるばかりか電力のアイソレーションもある程度の速度差と距離差があれば110dB以上を達成可能な方式である。現在、76/79GHz帯を用いた小型多周波ステップCPCレーダをカ開発中であり合成帯域処理を超分解能法の適用へと拡張可能であり、送信周波数帯域に相当する距離分解能(0.34m)の1/2分解能を達成予定である。

2.2 高分解能と遠距離性の原理検証実験

2.2.1 多周波ステップCPC変復調方式の原理検証実験

表1に原理検証実験に用いる多周波ステップCPCミリ波レーダのパラメータを示す。図2に、多周波ステップCPC方式の各処理後の出力結果を示し、図2(b)より、符号長が16と比較的短いにも関わらず

20~200m以上にわたり-60dB以下の距離サイドローブが得られていることが確認される。ここで位相符号パルス圧縮において同等の距離サイドローブを得るためには、M系列符号を例にすると必要な符号長は2047である。図2(c)に示す合成帯域処理後の結果より、送信帯域幅430MHzに相当する34cmのメインローブ幅が得られていることが分かる。

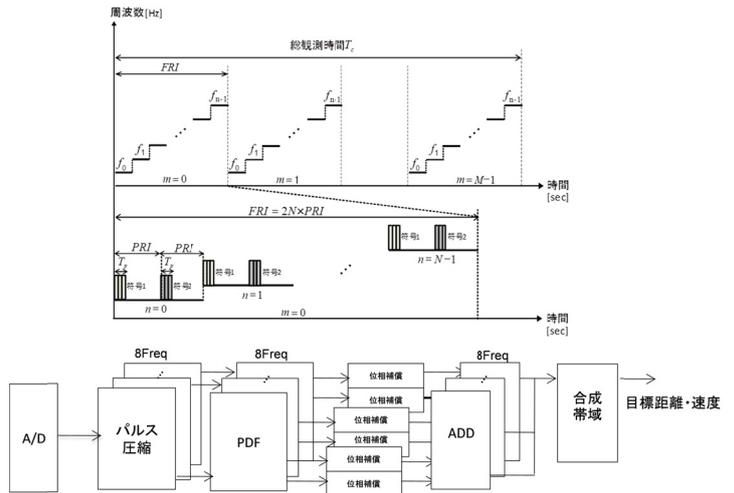


図1 多周波ステップCPC方式の送信シーケンスと信号処理ブロック図

2.2.2 遠距離における高距離分解能性能検証実験

多周波ステップCPCレーダを用いたフィールド実験結果の一例を示す。実験条件は以下の通りとする。

- 目標：コーナーリフレクタ2つ(いずれも10dBsm)
- 距離(目標1)：149.83-151.43 (m)
- 距離(目標2)：150.17-151.77 (m)
- 速度：4 (km/h) (等速, レーダ視線方向)

図3に、実験結果((a)実験風景, (b)距離・速度マップ, (c)目標速度に対応する距離プロファイル, (d)目標周辺拡大図)を示す。図3(d)において青色の実線は超分解能モードによる結果であり、本事例に関しては、距離150m, 距離差34cm(帯域幅に相当)の二つのコーナーリフレクタの分離が確認される。

2.2.3 パルス圧縮方式との探知距離比較実験

送信帯域幅、観測時間(CPI)、送信ピーク電力、目標のRCSを同一条件とした多周波ステップCPC方式と従来法であるパルス圧縮方式の探知距離性能について比較検証した結果の一例を図4に示し、50回計測した結果の平均値を表2に示す。表2に示すように多周波ステップCPC方式は、同じ距離分解能が得られる条件において、従来法に比べ探知距離性能が約1.72倍(周波数ステップ16)にまで延伸可能となる結果が得られている。

表 1.多周波ステップ CPC ミリ波レーダパラメータ

レーダパラメータ	緒元
送信周波数	60.25-60.75GHz
パルス帯域幅	80MHz
符号長	16
PRI	3.5 μ s
パルス数:M	512
周波数ステップ幅	50MHz
周波数ステップ数:N	8
送信帯域幅	430MHz

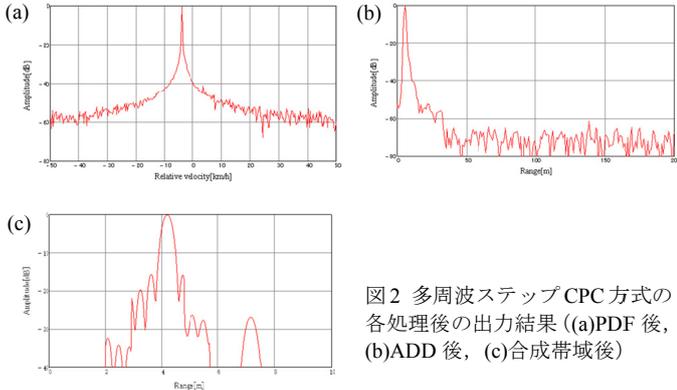


図2 多周波ステップCPC方式の各処理後の出力結果 ((a)PDF 後, (b)ADD 後, (c)合成帯域後)

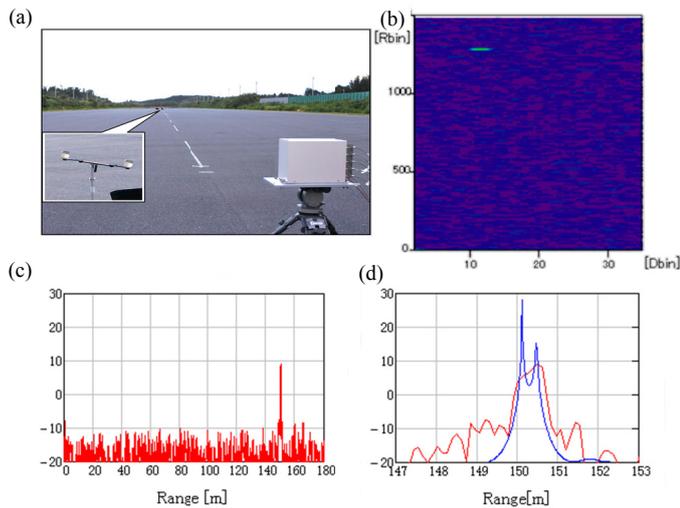


図3 多周波ステップCPCレーダを用いたフィールド実験結果

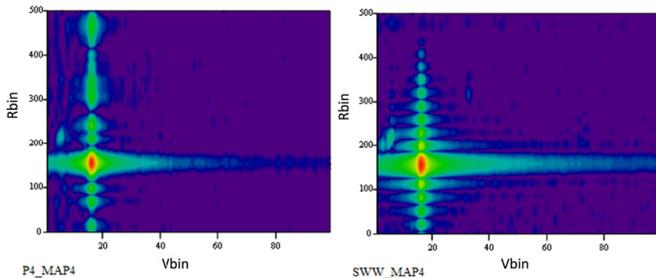


図4 探知距離性能比較実験の一例 ((a)パルス圧縮方式, (b)多周波ステップCPC方式)

表 2. 方式による探知距離性能比較結果 (各 50 回計測)

方式	距離 1m に補正後の S/N の平均[dB]	探知距離性能
パルス圧縮方式	108.16	1
多周波ステップ CPC 方式 (周波数ステップ 16)	117.61	1.72

3. 多周波ステップ CPC 方式への時空間信号処理の適用

3.1 ELD-STAP 法[2]

アレーアンテナを備えるパルスレーダにおいて、アンテナ素子とパルス方向という 2 次元の計測データから入出力の信号対不要波電力比を最大とするような 2 次元フィルタ MSN(Maximum Signal to Noise Ratio)が STAP (Space Time Adaptive Processing) である。フィルタウエイトには不要波のみの信号の相関関数の逆数が必要であり、注目するテスト距離ビンの前後を参照ビンとして推定する。計算負荷を小さくするため、また必要な参照ビンの制約下において性能劣化を少なくすること、アンテナ間の相互干渉の耐性があることが課題である。このため多周波ステップ CPC レーダにおける新しい不要波抑圧法である ELD-STAP 法は、自速情報を事前情報としてパルスドップラフィルタを前処理とすることで「アレー素子」×「選択されたドップラ方向」という 2 次元空間での STAP 法である。

3.2 ELD-STAP 法の各種原理検証実験

道路の両側に植込が存在し、左側にガードレールがある実環境において、前側方の歩行者を 20km/h で走行するレーダで計測し (図 5)、提案の ELD-STAP 法によるクラッタの抑圧を試みた。また、歩行者近傍に静止車両が存在するケースについても実験した。図 6 および図 7 に、計測した実データに対して ELD-STAP によるクラッタ抑圧を行った結果を示す。クラッタが約 20dB 下がりクラッタ完全に埋もれた歩行者が検出しやすくなっている。また、近傍に車両がある場合においても車両電力は 30dB 下がり車両の影響をあまり受けず同様の効果が確認できる。

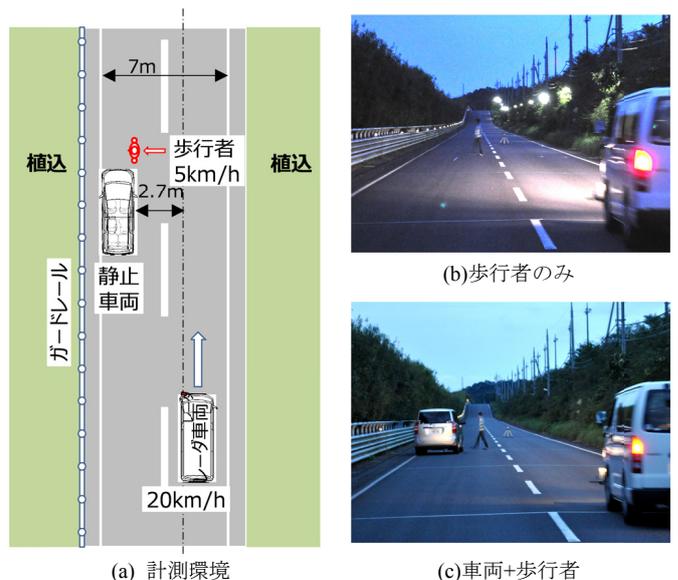


図5 ELD-STAP 法の原理検証実験計測環境

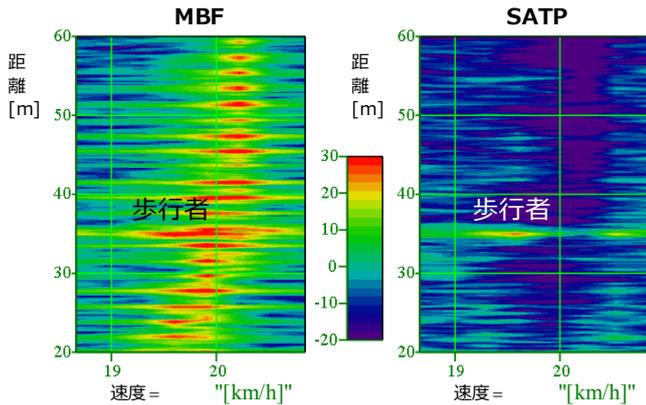


図 6(a) 歩行者のみ RV マップ(従来法)

図 6(b) 歩行者のみ RV マップ(STAP)

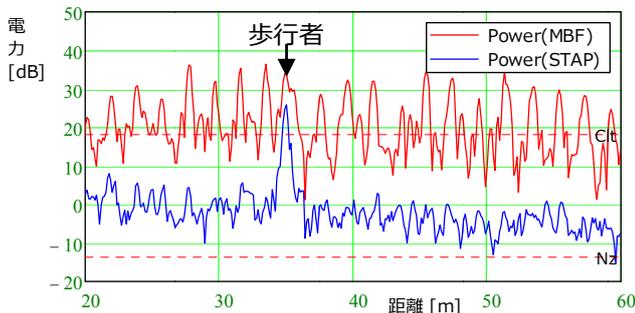


図 6(c) 歩行者のみ 距離-電力特性

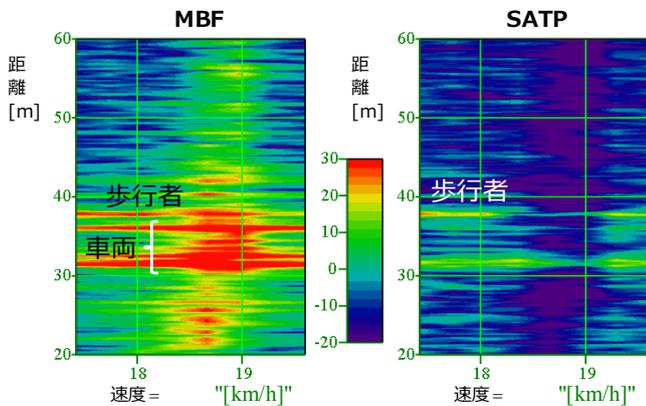


図 7(a) 車両+歩行者 RV マップ(従来法)

図 7(b) 車両+歩行者 RV マップ(STAP)

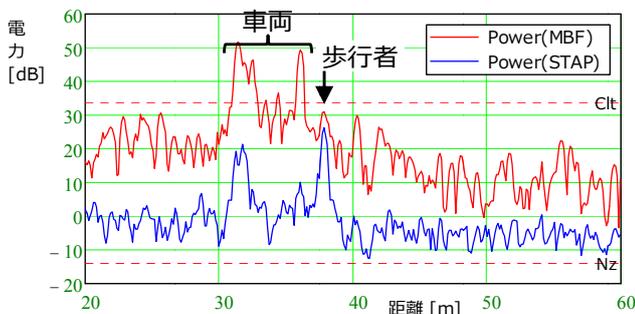


図 7(c) 車両+歩行者 距離-電力特性

4. 多周波ステップ CPC 方式によるドップライメージング

4.1 ドップライメージング法[3]

多周波ステップ CPC 方式において、前側方静止物の距離速度の 2 次元画像 (RV マップ) を高精度に生成する手法について紹介する。画像化のためには 1)多周波ステップ CPC の周波数ステップ間でのドップラ周波数の周波数依存によるドップラ拡がりをはじめ計測時間内で発生するレーダの移動にともなう 2)レンジウォークと 3)ドップラウォークのすべてを補償可能とするドップラ補正法の開発が課題となる。

4.2 高精度ドップライメージング法の原理検証実験

5 つコーナリフレクタ (図 8) を計測対象とした結果を示す。補正前の画像では距離速度が流れた画像 (図 9) (観測時間 228.8ms (4096 パルス)) となるが、提案補正法により前述の 3 つの誤差要因が補正され点画像に合焦することが確認できる (図 10)。

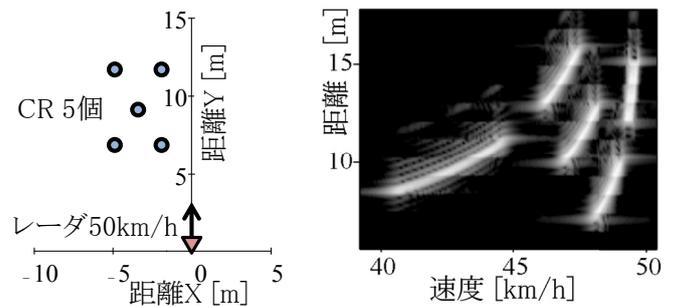


図 8 目標(CR)の配置

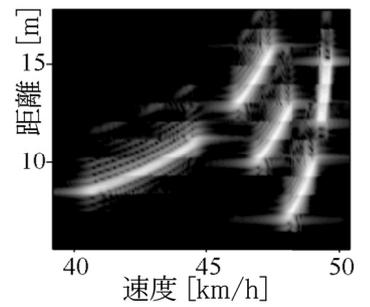


図 9 補正前の画像

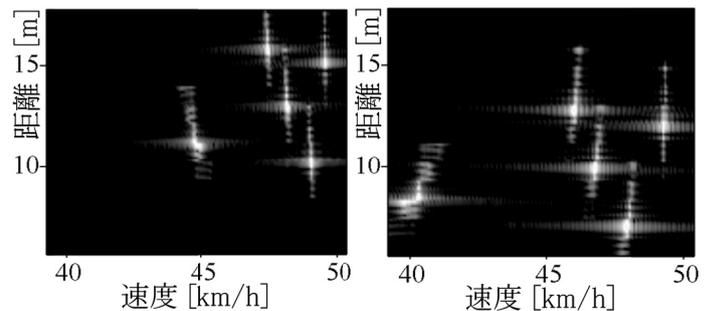


図 10(a) 補正後の画像 合焦時刻 $m_q=0$

図 10(b) 補正後の画像 合焦時刻 $m_q=4095$

5. むすび

遠距離性と分解能と言う相反する能力を両立可能とする多周波ステップ CPC 変復調方式の開発と機能検証実験、およびその出力に独自の時空間信号処理やドップライメージング処理を適用した検証実験結果を紹介した。

- [1] 渡辺, 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", 電気学会論文誌 C, Vol. 135, No. 3, pp.285-291, 2015
- [2] 渡辺, 横川, 高橋, 渡辺, 秋田, 稲葉, 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
- [3] 渡辺, 渡辺, 秋田, 稲葉, 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

著者紹介

稲葉敬之

電気通信大学大学院機械知能システム学専攻，教授
inaba@ee.uec.ac.jp

渡辺優人

電気通信大学大学院機械知能システム学専攻，特任
助教

秋田学

電気通信大学大学院機械知能システム学専攻，特任
助教

渡辺一宏

電気通信大学大学院機械知能システム学専攻，産学
官連携研究員