

次世代高度運転支援システムのためのレーダ技術の研究開発

Radar Technologies for Next Generation Driving Support Systems

稲葉 敬之 渡辺 優人 渡辺一宏 秋田 学
 Takayuki Inaba Masato Watanabe Kazuhiro Watanabe Manabu Akita
 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たレーダ変復調方式を研究している。多周波ステップ CPC 方式[1]や PC-HPRF 方式[2]がその代表例である。これらの方式は、現在車載レーダ等で多く採用されている FMCW 方式に比べ、多目標環境や不要波環境での目標検出特性に優れるという特徴を備えている。多周波ステップ CPC 方式は、76/79/60GHz 帯特定小電力無線局規格に準拠した条件において、狭受信機帯域幅（すなわち遠距離を備える）にて高距離分解能を達成可能とするために CPC(Complementary Phase Code)パルス圧縮と合成帯域 (Synthetic Wideband), およびパルスドップラフィルタを融合させた方式である。この多周波ステップ CPC 方式を変復調方式として、現在以下のような実用化に向けた拡張・高度化に取り組んでいる。

- ① 時空間信号処理による不要波抑圧
- ② 歩行者等の分離認識[3]
- ③ 目標追尾（航跡生成と将来位置予測）
- ④ 正面方向の画像化の基礎検討

本報告では、多周波ステップ CPC 方式を概説するとともに①と④について述べる。

2. 多周波ステップ CPC 方式

多周波数ステップ CPC 方式は、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（距離アンビギュイティ対策）として用い、この CPC 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 2 にブロック図を示す。パルスドップラフィルタにより速度を求め、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。

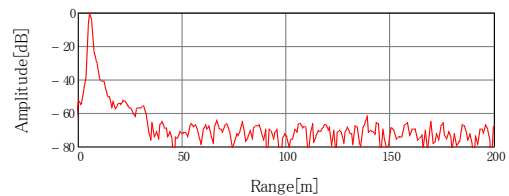
現在、76/79GHz 帯を用いた小型多周波ステップ CPC レーダを開発中であり合成帯域処理を超分解能法 (Matrix Pencil/ESPRIT) の適用へと拡張することで、送信周波数帯域に相当する距離分解能(0.34m)の 1/2 分解能を達成予定である。原理検証実験結果を図 1 に示す。図 1 より CPC パルス圧縮により 0-200m に亘り距離アンビギュイティがないこと、サイドローブが 60dB 以下であること、合成帯域処理による距離分解能 0.34m が得られていることが分かる。

3. 時空間信号処理による不要波抑圧

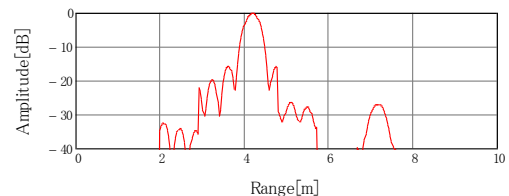
3.1 ELD-STAP 法[4]

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 MSN(Maximum Signal to Noise Ratio)による 2次元フィルタが 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 (図 2) 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。



検出されたドップラ周波数に対する距離ゲート



合成帯域処理による距離ゲート内の高分解能距離プロフィール

図 1 多周波ステップ CPC 方式処理結果

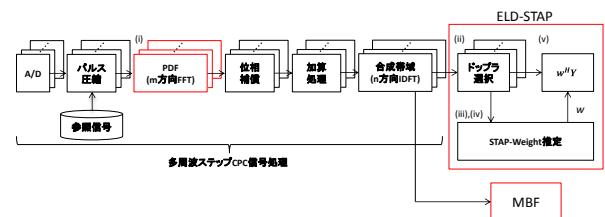


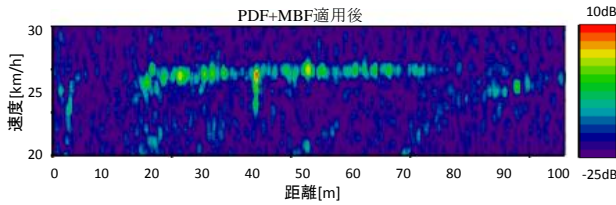
図 2.多周波ステップ CPC/ELD-STAP の信号処理ブロック図

3.2 実験による検証

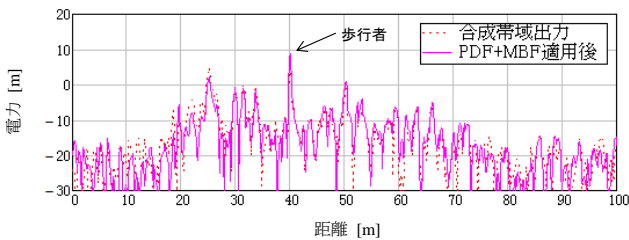
不要波抑圧実験風景を図 3 に示す。多少の登り勾配でありレーダには検出対象である歩行者以外にもグラウンドクラッタ（地面反射波）が入射する。図 4, 5 は、それぞれ従来法 (PDF+MBF), ELD-STAP 法での結果である。距離 40m の人物に対し $S/N=25\text{dB}$ 以上で検出することができており最大探知距離に換算すると約 70m に相当する値である。しかしこれを阻害する要因がグラウンドクラッタである。図 5 より ELD-STAP 法では目標信号を減衰させることなくグラウンドクラッタを受信機雑音レベルまで低減しており、その有効性が確認された。



図3 実験風景

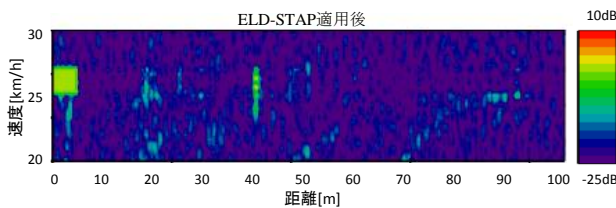


(a) 距離-速度マップ

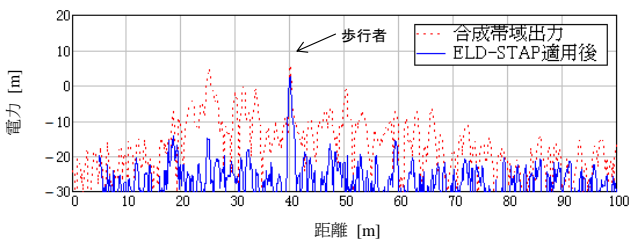


(b) 距離対電力出力特性

図4 従来法 (PDF+MBF) 適用結果



(a) 距離-速度マップ



(b) 距離対電力出力特性

図5 ELD-STAP 適用結果

4. 正面方向画像化の基礎検討

4.1 多周波ステップ CPC 方式による車両計測

車載レーダのように単一のアンテナでは開口が十分大きくとれないレーダでは、角度計測のかわりにドップラ計測値から地面や市街地構造物などの完全正面以外の静止物に対しては (ドップラ周波数 $=2V/\lambda \times \sin(\text{角度})$ の関係より) DBS(Doppler Beam Sharpening)により高分解能な角度情報が得られる。車の距離・速度マップ(観測時間 0.03sec)の実測値とシミュレーション結果を図6に示す。

車のように当レーダの距離/速度分解用より大きな目標は R/V 分布として計測される。これらの点を合成して検知性

能を向上させたり、逆に一つの剛体とした目標追尾, 更に認識等への応用が期待される。

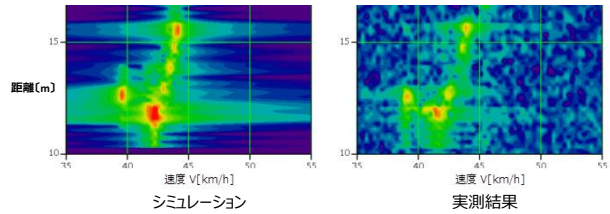
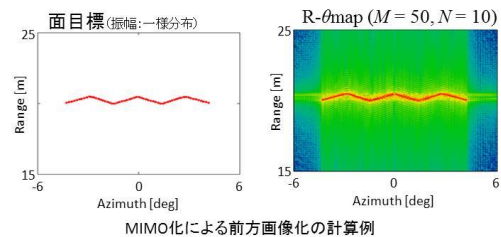


図6 静止車両の距離/速度マップ

4.2 MIMO化による正面方向画像化

PC-HPRF方式のMIMO化検討の第一段として GOLD 符号を用いた方法を検討した[5]。しかし GOLD 符号は、パルスレーダとしての自己相関特性やそのMIMO化で重要な相互相関特性が良いとは言えず新たな方式を研究中である。一方、多周波ステップ CPC レーダでは前述したように CPC 符号を用いておりこの問題を克服可能な方式であるMIMO化にあたりこれまでの2つのCPC符号ではなく、N組のCPC符号へと拡張することで容易にMIMO化が可能である。数を増やすことによる速度視野低下問題は、同一周波数の各符号間での位相勾配を超分解能法等で推定することで克服可能である。送受信のアレー数をできるだけ少なくするためにスパース配列であってもグレーティングの発生しない配置について検討中であり、面目標に対する前方画像化の計算例を図7に示す。



MIMO化による前方画像化の計算例

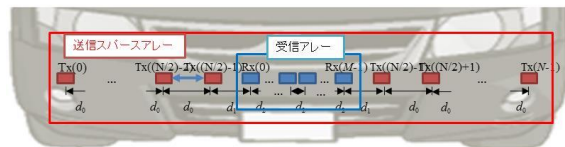


図7 送信スパースアレー配置によるMIMO化

4. むすび

本稿では、多周波ステップ CPC 方式を変復調方式と、その実用化に向けた「時空間信号処理による不要波抑圧」, 「正面方向の画像化の基礎検討」について述べた。

本稿に示す研究内容の一部は、総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発 (狭帯域・遠近両用高分解能小型レーダ技術の研究開発)」により実施されたものである。

参考文献

- [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, 秋田, 稲葉, UWB インパルスレーダにおけるパルス間符号変調による遠距離性の改善, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J97-B, No.7, pp.556-564, 2014
- [3] 秋田, 深町, 渡辺, 稲葉, 2周波 CW レーダを用いた歩行人物の特徴量抽出, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J97-B, No.8, pp.677-687, 2014
- [4] 高橋, 横川, 渡辺, 渡辺, 秋田, 稲葉 ELD-STAP による信号対路面反射クラッタ比の改善, 信学技法, 2015
- [5] 山下, 秋田, 稲葉, 車載マルチスタティックレーダにおける送信シーケンスおよび信号処理法に関する一検討, 信学技報 113(387), 13-18, 2014