

ELD-STAP による信号対路面反射クラッタ比の改善

高橋 陸 横川 貴洋 渡辺 一宏 渡辺 優人 秋田 学 稲葉 敬之

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: takahashi.riku@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし 筆者らは前方監視車載レーダにおいて、路面や側方構造物からの反射波であるクラッタや他レーダからの直接波である干渉波などの不要波を抑圧する技術として時空間適応信号処理である ELD-STAP を提案している。これまでに路面反射波であるグラウンドクラッタに対する抑圧効果について多周波ステップ CPC ミリ波レーダにより取得した実験データに対する解析にてその有効性について報告している。本稿では、検出対象信号である歩行者からの反射波とグラウンドクラッタが同時に受信される実験条件において、同レーダ出力に対し ELD-STAP を適用することによる信号対グラウンドクラッタ比改善性能評価を実施したので報告する。

キーワード ELD-STAP, クラッタ抑圧, 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ

Improvement of Signal-to-Clutter Ratio by ELD-STAP

Riku TAKAHASHI Takahiro YOKOKAWA Kazuhiro WATANABE Masato WATANABE

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: takahashi.riku@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract In previous research, Element Localized Doppler STAP (ELD-STAP) which suppresses undesired signals such as clutter (reflections from such as the ground surface, buildings, and so on) and interference from other radar has been presented. It was also experimentally indicated that ELD-STAP could mitigate the ground clutter. In this paper, the signal-to-clutter ratio is discussed in the situation where the reflection waves obtained by the millimeter wave radar using stepped multiple frequency CPC include the reflections from the target (pedestrian) and ground clutter. The improvement of signal-to-clutter ratio by ELD-STAP is verified by compared with the conventional method that is the combination of pulse Doppler filtering and multi-beamforming.

Keyword ELD-STAP, Clutter suppression, Millimeter wave radar using stepped multiple frequency CPC

1. まえがき

近年、自動車の安全運転支援のためのセンサとして車載ミリ波レーダが注目されている。市街地などの電波環境的に複雑な運用状況においては、車載ミリ波レーダには、他レーダからの直接波である干渉波のみならず建物や路面からの反射波であるグラウンドクラッタなどの不要波が受信される。特に横切り運動など目標の移動相対速度が小さい場合、その信号ドップラ周波数は路面反射クラッタ周波数に埋もれることとなり一般的なパルスドップラフィルタ処理(PDF)では検出が困難となる。このためこれら不要波の抑圧能力向上を図る処理法の研究開発は重要なテーマとされている。

航空機からの側方監視を目的とした新しい不要波抑圧技術として、アンテナ方向とパルス方向の2次元適応フィルタである時空間適応信号処理(STAP: Space Time Adaptive Processing[1])が報告されている。しかし、STAPは計算負荷が大きい点が課題である。そこで、筆者らは前方監視多周波ステップ CPC ミリ波レーダ[5]への適用を想定し、自速情報を事前情報として活用することで計算負荷の削減と素子間結合の補償効果を併せ持つ ELD-STAP(Element Localized Doppler-STAP)[2]を提案し、本手法が他レーダからの干渉を有効に抑圧可能であることを電波暗室内での実験により明らかにした[3]。また側方でなく前方からの反射波で

あるグラウンドクラッタに対しても一定の抑圧効果を有することを示した[4]。しかし一方で検出対象とする目標を抑圧しないことを確認することが重要な課題である。

以上より本稿では、車載ミリ波レーダにおける検出対象である歩行者と不要波であるグラウンドクラッタが同時に受信される実験条件において、多周波ステップCPCミリ波レーダ出力を用いたELD-STAPの信号対グラウンドクラッタ比(S/C)の改善性能評価を実施したのでその結果を報告する。

2. STAP 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ

本レーダは表 1、表 2 に示すようにミリ波特定小電力無線機規格(送信周波数 60.0~61.0GHz の 500MHz 以内、送信電力 10mW、アンテナ利得 40dBi)を満足する仕様である。多周波ステップ CPC 方式は、合成帯域法と CPC パルス圧縮を複合したレーダ変調方式である。2つの相補となる CPC(Complimentary phase code)符号の加算により距離のサイドローブ抑圧が可能である。さらに、合成帯域法は時分割で送信周波数切り替え送信し、受信時に送信周波数毎に復調し、周波数方向に受信信号を合成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られる。図 1 に送信シーケンスを示す。

図 2 に、従来法である PDF(Pulse Doppler Filter)と MBF(Multi Beam Forming)を組み合わせた手法(以下 PDF+MBF と表記)と ELD-STAP の信号処理ブロック図を示す。PDF+MBF では、PDF を含む多周波ステップ CPC 方式の信号処理後の合成帯域の出力に対し MBF を行う。多周波ステップ CPC 方式の合成帯域処理の目標ピークと距離サイドローブを実データにより図 3 に示す。赤い実線が合成帯域処理の出力、青い点線がパルス圧縮処理の出力である。図 3 のとおり、CPC 符号とパルス圧縮の距離ゲートにより、合成帯域処理

によるサイドローブは約-60dB となる。ただし、ピーク周圍約 2m の範囲においては約-13dB にサイドローブが発生する。

表 1 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ装置構成仕様

送信電力	10mW
切替周波数	8ch
周波数切替時間	100nsec 以下
アンテナ方式	送信：1 素子導波管 スロットアンテナ 受信：4 素子導波管 スロットアレーアンテナ
アンテナ素子間隔	0.8λ(3.96mm)

表 2 多周波ステップ CPC ミリ波レーダパラメータ

送信周波数	60.5GHz
パルス帯域幅	80MHz
パルス幅	0.2μsec(30m)
符号長	16
パルス繰返し間隔 (PRI)	3.5μsec
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
(最大速度視野)	(±79.64km/h)
送信帯域幅	430MHz
(距離分解能)	(0.35m)
観測時間	28.6msec
(速度分解能)	(0.311km/h)
A/D サンプル周波数	160MHz

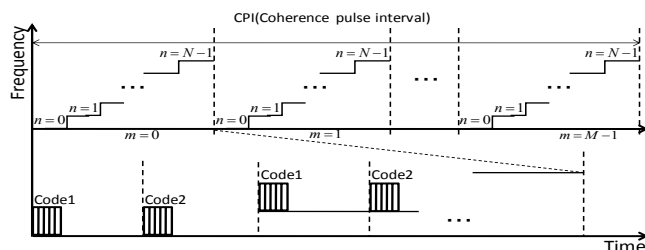


図 1. 多周波ステップ CPC 方式送信シーケンス図

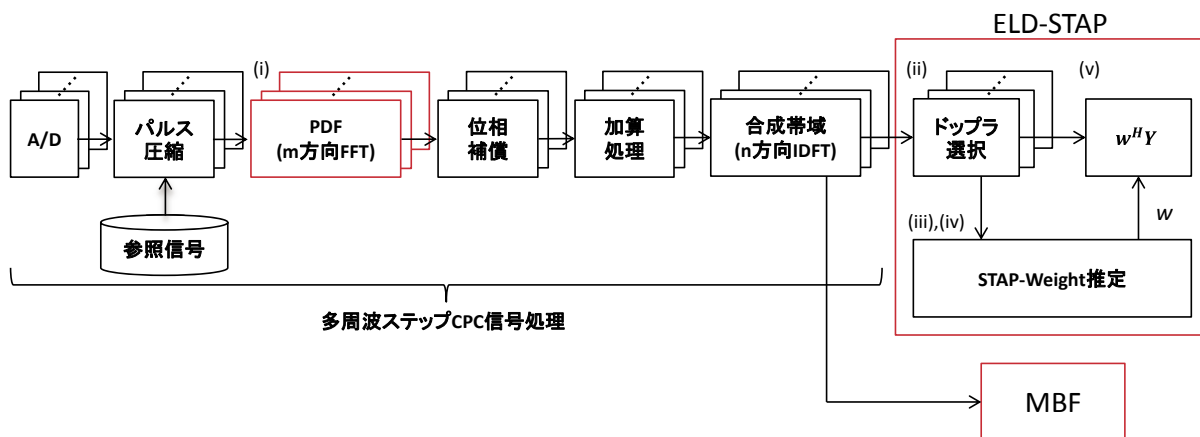


図 2. ELD-STAP, PDF+MBF の信号処理ブロック図

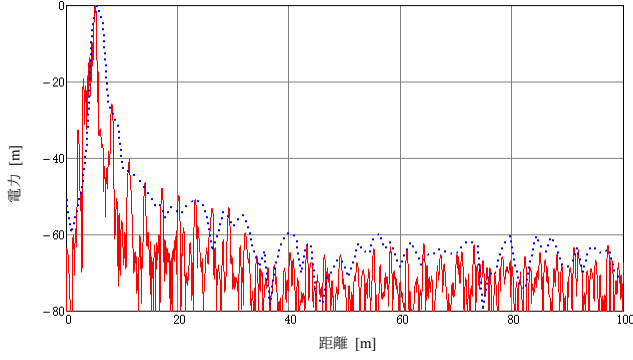


図 3. 多周波ステップ CPC 方式の距離サイドローブ特性

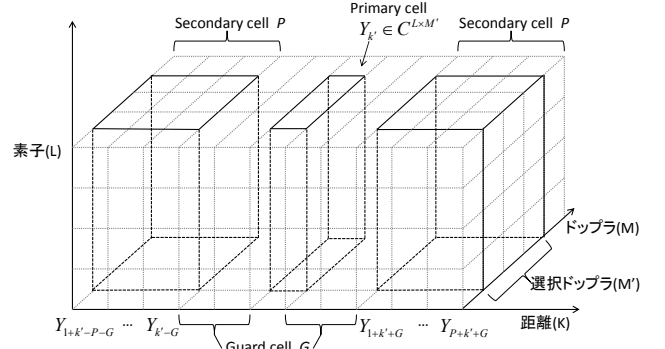


図 4. 合成帯域処理後のデータ

3. ELD-STAP 処理概要

ELD-STAP への入力である合成帯域処理後のデータ構造を図 4 に示す. ELD-STAP 処理概要について以下 (i)~(v) 処理手順に従って説明する.

(i) パルスドップラフィルタ (PDF)

パルス圧縮処理の出力に対して PDF 処理を行う. このとき, PDF 及び, MBF のステアリングベクトルは以下式で与えられる.

$$\mathbf{s}_t(\tilde{f}_d) = [1 \quad \exp(2\pi j \cdot \tilde{f}_d) \quad \cdots \quad \exp(2\pi j \cdot (M-1)\tilde{f}_d)]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{s}_s(\theta) = [1 \quad \exp(2\pi j \cdot f_{sp}(\theta)) \quad \cdots \quad \exp(2\pi j \cdot (L-1)f_{sp}(\theta))]^T \quad (2)$$

計測されるデータ行列 \mathbf{X}_k に対して, ステアリングベクトル $\mathbf{s}_t(\tilde{f}_d)$ を掛けることで PDF 出力を得る.

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{X}_k \mathbf{s}_t(\tilde{f}_d)^* \quad (3)$$

は複素共役を表す. PDF 後のフィルタ出力 $\mathbf{Y}_k(m) \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ はパルス数 M , 周波数番号 m の変数より

$$\mathbf{Y}_k(m) = \mathbf{X}_k \mathbf{s}_t(\tilde{f}_d(m))^* \quad (4)$$

$$\tilde{f}_d(m) = \frac{m}{M} \quad (5)$$

と表される.

(ii) 不要波の局在するドップラビンの選択

$\mathbf{Y}_k(m)$ からクラッタが局在し, STAP を適用するドップラビンの選択を行う. クラッタのドップラビンは自速のドップラ周波数 $f_d(\theta)$ と最大覆域角 θ_0 の関係から以下の条件式を満たす周波数番号 m を選択する.

$$f_d \cos(\theta_0) \leq \frac{f_d(m)}{T_{PRI}} \leq f_d \quad (6)$$

選択した自速相当の最大のドップラビン DB から $DB - M' + 1$ までの計 M' の選択ドップラビンを $m' = DB - M' + 1, DB - M' + 2, \dots, DB$ とおく.

(iii) 不要波相関行列推定

これらの選択されたドップラビンのフィルタ出力を STAP 処理におけるデータベクトルと同様に 1 次元データベクトル $\tilde{\mathbf{Y}}_k(m') \in \mathbb{C}^{LM' \times 1}$ に置き換える.

$$\tilde{\mathbf{Y}}_k(m') = [\mathbf{Y}_k(DB - M' + 1) \mathbf{Y}_k(DB - M' + 2) \dots \mathbf{Y}_k(DB)]^T \quad (7)$$

Primary cell (以下, STAP 技術の慣例から距離ビンのことを cell と呼ぶことにする) が目標である場合に, Secondary cell に目標成分が含まれることを避けるため Guard cell を設ける. それぞれの cell の関係は図 8 のとおりである. この Secondary cell のデータベクトルから SMI により不要波相関行列 $\mathbf{R}_{k'}$ の推定をする. Secondary cell 数を P , Guard cell 数を G とすると不要波相関行列 $\mathbf{R}_{k'}$ は

$$\mathbf{R}_{k'} \cong \frac{1}{2P} \left[\sum_{p=1}^P \tilde{\mathbf{Y}}_{p+k'-P-G}(m') \tilde{\mathbf{Y}}_{p+k'-P-G}(m')^H + \sum_{p=1}^P \tilde{\mathbf{Y}}_{p+k'+G}(m') \tilde{\mathbf{Y}}_{p+k'+G}(m')^H \right] \quad (8)$$

(iv) 不要波相関行列の固有値展開

不要波相関行列の固有値展開を行い主要固有値により Element・Localized Doppler 空間における最適ウェイトベクトルは

$$\mathbf{W}_{eld}(f_{sp}(\phi), \tilde{f}_d(m')) \approx \mathbf{R}_{k'}^{-1} \mathbf{s}_{eld}(f_{sp}(\phi), \tilde{f}_d(m')) \approx \frac{1}{\sigma^2} \left(\mathbf{I}_{NM'} - \sum_{j=1}^J \mathbf{q}_j \mathbf{q}_j^H \right) \mathbf{s}_{eld}(f_{sp}(\phi), \tilde{f}_d(m')) \quad (9)$$

と与えられる. ここで, Element・Localized Doppler 空間のステアリングベクトルは

$$\mathbf{s}_{s-d}(f_{sp}(\phi), \tilde{f}_d(m')) \equiv \mathbf{s}_s(f_{sp}(\phi)) \cdot e^{j2lm'\tilde{f}_d} \in \mathbb{C}^{L \times 1} \quad (10)$$

として, (21) 式のように与えられる.

$$\mathbf{s}_{eld}(f_{sp}(\phi), \tilde{f}_d(m')) \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{s}_{s-d}(f_{sp}(\theta), \tilde{f}_d(DB - M' + 1)) \\ \mathbf{s}_{s-d}(f_{sp}(\theta), \tilde{f}_d(DB - M' + 2)) \\ \vdots \\ \mathbf{s}_{s-d}(f_{sp}(\theta), \tilde{f}_d(DB)) \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{LM' \times 1} \quad (11)$$

(v) ELD-STAP フィルタ出力

Primary cell のデータベクトルと最適ウェイトベクトルの内積をとることにより, ELD-STAP 出力を得る.

$$y_k(m') = \mathbf{W}_{eld}(f_{sp}(\phi), \tilde{f}_d(m'))^H \tilde{\mathbf{Y}}_k(m') \quad (12)$$

以上の (i)~(v) までの操作を全距離セルに対して行う.

4. 実験検証

4.1 グラウンドクラッタ計測実験

抑圧対象となるグラウンドクラッタと、目標である歩行者の信号が同時に受信される実験条件において、多周波ステップ CPC ミリ波レーダを車載し計測を実施した。実験風景を図 5 に示す。多周波ステップ CPC ミリ波レーダの合成帯域処理後の目標相対速度に該当するドップラビンの距離対電力特性（アンテナ素子番号 ch1）を図 6 に示す。なお、以下に示す結果は全て PDF に Blackman ウェイト、合成帯域処理に Hamming ウェイトを適用した。

距離 10m 以下ではエレベーションビーム幅が狭いためグラウンドクラッタの受信はみられず、ほぼ受信機雑音が観測される。一方、約 20~80m まで分布している電力の盛り上がりがグラウンドクラッタ反射電力であると考えられる。また、距離 40m に存在する孤立した電力ピークが目標（歩行者）である。

送信電力が 10mw に制限されている特定小電力無線局技術適合の多周波ステップ CPC ミリ波レーダにおいて、同レーダは比較的広いアジマスビーム幅を備えている（すなわちアンテナ利得が高くない）にも関わらず、距離 40m の歩行者に対し信号対雑音比約 25dB（受信機雑音レベルは距離 10m 以内での計測雑音レベ



図 5 実験風景

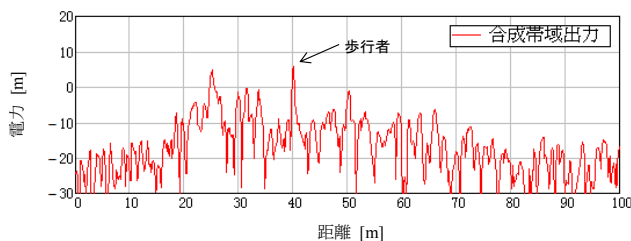


図 6 ELD-STAP 適用前の距離対電力特性

表 3 ELD-STAP パラメータ

選択ドップラビン数	6
Secondary cell (片側)	20
Guard cell (片側)	5,10,15,20,25,30

ルとした)が得られることが確認される。

このことはグラウンドクラッタを受信機雑音レベルまで抑圧可能であれば、路面反射環境においても歩行者を約 70m の遠距離まで検知可能であることを意味する（信号の減衰を一般的な距離-4 乗とし、検出に必要な S/N を 15dB と設定）。

4.2. ELD-STAP における Guard cell 数評価

ELD-STAP を適用する際に Secondary cell に目標自身の成分が含まれると、目標の電力を減衰させることが考えられる。そのため STAP では前述したように Guard cell を設ける。ここでは、表 3 に示すパラメータで ELD-STAP の Guard cell 依存性について評価を行った。

なお、目標信号は AD 変換後のグラウンドクラッタ実データに対し疑似的に加算することで異なる S/C に対する評価を実施した。

図 7 に出力 S/C の差を評価指針とした Guard cell 数依存性の評価結果を示す。

出力 S/C の差とは、各 Guard cell 数での ELD-STAP の出力 S/C と、従来法である PDF+MBF の出力 S/C との差である。

この図 7 より ELD-STAP において、入力 S/C が 15dB のとき、Guard cell 数を 5 とすると、入力 S/C が 5dB のときと比較して S/C 改善性能が劣化していることが確認される。入力 S/C が 25dB のときにも、Guard cell 数 5, 10 で同様に劣化が見られる。

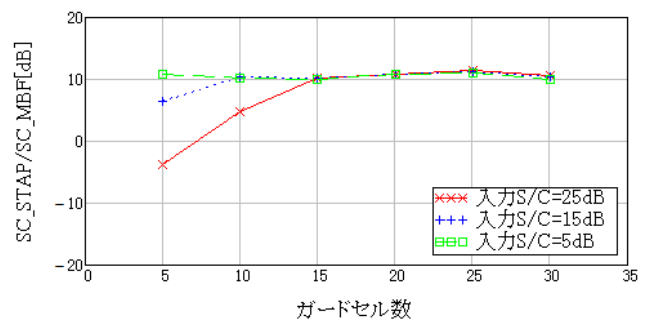


図 7 グラウンドクラッタ+疑似目標信号に対する ELD-STAP と PDF+MBF の出力 S/C の差

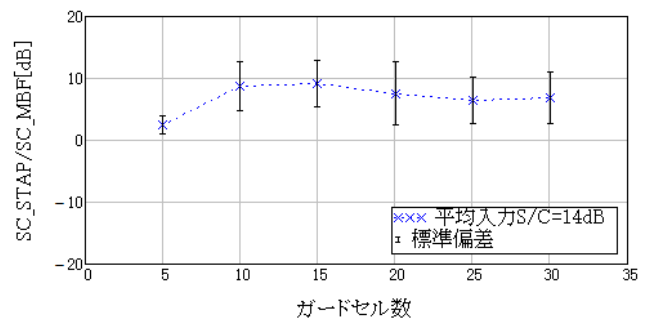


図 8 目標を含むグラウンドクラッタに対する ELD-STAP と PDF+MBF の出力 S/C の差

これらは前記した通り、目標ピークを Primary cell としたとき Secondary cell に目標の距離サイドローブが含まれることにより、ELD-STAP が目標も抑圧してしまったためであると思われる。

以上のことは、3章の図3にて示した、孤立単一目標に対する多周波ステップCPC方式出力距離プロファイルにおいて距離ピークと距離サイドローブの差が13dB程度であることより、ELD-STAPの入力S/Cがその値以上の場合には、目標の距離サイドローブがクラッタよりも大きくなる。

そのため、特に距離サイドローブ対クラッタ比が0dB以上という状況においては、多周波ステップCPC方式の合成帯域処理の出力に対し、ELD-STAPを適用する際のGuard cell数は15以上が望ましいと考えら

る。

次に図8では、(4.1)で計測したグラウンドクラッタ実データに対し図7と同様の評価を実施した結果である。図8において、出力S/Cの差は同一条件での5データの平均値である。なお、クラッタの電力は自転車速度-1binにおける目標ピークから距離方向に20bin離れた前後50binの平均値である。

図8より、Guard cell数5の場合にはそれ以上の数の場合に比べ、出力S/Cの差が約5dBほど劣化していることが分かる。

一方、図7(青線)と図8を比較すると、Guard cell数10以上において、同様の出力S/Cの差であることも確認され、目標を疑似データとした場合と実目標において差異のない値が得られた。

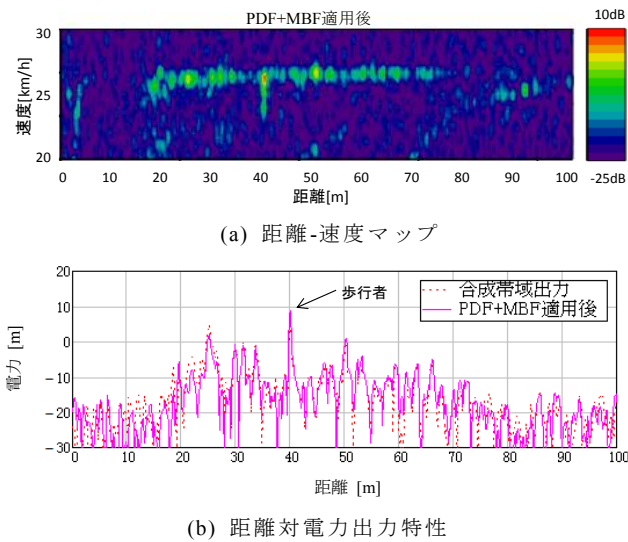


図9 目標を含むグラウンドクラッタへのPDF+MBF適用結果(入力S/C約15dB)

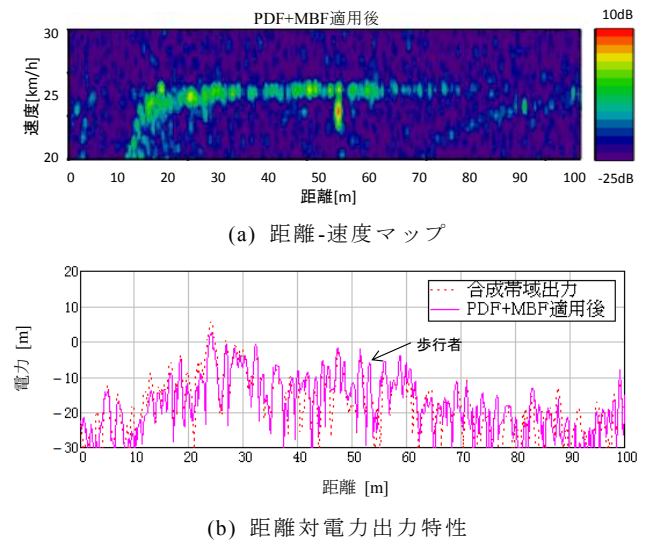


図11 目標を含むグラウンドクラッタへのPDF+MBF適用結果(入力S/C約0dB)

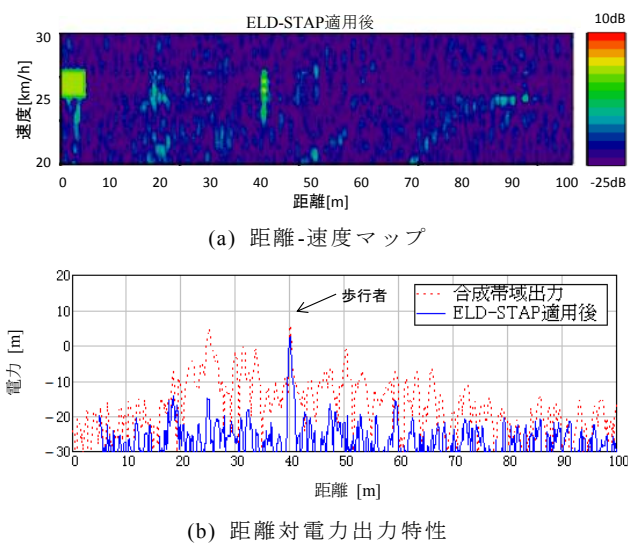


図10 目標を含むグラウンドクラッタへのELD-STAP適用結果(入力S/C約15dB)

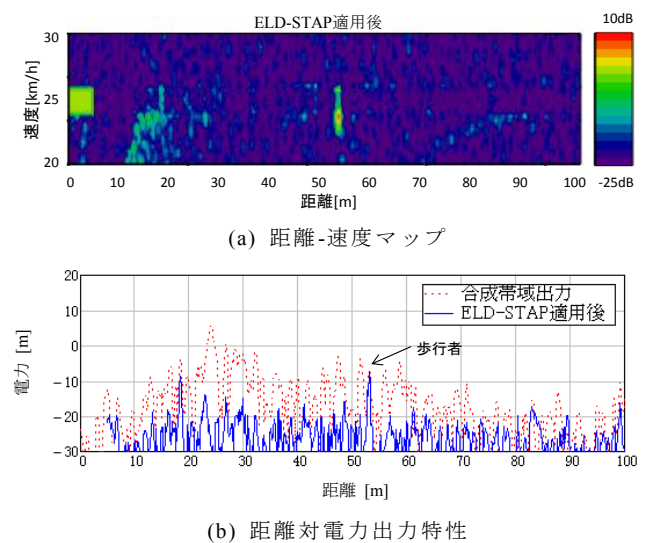


図12 目標を含むグラウンドクラッタへのELD-STAP適用結果(入力S/C約0dB)

以上から次節(4.3)で評価する、ELD-STAP 特性評価において Guard cell 数は 15 以上となる 20 を採用する。

4.3. 計測データに対する ELD-STAP 特性評価

本節では(4.1)で計測した目標を含むグラウンドクラッタ実データに対し、距離 - 速度マップ、およびグラウンドクラッタの局在する速度ビンにおける距離対出力電力特性について、ELD-STAP と従来法である PDF+MBF との比較評価を行う。

図 9, 11 は、従来法である PDF+MBF、図 10, 12 は ELD-STAP の結果である。図 9, 10 は、グラウンドクラッタが主に分布している速度 bin において、入力 S/C が約 15dB のデータである(図 6 と同様のデータ)。図 11, 12 は、グラウンドクラッタが主に分布している速度 bin において、入力 S/C が約 0dB のデータである。

それぞれ、(a)ではグラウンドクラッタ分布範囲を切り出した距離 - 速度マップ、(b)にグラウンドクラッタが分布している速度ビンにおける距離対出力電力特性を示す。

なお、PDF+MBF の表示結果は合成帯域出力の雑音振幅に規格化した結果である。

図 9, 10 の計測データでは、目標距離は約 40m、図 11, 12 では約 52m である。

各図の(a) 距離 - 速度マップから、目標が存在する距離における速度方向の約 4km/h の広がり、目標である歩行者の手足の動きによる広がりであると考えられる。

図 9(a)、図 10(a)の比較より、ELD-STAP 適用後には、目標を残し、周波数的に広がったグラウンドクラッタに対し抑圧効果がみられることが分かる。

また、図 9(b)、10(b)より、グラウンドクラッタが主に分布している速度 bin において、各距離における ELD-STAP 出力の電力がほぼ受信機雑音と思われるレベルまで有効に抑圧されていることが確認される。

具体的には、グラウンドクラッタが受信機雑音レベルでまで約 10dB-20dB 抑圧されたことに対し、目標の電力の減衰は約 3dB 程度にとどまる値が得られた。

以上のことより、従来法では抑圧が困難な路面反射グラウンドクラッタに対し ELD-STAP 法の適用は極めて有望であること示された。

図 11, 12 では、目標距離が 52m で先のデータより遠方であるとともに、グラウンドクラッタのレベルが高く、より入力 S/C が悪いデータである。図 11, 12 の比較よりグラウンドクラッタがほぼ受信機雑音レベルにまで低減されていることについても、目標の減衰についても、図 9, 10 の結果とほぼ同様である。ただし、距離 18m ほどに消え残りの信号電力ピークが観測された。これは、図 11(a) 距離 - 速度マップで、同

じ距離の自速に相当する約 26km/h にピークが見られ、その信号は正面方向の地面からの反射であると思われる。距離方向に均一な他のグラウンドクラッタとは性質が異なるため、ELD-STAP による抑圧対象とならずピークとして残ったと考えられる。

5. むすび

車載ミリ波レーダにおける検出対象である歩行者と不要波であるグラウンドクラッタが同時に受信される実験条件において、多周波ステップ CPC ミリ波レーダ出力を用いた ELD-STAP の信号対グラウンドクラッタ比(S/C)の改善性能評価を実施した。

この結果、従来法である PDF+MBF と比較して高い信号対グラウンドクラッタ比の改善性能が得られることを確認した。

謝辞

本稿に示す研究内容は、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ー技術の研究開発)」により実施されたものである。

文献

- [1] W.L. Melvin, "A STAP overview", IEEE AES Systems Magazine Special Tutorials Issue.Vol.19, No.1, pp.19-35, January 2004.
- [2] 稲葉敬之, 前方監視レーダのためのElement・Localized Doppler STAP法, 電子情報通信学会論文誌B, Vol J87-B, No.10, pp.1771-1783, 2004-10
- [3] 新田大輔, 稲葉敬之, 深町弘毅, 多周波ステップCPCミリ波レーダへのELD-STAPの適用と評価, 信学技報, SANE2012-131, pp.25-30, 2013-1
- [4] 横川貴洋, 高橋陸, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 車載ミリ波レーダにおける路面反射クラッタ距離分布特性とELD-STAPによるその抑圧, 信学技報, SANE2014-111, pp.35-40, 2015-1
- [5] 渡辺優人, 稲葉敬之, 坪田光, 矢野公広, Development of Millimeter wave Radar using Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code Modulation, 信学技報, SANE2011-81, 2011-10
- [6] Brennan LE, Shaudaher FM, "Subclutter visibility demonstration", Tech Rep RL-TR-92-21, Adaptive Sensors Incorporated, 1992.