

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

横川 貴洋 高橋 陸 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科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: yokokawa.takahiro@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし 車載レーダでは複雑な電波環境において目標をより高信頼性にて検知するために、地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の直接波である干渉波などの不要波抑圧性能の向上が求められている。不要波抑圧技術として前方監視車載レーダを想定し、現実的な計算負荷にて処理可能な時空間適応信号処理である ELD-STAP を提案している。本稿では、前方監視の車載レーダにおける路面反射であるグラウンドクラッタの距離分布特性の調査および狭受信機帯域にて高距離分解能を得ることの可能な多周波ステップ CPC ミリ波レーダ出力信号へ ELD-STAP を適用することによるグラウンドクラッタの抑圧性能評価のための基礎実験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

Ground Clutter Distance Distribution Characteristics and Suppression by ELD-STAP in Automotive Millimeter-Wave Radar

Takahiro YOKOKAWA Riku TAKAHASHI 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: yokokawa.takahiro@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract Further increase in suppression performance of clutter and interference are needed in order to detect the target with high reliability in complex radio environment in automotive radar. We proposed ELD-STAP(Element-Localized Doppler Space Time Adaptive Processing) as undesired signal suppression processing which is processable by realistic computation load. This paper describes experiment of distance distribution characteristics of ground clutter in forward-looking automotive millimeter-wave radar and ground clutter suppression by means of ELD-STAP being applied to this Millimeter wave radar output using stepped multiple frequency CPC Radar which is capable to measure high range resolution with the narrowband receiver

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

1. まえがき

近年、自動車の利便性や安全性の向上を目指し車載ミリ波レーダが注目されている。車載ミリ波レーダにおいては建物や路面、ガードレールといったクラッタや他レーダの直接波である干渉波などの不要波が存在し、目標をより高信頼性にて検知するためにこれら不要波の抑圧が必要である。早期警戒航空監視システムを用途とする技術として、側方向監視下での不要波抑圧技術であるアンテナ方向と時間方向の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り、また実験

的検証の報告例は少ない。そこで、筆者らは前方監視車載レーダを想定し、計算負荷の削減と素子間結合に強い STAP 処理として ELD-STAP(Element-Localized Doppler-STAP)[2]を提案し、本手法の干渉波に対する抑圧効果を実データにて報告している[3]。

本稿では前方監視の車載レーダにおける路面反射であるグラウンドクラッタの距離分布特性の調査、および狭受信機帯域にて高距離分解能を得ることの可能な多周波ステップ CPC ミリ波レーダ[4]の出力信号へ ELD-STAP を適用することによるグラウンドクラッタの抑圧性能評価のための基礎実験を実施したので報告する。

2. STAP

2.1 パルスレーダにおける 3次元データモデル

STAP はアレーアンテナを備えたパルスレーダにおいて計測される距離(k), アンテナ(n), パルス(m)からなる 3次元の受信データを用いて不要波抑圧を行う。ある距離セル $k(k=1, \dots, K)$ における, 到来角 θ , 相対速度 v の目標からの反射波は(1)式のように表わされる。

$$x_k(n, m) = \exp(2\pi j \cdot f_{sp} \cdot n) \exp(2\pi j \cdot \tilde{f}_d \cdot m) \quad (1)$$

$$f_{sp} = \frac{d \sin \theta}{\lambda} \quad (2)$$

$$\tilde{f}_d = \frac{2v}{\lambda} T_{PRI} \quad (3)$$

f_{sp} は空間周波数, d はアンテナ素子間隔, λ は波長, \tilde{f}_d は規格化ドップラ周波数, T_{PRI} はパルス繰り返し周期である。距離セル k における計測データをデータ行列 $\mathbf{X}_k \in \mathbb{C}^{N \times M}$ として

$$\mathbf{X}_k(n, m) = \begin{bmatrix} x_k(1,1) & x_k(1,2) & \dots & x_k(1,M) \\ x_k(2,1) & x_k(2,2) & \dots & x_k(2,M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_k(N,1) & x_k(N,2) & \dots & x_k(N,M) \end{bmatrix} \quad (4)$$

と定義する。さらに, このデータ行列を 1次元のデータベクトル $\tilde{\mathbf{X}}_k \in \mathbb{C}^{NM \times 1}$ に置き換えて以下のように定義する。

$$\tilde{\mathbf{X}}_k(n, m) = [x_k(1,1) \dots x_k(N,1) \dots x_k(1,M) \dots x_k(N,M)]^T \quad (5)$$

T は行列の転置である。

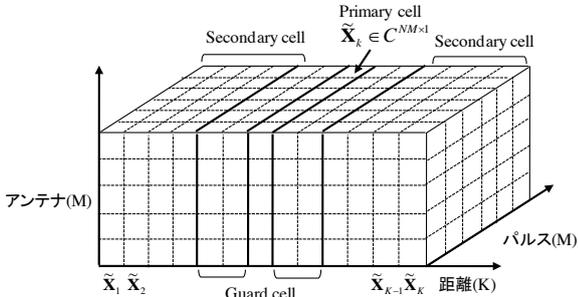


図 1. パルスレーダの計測データ

ある距離セルのクラッタの Azimuth angle-Doppler 分布は図 2 に示すように, クラッタは自速 v から推定されるドップラ周波数 f_d の拡がりには局在し, クラッタのアジマス角 θ_c におけるドップラ周波数 $f_d(\theta_c)$ は

$$f_d(\theta_c) = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta_c \quad (6)$$

と与えられる。目標が低速移動した場合, クラッタと目標の速度差が小さくなるため, 不要波抑圧技術として知られている 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)ではクラッタとの分離が困難となる。一方, STAP はこのようなクラッタスペクトル近傍の目標に対してアンテナ方向と時間方向の 2次元適応フィルタを形成することにより目標検出に期待される。

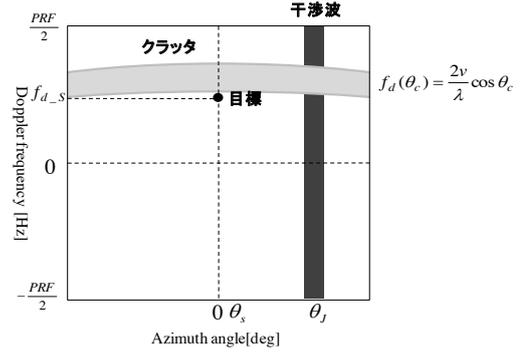


図 2. クラッタと干渉波の Angle-Doppler 分布

2.2 STAP 処理概要

図 1 に示す, 3次元計測データを用いた STAP 処理概要について説明する。STAP は目標が存在するか否かを評価する距離セルである Primary cell に着目し, この Primary cell における出力の SINR(Signal to Interference Noise Ratio)の最大化にて, 不要波抑圧を行う。出力 SINR を最大化する最適ウェイトベクトルは

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{s}_{s-t}(f_{sp}, \tilde{f}_d) \quad (7)$$

と与えられる。 \mathbf{R}_k は不要波相関行列, $\mathbf{s}_{s-t}(f_{sp}, \tilde{f}_d)$ は目標の時空間ステアリングベクトルである。

以下(i)~(iii)に示す処理手順にて STAP 最適ウェイトの推定を行い, STAP フィルタ出力を得る。

(i)不要波相関行列推定

不要波相関行列 \mathbf{R}_k を得るために Primary cell の前後のいくつかの距離セルである Secondary cell を用いて SMI(Sample Matrix Inversion)により推定を行う。

$$\mathbf{R}_k = E[\tilde{\mathbf{X}}_k \cdot \tilde{\mathbf{X}}_k^H] \cong \frac{1}{P} \sum_{p=1, p \neq k}^P \tilde{\mathbf{X}}_p \tilde{\mathbf{X}}_p^H \quad (8)$$

$E[\cdot]$ はアンサンブル平均, H は複素共役転置, P は Secondary cell の総数である。このとき, Secondary cell には目標からの反射波を含まず, 不要波のみが含まれると仮定する。そのため Secondary cell に目標の距離サイドローブが含まれないよう Guard cell を設ける。

STAP の抑圧性能の保持のためには Secondary cell における不要波が統計的に互いに独立で同一の確率密度分布に従う IID(Independent and Identically Distributed)条件を満たす必要がある。更に, Reed, Mallett, Brennan らによって, 不要波相関行列の推定に用いる Secondary cell の総数をデータベクトルの 2 倍である $P=2NM$ とした場合 50%の確率で約 3dB 以内の性能が損失すると報告されている(RMB rule)[5]。

(ii)不要波相関行列の固有値展開

\mathbf{R}_k^{-1} を不要波相関行列 \mathbf{R}_k の固有値展開にて推定を行う。 \mathbf{R}_k には, 不要波の主要固有値 λ_j のみならず, 雑音の固有値 σ が含まれており, σ が λ_j よりも十分小さい場合, \mathbf{R}_k^{-1} は不要波の主要固有値 λ_j の固有ベクトル \mathbf{q}_j が張る固有空間により

$$R_k^{-1} = \frac{1}{\sigma^2} \left(\mathbf{I}_{NM} - \sum_{l=1}^{NM} \frac{\lambda_l - \sigma^2}{\lambda_l} \mathbf{q}_l \mathbf{q}_l^H \right) \quad (9)$$

$$\approx \frac{1}{\sigma^2} \left(\mathbf{I}_{NM} - \sum_{j=1}^J \mathbf{q}_j \mathbf{q}_j^H \right)$$

と求められる． \mathbf{I}_{NM} はNM次の単位行列， J は主要固有値数である．

(iii) STAP フィルタ出力

STAP フィルタ出力 y_k は目標の含まれる可能性のある Test cell $\tilde{\mathbf{X}}_k$ と最適ウェイトベクトル \mathbf{W}_k との内積により(10)式のように求められる．

$$y_k = \mathbf{W}_k^H \tilde{\mathbf{X}}_k \quad (10)$$

3. ELD-STAP

3.1 ELD-STAP における STAP 適用のデータ空間の検討

STAP は相関行列の推定精度の保持および計算負荷の削減が課題であり，これに対し STAP を適用するデータ空間の選択が解決策として挙げられる．パルス方向のフーリエ変換(PDF)によるドップラ周波数は安定性が良い．一方，アンテナは相互干渉や素子間の位相や振幅のばらつきによりフーリエ変換によるマルチビーム間の直交性が維持できない．そのため，ELD-STAP は PDF を前処理として行う Element-Doppler Data において，前方監視車載レーダにおけるクラッタが局在する自速に相当する PDF 出力を選択し STAP 処理を適用することで，STAP の課題であるデータベクトルの次元削減が可能である．

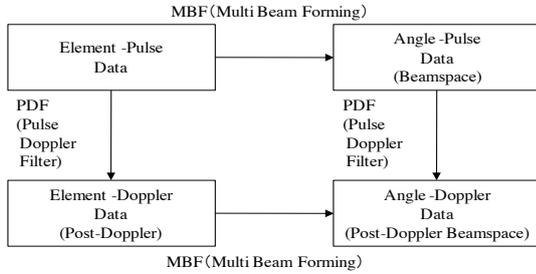


図 3. STAP 適用の各データ空間の関係

3.2 ELD-STAP 処理概要

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) パルルドップラフィルタ (PDF)

ある Secondary cell のデータ行列に対して 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．

$$\mathbf{s}_t(\tilde{f}_d) = [1 \quad \exp(2\pi j \cdot \tilde{f}_d) \quad \cdots \quad \exp(2\pi j \cdot (M-1)\tilde{f}_d)]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{s}_s(\theta) = [1 \quad \exp(2\pi j \cdot f_{sp}(\theta)) \quad \cdots \quad \exp(2\pi j \cdot (N-1)f_{sp}(\theta))]^T \quad (12)$$

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．

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{X}_k \mathbf{s}_t(\tilde{f}_d)^* \quad (13)$$

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

$$\mathbf{Y}_k(m) = \mathbf{X}_k \mathbf{s}_t(\tilde{f}_d(m))^* \quad (14)$$

$$\tilde{f}_d(m) = \frac{m}{M} \quad (15)$$

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_o 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．

$$f_d \cos(\theta_o) \leq \frac{f_d(m)}{T_{PRI}} \leq f_d \quad (16)$$

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 $\tilde{\mathbf{Y}}_k(m') \in \mathbb{C}^{NM' \times 1}$ に置き換える．

$$\tilde{\mathbf{Y}}_k(m') = [\mathbf{Y}_k(DB-M'+1) \mathbf{Y}_k(DB-M'+2) \dots \mathbf{Y}_k(DB)]^T \quad (17)$$

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 R_k の推定をする．

$$R_k \cong \frac{1}{P} \sum_{p=1, p \neq k}^P \tilde{\mathbf{Y}}_p(m') \tilde{\mathbf{Y}}_p(m')^H \quad (18)$$

(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

$$\mathbf{W}_{eld}(f_{sp}(\phi), \tilde{f}_d(m')) \approx R_k^{-1} \mathbf{s}_{eld}(f_{sp}(\phi), \tilde{f}_d(m'))$$

$$\approx \frac{1}{\sigma^2} \left(\mathbf{I}_{NM'} - \sum_{j=1}^J \mathbf{q}_j \mathbf{q}_j^H \right) \mathbf{s}_{eld}(f_{sp}(\phi), \tilde{f}_d(m')) \quad (19)$$

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

$$\mathbf{s}_{s-d}(f_{sp}(\phi), \tilde{f}_d(m')) \equiv \mathbf{s}_s(f_{sp}(\phi)) \cdot e^{j2\pi m \tilde{f}_d} \in \mathbb{C}^{N \times 1} \quad (20)$$

として，(21)式のように与えられる．

$$\mathbf{s}_{eld}(f_{sp}(\phi), \tilde{f}_d(m')) \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{s}_{s-d}(f_{sp}(\theta), \tilde{f}_d(DB-M'+1)) \\ \mathbf{s}_{s-d}(f_{sp}(\theta), \tilde{f}_d(DB-M'+2)) \\ \vdots \\ \mathbf{s}_{s-d}(f_{sp}(\theta), \tilde{f}_d(DB)) \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{NM' \times 1} \quad (21)$$

(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．

$$y_k(m') = \mathbf{W}_{eld}(f_{sp}(\phi), \tilde{f}_d(m'))^H \tilde{\mathbf{Y}}_k(m') \quad (22)$$

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 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ

本装置は表 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 4 に送信シーケンス, 図 5 に信号処理ブロック図を示す.

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	$0.8\lambda(3.96\text{mm})$

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	$0.2\mu\text{sec}(30\text{m})$
符号長	16
パルス繰り返し間隔 (PRI)	$3.5\mu\text{sec}$
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)	$(\pm 79.64\text{km/h})$
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

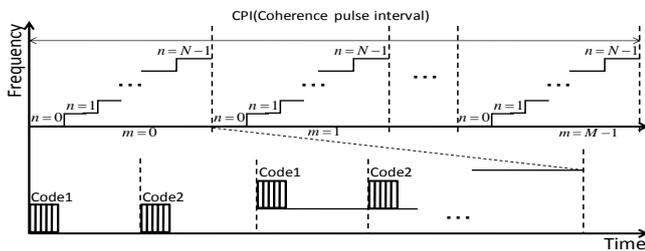


図 4. 多周波ステップ CPC 方式送信シーケンス図

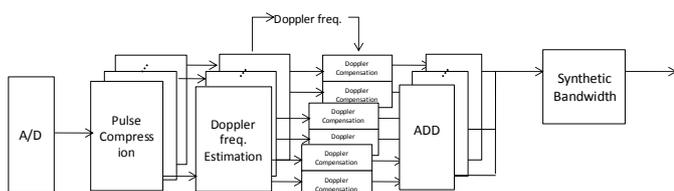


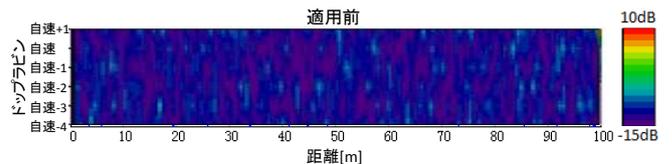
図 5. 多周波ステップ CPC 方式信号処理ブロック図

4.2 グラウンドクラッタ計測実験

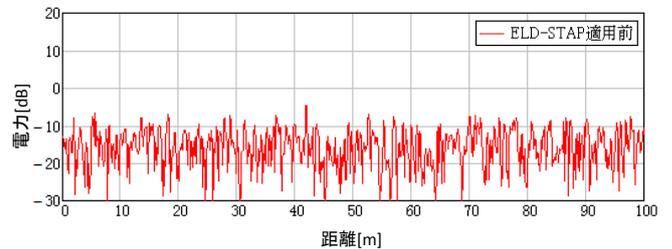
レーダ車載環境において, ELD-STAP 適用による抑圧対象となる地面からの反射波であるグラウンドクラッタの計測を実施した. 以下各計測データに対して, 多周波ステップ CPC ミリ波レーダの合成帯域処理後の 1ch の出力から ELD-STAP で選択されるドップラビンにおける Range-Doppler map を(a), 自車速度に該当するドップラビンの Range-Amplitude を(b)に示す.



図 6 アスファルト路面における実験風景

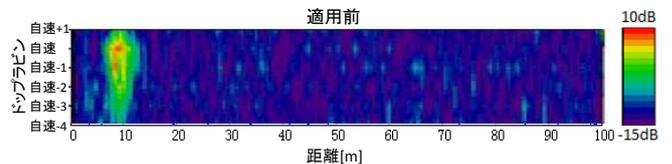


(a) ELD-STAP 選択ドップラビンの Range-Doppler map

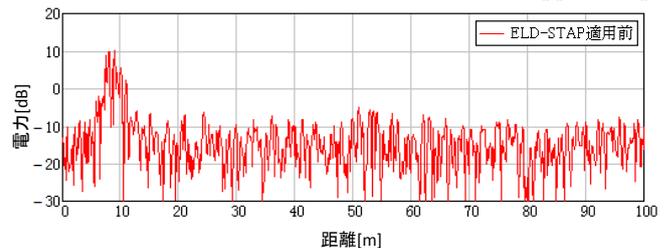


(b) 自車速度に該当する Range-Amplitude

図 7 アスファルト路面計測結果(レーダ角度 0deg)



(a) ELD-STAP 選択ドップラビンの Range-Doppler map



(b) 自車速度に該当する Range-Amplitude

図 8 アスファルト路面計測結果(レーダ角度 3deg)

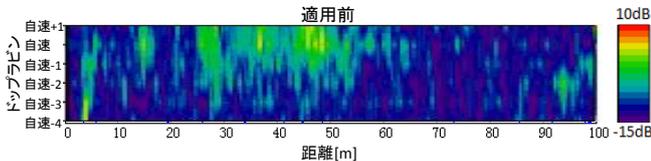
まず、図 6 に示すような整備されたアスファルトの路面においてデータ計測を実施した。アスファルト路面における計測結果を図 7 に示す。図 7(b) よりアスファルト路面ではノイズフロアレベルの電力の計測が得られ、グラウンドクラッタは計測されなかった。さらに、レーダを地面方向に 3deg 傾けデータ計測を実施し、その計測結果を図 8 に示す。図 8(b) より本レーダのエレベーション角度(3deg)とレーダ設置高さで(0.4m)から計算される範囲に該当する 5~15m 距離にグラウンドクラッタが計測されることを確認した。

次に、図 9 に示すような路面に砂利が存在する路面においてデータ計測を実施した。砂利が存在する路面における計測結果を図 10 に示す。砂利が存在する路面においては路面からアンテナに向かう反射が増え、図 10(b) より 10m 以降の広範囲の距離でグラウンドクラッタが計測されることを確認した。

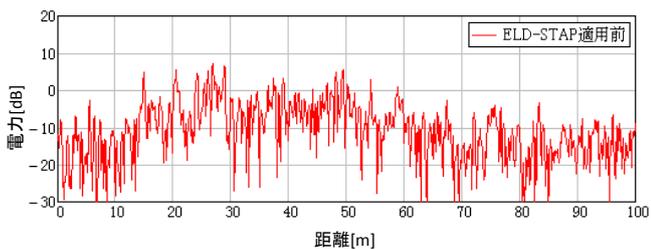
以上の結果より、整備されたアスファルト路面においては路面からアンテナに向かう反射は少なく、レーダが地面方向に傾いた状態を除き、グラウンドクラッタは計測されにくい。一方、砂利が存在する路面においては路面からアンテナに向かう反射が増え、グラウンドクラッタが広範囲の距離で計測されることを確認した。



図 9 砂利存在路面における実験風景



(a) ELD-STAP 選択ドップラビンの Range-Doppler map



(b) 自車速度に該当する Range-Amplitude

図 10 砂利存在路面における計測結果

4.3 グラウンドクラッタ抑圧性能評価

レーダ車載環境において取得したグラウンドクラッタに対して ELD-STAP を適用した際の結果および抑圧性能を示す。ELD-STAP を適用するデータはアレーキャリブレーションを実施せず、素子間の振幅・位相誤差が含まれたデータである。選択したドップラビン数は 6 とし、Primary cell の両側にそれぞれ Guard cell を 5, Secondary cell を 20 設けた。

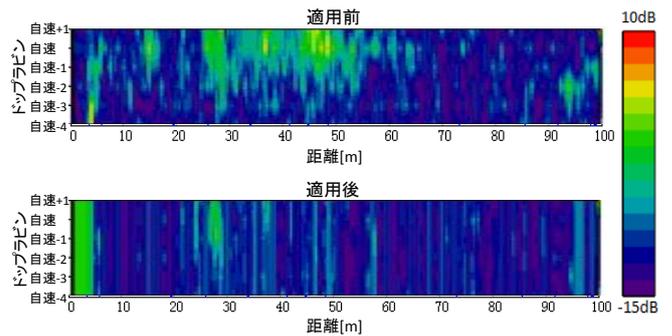
以下各計測データに対して、正面方向(0deg)の ELD-STAP 適用前後の Range-Doppler map および自車速度に該当する Range-Amplitude を示す。

まず、路面に砂利が存在する路面における計測データに対して ELD-STAP を適用した。図 11 に示すようにグラウンドクラッタの抑圧が広範囲の距離で確認される。この時、20~80m のグラウンドクラッタ分布範囲の電力平均値を適用前後で比較すると、約 8dB の抑圧を確認した。

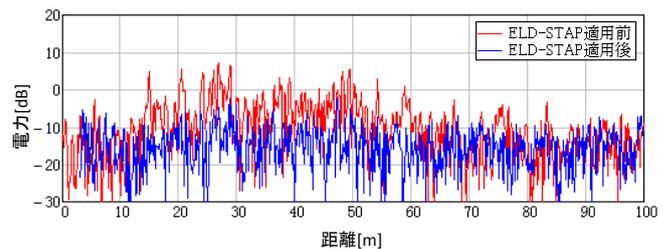
さらに、路面に砂利が存在する路面において、ELD-STAP で選択するドップラビンに含まれる 0.5km/h の低速移動目標を車両正面 15m に設置し ELD-STAP を適用した。図 12(b) より本計測データにおいては ELD-STAP 適用後目標の電力に若干の劣化が見られるが、20~80m のグラウンドクラッタ分布範囲の電力平均値を適用前後で比較すると、約 5dB の抑圧を確認した。

表 3 ELD-STAP パラメータ

選択ドップラビン数	6
Secondary cell (両側総数)	20 (40)
Guard cell (両側総数)	5 (10)



(a) ELD-STAP 選択ドップラビンの Range-Doppler map

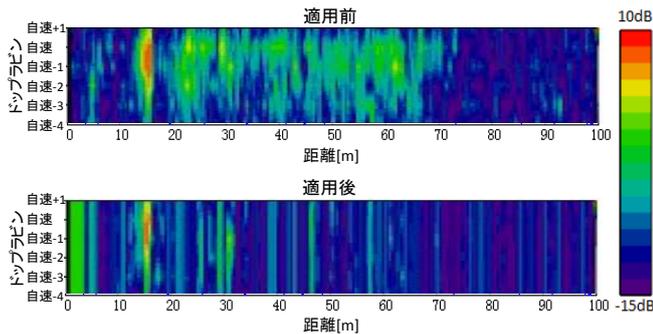


(b) 自車速度に該当する Range-Amplitude

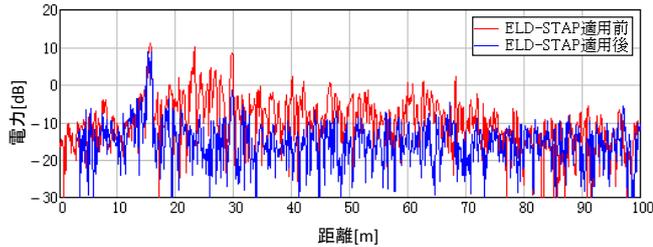
図 11 砂利存在路面に対する ELD-STAP 適用結果

最後に、ELD-STAP と従来法である PDF+MBF にてグラウンドクラッタの抑圧性能の比較を実施する。各手法の出力における Range-Doppler map を(a), 自車速度に該当するドップラビンの Range-Amplitude を(b)に示す。ただし、PDF+MBF の表示結果は ELD-STAP 出力の雑音振幅に規格化した結果である。図 13(b)より ELD-STAP の方が PDF+MBF よりグラウンドクラッタを抑圧することを確認した。

以上の結果より、前方監視の車載レーダにおける計測データに対して ELD-STAP を適用することで、グラ

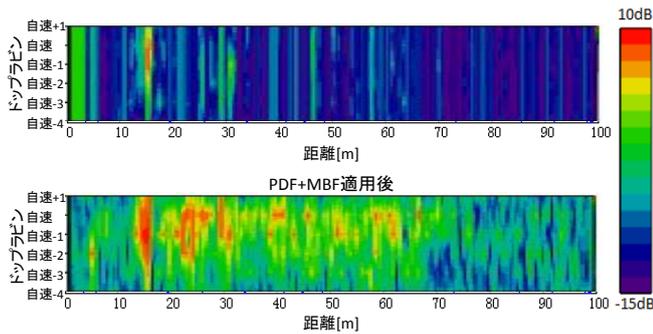


(a) ELD-STAP 選択ドップラビンの Range-Doppler map

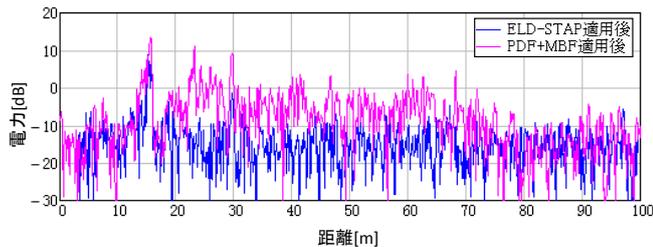


(b) 自車速度に該当する Range-Amplitude

図 12 目標が存在データに対する ELD-STAP 適用結果



(a) ELD-STAP 選択ドップラビンの Range-Doppler map



(b) 自車速度に該当する Range-Amplitude

図 13 ELD-STAP および PDF+MBF の出力結果比較

ウンドクラッタを抑圧することを確認した。今回使用したアレーアンテナは、正面方向においても数 deg 程度、数 dB 程度の差異を有するが、前記評価結果は特にこれらを補正することなく実施したものであり、ELD-STAP では通常の BF と異なり、アレー誤差を補正する機能があることも実験的に確認できた。

5.むすび

本稿では前方監視の車載レーダにおける路面反射であるグラウンドクラッタの距離分布特性の調査、および多周波ステップ CPC ミリ波レーダ出力信号へ ELD-STAP を適用することによるグラウンドクラッタの抑圧性能評価のための基礎実験を実施した。

レーダ車載環境における路面反射クラッタの距離分布特性は路面状況によって異なり、整備されたアスファルト路面では地面からアンテナに向かう反射は少なく、グラウンドクラッタは計測されない。一方砂利が存在する路面においては地面からアンテナに向かう反射が多く、グラウンドクラッタの計測を確認した。さらに、グラウンドクラッタが多く計測されたデータに対して ELD-STAP を適用することで、グラウンドクラッタの抑圧を確認した。

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] 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
- [5] Brennan LE, Shudaheer FM, "Subclutter visibility demonstration", Tech Rep RL-TR-92-21, Adaptive Sensors Incorporated, 1992.
- [6] Alexander Haimovich, "The Eigencanceler: Adaptive Radar by Eigenanalysis Methods", IEEE transactions on aerospace and electronic systems, Vol.32, No.2, pp.532-534, April 1996
- [7] L.S.REED, J.D.MALLET, L.E.BRENNAN "Rapid Convergence Rate in Adaptive Arrays" IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS VOL. AES-10, NO. 6, pp. 853-863, NOVEMBER 1974