

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

渡辺 一宏 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所 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: watanabe.kazuhiro@inabalab.ee.ucc.ac.jp

あらまし 筆者らは、多目標の分離が可能であり狭受信機帯域にて高距離分解能を実現可能な多周波ステップ CPC 方式を提案し実用化に取り組んでいる。今回、本方式によるミリ波レーダを用いて、静止車両、地面クラッタ、歩行者、ガードレールが存在する各種環境における計測データの取得を行った。本稿では、実環境の計測データの解析によって本方式の特徴である多目標分離、高距離分解能、遠距離性を確認したのでその結果について述べる。また、筆者らは、路面や構造物からの反射波であるクラッタや他レーダからの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、多周波ステップ CPC ミリ波レーダにより取得した計測データに ELD-STAP を適用することで、グラウンドクラッタに対する抑圧効果について報告してきた。今回は、上述の計測実験で得られた結果から静止車両や歩行者の簡易モデルを作成し、これらモデルを使い ELD-STAP の特性についてシミュレーションによる統計評価を行ったのでその結果を報告する。

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

Field Experiment by Stepped Multiple Frequency CPC Rader and Simulation for ELD-STAP

Kazuhiro WATANABE 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: watanabe.kazuhiro@inabalab.ee.ucc.ac.jp

Abstract Field experiments were performed in various environments where a vehicle, a walker, a guardrail, ground clutter is exist using the millimeter wave radar based on stepped multiple frequency CPC method. These experiment results show high range resolutions and superior isolation which are the features of this method. In previous our research, Element Localized Doppler STAP (ELD-STAP) which suppresses undesired signals such as ground clutter and interference from other radar has been presented. And it was also experimentally indicated that ELD-STAP could suppress the ground clutter. This paper describes statistical evaluation of ELD-STAP characteristics by simulation using simple models of vehicle and walker which were constructed from above described field experiment results.

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

1. まえがき

近年、障害物や人間を検知して衝突を回避する自動ブレーキ機能や、周辺車両の車間距離や速度を計測して自車の速度を制御する衝突予防システムが脚光を浴びている。これらを実現する技術としてミリ波レーダ

が活用されている。筆者らは、現在車載レーダとして多く搭載されている FMCW 方式に比べ、多目標の分離が可能で狭受信機帯域にて高距離分解能を実現可能な多周波ステップ CPC 方式[1]を提案し、実用化に取り組んでいる。今回、多周波ステップ CPC ミリ波レーダ

を用い、静止車両、地面クラッタ、歩行者、ガードレールが存在する各種環境において計測実験を行い、本方式の特徴である多目標分離、高距離分解能、遠距離性を実環境で確認したので報告する。

また、実用化に向けた取り組みの一つとして、建物や路面、ガードレールといったクラッタや他レーダによる干渉波などの不要波環境での目標検出に向けて、多周波ステップ CPC ミリ波レーダの出力信号に対して時空間適応信号処理である ELD-STAP[2][3]の適用を検討している。これまで、グラウンドクラッタの抑圧や、歩行者の検出における ELD-STAP の有効性を報告してきた[4][5]。今回、前述の各種環境における計測実験で得られた結果から静止車両や歩行者の簡易モデルを作成し、これらモデルと 100 種の疑似クラッタを用いてシミュレーションにより ELD-STAP 特性の統計評価を行ったのでその結果を報告する。

2. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ

2.1. 多周波ステップ CPC 方式

狭帯域で高距離分解能が得られ、比較的低速の信号処理であることから車載レーダなどにおいて採用されている FMCW 方式がある。この方式による、距離および速度の推定においては、Up-Sweep と Down-Sweep の 2 つの周波数 Sweep 送信波を用い、その受信信号における各ビート周波数のペアリングが必要となる。しかし、反射点が複数存在する場合には、近くの別の反射点からのビート周波数を誤ってペアリングをしてしまい誤計測を引き起こすことがある。また、近距離静止物クラッタがフロア雑音となり検知性能の低下につながるという課題がある。

筆者らが提案する多周波数ステップ CPC 方式は、パルスドップラフィルタにより速度を求め、位相差を用いた距離推定（合成帯域法）により、送信帯域幅と比較して狭帯域受信機帯域幅にて高距離分解能が得られ、遠距離性も両立している。また、ドップラシフトに対する位相補正処理を行うことにより、CPC パルス圧縮における高い距離サイドローブ特性を実現している。

2.2. 計測実験

今回、計測実験に使用したミリ波レーダのパラメータを表 1 に示す。

表 1 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ装置構成仕様

送信周波数	60.5GHz
送信帯域幅	430MHz
周波数ステップ幅	50MHz
周波数ステップ数	8
パルス数、計測時間	512, 28.6msec
距離分解能	0.35m
速度分解能	0.311km/h
最大速度視野	±79.64km/h

(1) 静止車両

図 1 に、右後方から 46.5km/h で接近する多周波ステップ CPC レーダによって、車幅 1.7m、車長 4m の静止車両を捉えた様子を示す。図 1 右は、計測された車両の速度と距離を 2 次元マップ（以降、RV マップ）で示したものである。車両の各部からのドップラ計測値はレーダから見込む角度に応じて変化し、速度に変換すると、車両の左後端は 39km/h、右後端は 42km/h、右先端は 44km/h と計測されている。本ミリ波レーダの高距離分解能によって車両各部が分離して観測され RV マップ上で車両の外形を確認することができる。

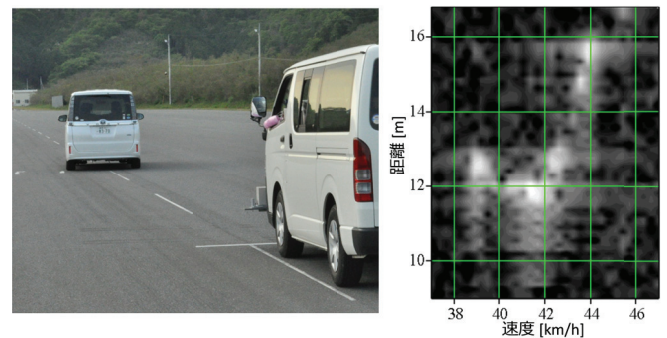


図 1. 静止車両の計測

(2) 歩行者

図 2 は、右後方から 19km/h で接近するレーダによって、砂利が多く含まれる場所で静止車両と歩行者を同時に捉えたものである。静止車両の寸法は図 1 で使用したものと同一である。歩行者は、約 3km/h で右から左へ車両先頭の約 1m のところを横切っており、RV マップ上で距離 20.5m のところ（車両先頭 19.5m の 1m 先）に観測されている。レーダの軸線に対して垂直に横切って歩行しているため、レーダ対しては約 0.5km/h で離反する動きとなり相対速度 18.5km/h 付近で計測されている。速度は手足の振りにより 18~19km/h の間で広がっている。また、RV マップの特に距離 20m 以遠、速度 19km/h 以下の範囲では、砂利や草からの反射によるクラッタが確認できる。

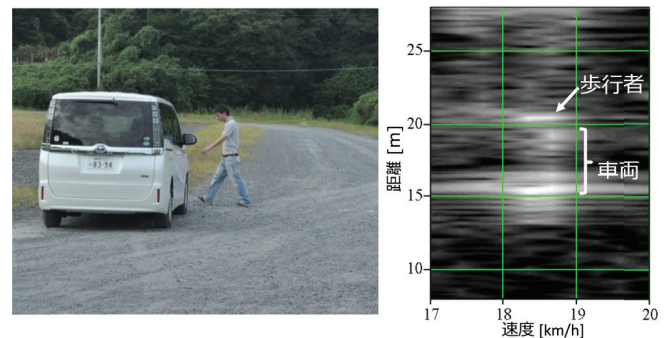


図 2. 歩行者と静止車両の計測

(3) ガードレール

図3は、直線道路の左車線を25.8km/hで走行して道路脇のガードレールを捉えたものである。ガードレールは、1.85m間隔で並ぶ支柱に取り付けられている。RVマップにおいて、各支柱が1.85m間隔で分離して観測されていることが確認できる。距離20mより近いところではレーダから見込む支柱間の角度差が大きくなりそれに応じてそれぞれ異なる速度でとして観測されている。すなわち、多周波ステップCPC方式により距離および速度の異なる多目標を分離可能であることが示されている。また、図3下の距離/電力特性に示すように、距離100mに渡って数十本の支柱がそれぞれ分離して観測されており、本方式が高距離分解能に加え遠距離性も両立していることが確認できる。

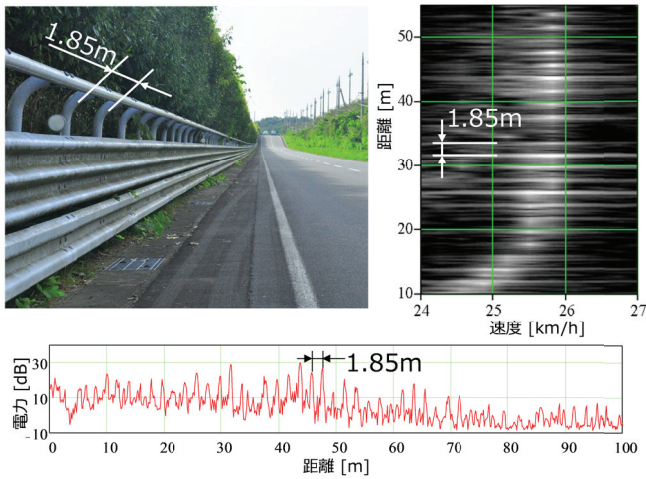


図3. ガードレールの計測

3. 時空間適応信号処理による不要波抑圧

今回、上述の計測実験で得られた結果から静止車両や歩行者の簡易モデルを作成し、これらモデルを使い筆者らが提案する不要波抑圧技術であるELD-STAPの特性についてシミュレーションによる統計評価を行った。

3.1. ELD-STAP 法

路面やガードレールといったクラッタや他レーダによる干渉波などの不要波の抑圧は、目標検出に向けた一つの課題である。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STAP(Space Time Adaptive Processing[6])がある。このフィルタは、入出力の信号対不要波電力比(S/C)を最大とするMSN(Maximum Signal to Noise Ratio)により、2次元空間でクラッタに対してヌルを形成するものである。

筆者らは、前方監視レーダにおいてクラッタが局在する自速付近のドップラ周波数情報に着目しSTAPに比べ大幅に計算負荷を小さくしたELD-STAP(Element-

Localized Doppler-STAP[2][3])を提案している。また、これまでに4素子のアレイアンテナを備える多周波ステップCPCミリ波レーダを使い、28.6msの計測時間で得られた出力信号に対して本ELD-STAPを適用し、砂利が多く存在する路面からのグラウンドクラッタの抑圧や、歩行者とグラウンドクラッタが同時に受信される環境におけるELD-STAPの有効性を報告してきている[4][5]。

3.2. シミュレーションモデル

ELD-STAPのシミュレーションに向けて、下記の車両、歩行者、クラッタのモデルを作成し、多周波ステップCPC方式に基づく疑似反射信号を生成した。

(1) 車両モデル

図4に示すように、レーダ波が当たる面に複数の点列を並べることによって車両を簡易的にモデル化した。点列の間隔は、事前検討で点列からの反射波を合成した結果が十分に安定する細かさとし、隣接する点のレーダからの行路差が2.3cmになるように設定した。各点の位相は、レーダからの距離で決まる位相とし、振幅は一定値をとした。図5左は、前項2.2の静止車両の計測実験と同じ位置に設置した点列による車両モデルを使ったシミュレーションRVマップである。図5右に示す実際の計測実験結果とよく合致することを確認した。

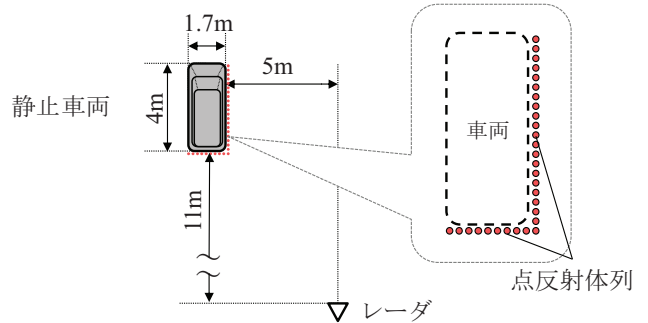


図4. 点反射体列による車両モデル

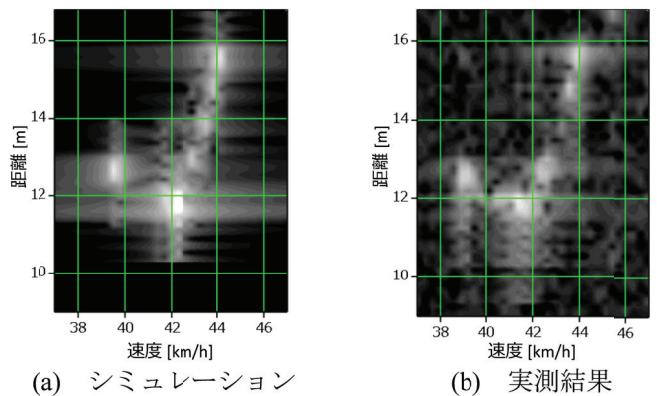


図5. 静止車両のRVマップ

(2) 歩行者モデル

歩行者のドップラ計測による速度は、過去の計測から手足の振りにより、計測時相によっては 10km/h ほど広がることを確認している。今回、歩行速度を中心に $\pm 5\text{km/h}$ の間に分布する複数の点を同じ位置に存在させることで簡易的にモデル化した。各点の位相は $0 \sim 2\pi$ でランダムに与え、振幅は指定振幅を中心にランダムに変動させて与えた。

(3) クラッタモデル

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)条件を満たすものとして、クラッタをランダムな位相・振幅の点反射体の集合でモデル化した。シミュレーション領域を十分にカバーする範囲に、距離方向 12cm 間隔、方位方向 1° 間隔で、振幅分布が Weibull 分布となる点反射体をセクタ状に配置した。

3.3. ELD-STAP のシミュレーション

クラッタに埋もれる点目標や歩行者の検出を想定して、前項 3.2 で述べたモデルを使い下記項目について ELD-STAP の特性についてシミュレーションを行った。

- (1) 点目標+IID クラッタ
- (2) 歩行者+IID クラッタ
- (3) 歩行者+車両+IID クラッタ

レーダは、30km/h で目標に接近するものとした。図 6 に、各モデルで生成した反射信号の RV マップを示す。また、ELD-STAP のパラメータは、表 2 の通りである。

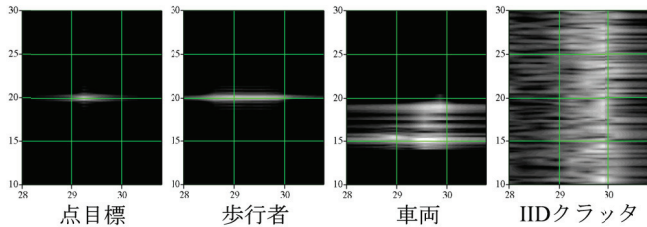


図 6. シミュレーションで用いた反射信号

表 2. ELD-STAP のパラメータ

選択ドップラビン数	10
参照セル数 (片側)	40
ガードセル数(片側)	20

3.3.1. 点目標+IID クラッタ

図 7 に、IID クラッタに埋もれる点目標に対するシミュレーション結果を示す。点目標は、レーダの軸線の左 2.5m、距離 20m のところを離反する方向へ 29.5km/h で移動している。図中(a)は、ELD-STAP 適用前 (パルスドップラフィルタと通常のビームフォーミング) による RV マップである。(b)は、ELD-STAP 適用後の RV マップ。(c)は、ELD-STAP 適用前後の距離/電力特性で、各レンジビンのドップラ(速度)方向の最大値である。

(a)(b)(c)は S/C0dB, C/N30dB における特性を示した。(d)(e) は、入力 S/C と出力 S/C の比である IF(Improvement factor[2][7])の特性について統計評価を行った結果である。統計評価は、100 種の IID クラッタデータを用い、C/N を 30dB,20dB,10dB として行った。エラーバーは標準偏差である。(d)は入力 S/C に対する IF 値、(e)は目標の存在する距離ビンにおける速度に対する IF 値である。

RV マップ(a)(b)および距離/電力特性(c)の比較から、クラッタに埋もれた点目標が、ELD-STAP により点目標を残しつつクラッタを約 25dB 抑圧できていることが確認できる。点目標とクラッタとの速度差がわずかに 0.5km/h であることもあり、点目標の電力が ELD-STAP により 10dB ほど劣化しているが、それ以上にクラッタの抑圧が大きいため、クラッタ電力に比べて約 15dB 大きい値となった。S/C に対する IF 値(d)は、S/C に関わらず一定となった。速度に対する IF 値(e)は、クラッタ速度である 30km/h 付近で谷となるが、クラッタ速度から外れたところでは 20dB 以上の IF 値が得られる。また、(d)(e)において、ELD-STAP はノイズに近いレベルまでクラッタを抑圧することから C/N が大きく(ノイズが低く)なるにつれて IF 値が上がる。

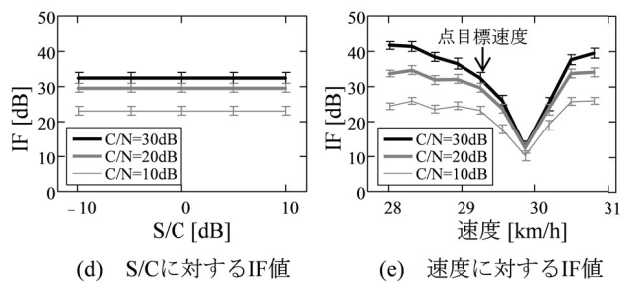
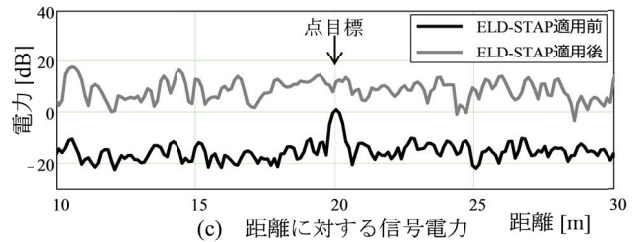
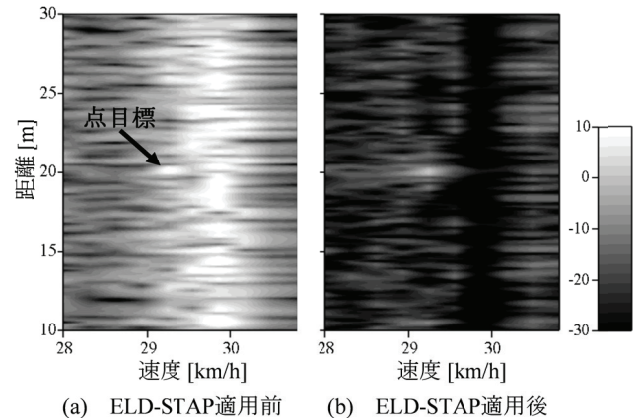


図 7. 点目標+IID クラッタのシミュレーション

3.3.2. 歩行者+IID クラッタ

図 8 に、IID クラッタに埋もれる歩行者に対するシミュレーション結果を示す。歩行者は、先に述べた歩行者モデルを使い、レーダの軸線の左 2.5m、距離 20m のところを、右から左へ 4km/h で移動している。手足の振りによる速度広がり は 10km/h とした。この広がり は、レーダとの相対速度で 28.7~29.9km/h となる。

RV マップ(a)(b)の比較から、速度に広がりを持つ歩行者に対しても、点目標と同様に ELD-STAP によりクラッタを約 25dB 抑圧できている。速度方向で電力最大値をプロットした距離/電力特性(c)においては、S/C0dB でクラッタレベルと同レベルの歩行者が、ほとんど電力劣化することなく残っていることが分かる。これは、28.7~29.9km/h 速度広がりを持つために、クラッタ速度から離れた 28.7km/h 付近では、(e)に示す IF 値が高くなるためである。

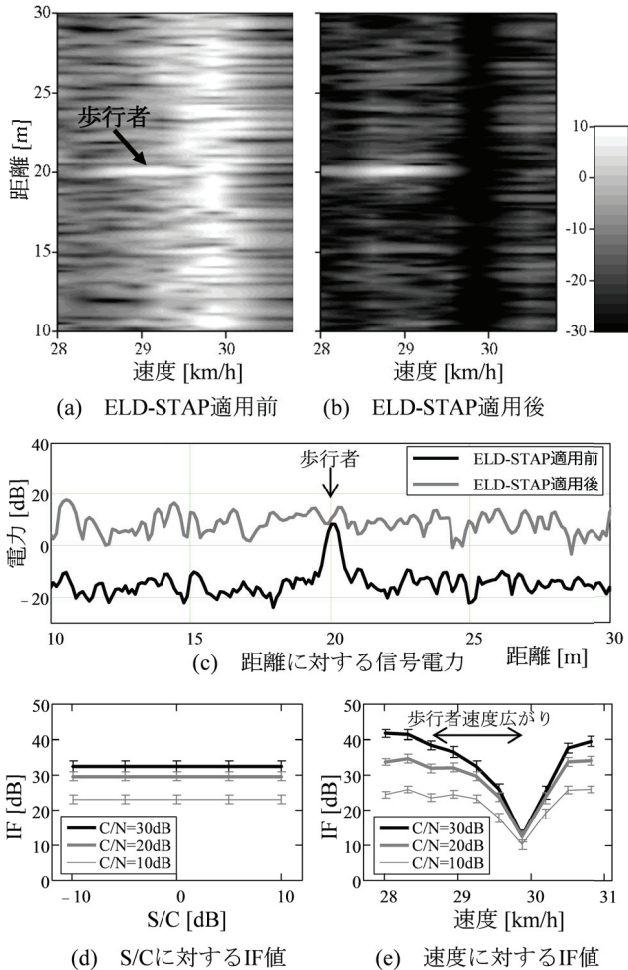


図 8. 歩行者+IID クラッタのシミュレーション

3.3.3. 歩行者+車両+IID クラッタ

2.2 計測実験の図 2 で示したような、静止車両の先頭 1m のところを横切る歩行者を想定したシミュレーションの結果を図 9 に示す。歩行者の条件は図 7 と同じ

で、車両は図 1、図 2 のものと同サイズとし、先に述べた車両モデルを使用した。また、車両の振幅は歩行者よりも 20dB 大きく設定した。

歩行者に対して ELD-STAP を行うにあたり、参照セルに車両が非 IID のクラッタとして混在することになるが、図 8(b)(c)と図 9(b)(c)の比較から、歩行者に対する車両の影響はほとんど見られなかった。また、(d)(e)の IF 値においても大きな劣化は無い。振幅の大きな車両後端部については約 30dB 抑圧された。しかし、抑圧されたクラッタレベルには至らず少し消え残った。

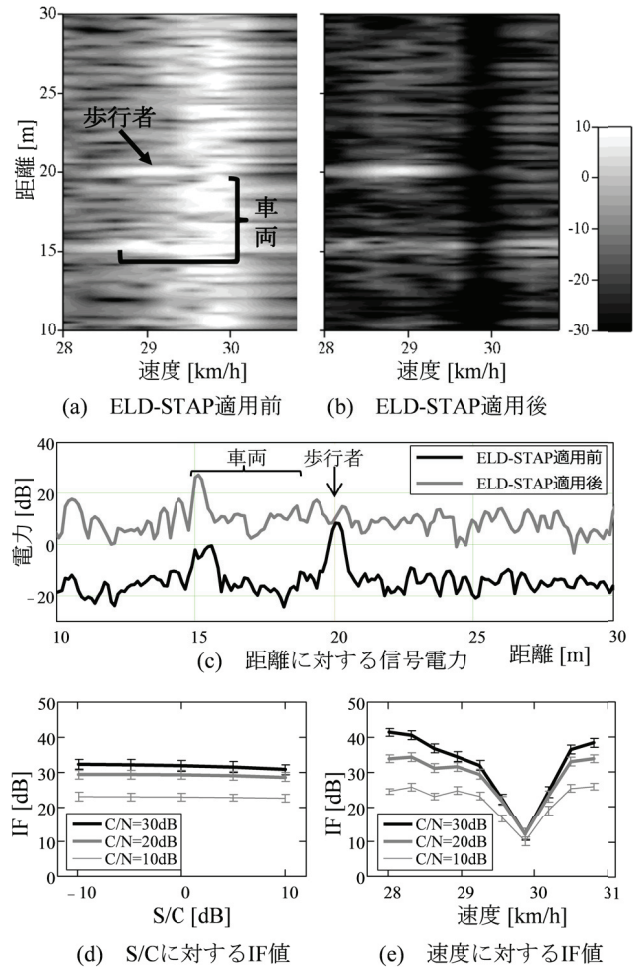


図 9. 歩行者+車両+IID クラッタのシミュレーション

3.3.4. ガードセル数と参照セル数

電力の大きな車両後端部の消え残りの低減に向けて、ELD-STAP のガードセル数と参照セル数について検討を行った。検出すべき歩行者の電力を落とさず歩行者と車両後端部の電力差を大きくとれる条件を、100 種のクラッタを用い統計的に調査した。図 10 に、ガードセル数に対する ELD-STAP 後の歩行者のピーク電力を示す。おおむね、参照セル数にかかわらずガードセル数が 3 以上で電力は一定となった。図 11 に、ガードセル数に対する ELD-STAP 後の歩行者の電力と車両後端部のピーク電力差を示す。S/C0dB での結果であるが、

おおむね、ガードセル数 2~5 でピークとなり、参照セル数が大きくなるにつれて電力差も大きくなる傾向が見られた。

そこで、歩行者の電力を落とさず電力差を大きく取れる条件として、ガードセル数 4, 参照セル数 80 を選びシミュレーションを行った。結果を図 12 に示す。ELD-STAP による車両後端部の電力が、図 9 に比べ約 6dB 低くなり、消え残りが改善された。

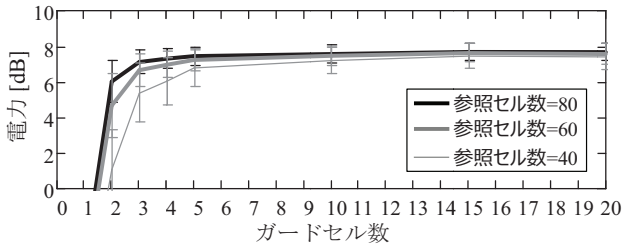


図10. ガードセルに対する歩行者のピーク電力

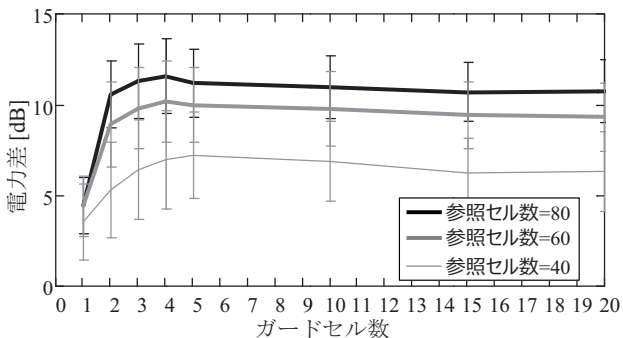


図11. ガードセルに対する歩行者と車両のピーク電力差

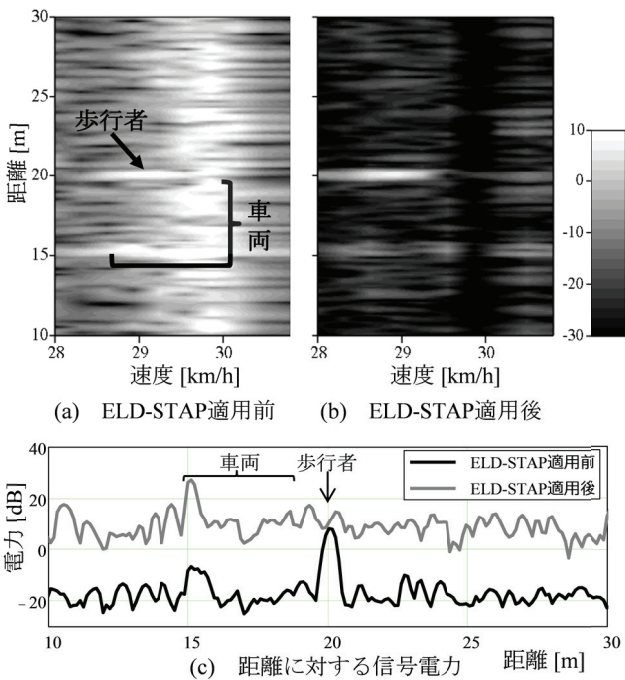


図 12. 歩行者+車両+IID クラッタのシミュレーション (ガードセル数:4, 参照セル数:80)

むすび

本稿では、多周波ステップ CPC 方式を使ったミリ波レーダ用い、車両、地面クラッタ、歩行者、ガードレーラが存在する各種環境において計測実験を行い、計測結果より本方式の特徴である多目標分離、高距離分解能、遠距離性が実現されていることを確認した。

また、不要波環境での目標検出に向けて、多周波ステップ CPC ミリ波レーダの出力信号に対して、ELD-STAP の適用を検討した。今回の計測実験で得られた結果から静止車両や歩行者の簡易モデルを作成し、これらモデルと 100 種の IID クラッタを用いてシミュレーションにより ELD-STAP 特性の統計評価を行った。速度に広がりのある歩行者に対しても点目標とほぼ同じ抑圧量でクラッタを抑圧できることを確認した。車両が存在する非 IID 環境においても、歩行者の電力を落とすことなく車両およびクラッタを抑圧することができた。さらに、ELD-STAP のガードセル数と参照セル数に対する車両の抑圧量について調査し、一例ではあるが、セル数を選ぶことにより、さらに車両を抑圧し歩行者を検出しやすくできる可能性を示した。

ELD-STAP は、28.6ms の短時間計測で低速移動物を信号処理により検出可能で、レーダに対する相対速度が遅い横切り歩行者の検出に有効な手段と考える。

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] 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
- [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] 高橋陸, 横川貴洋, 渡辺一宏, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, ELD-STAP による信号対路面反射クラッタ比の改善, 信学技報, SANE2015-23, pp.1-6, 2015-7
- [6] W.L. Melvin, "A STAP overview", IEEE AES Systems Magazine Special Tutorials Issue.Vol.19, No.1, pp.19-35, January 2004
- [7] Ward, J., "Space-Time Adaptive Processing for Airborne Radar", IEE Colloquium on Space-Time Adaptive Processing (Ref. No. 1998/241), April 1998, pp. 62-72.