

# 狭受信機帯域幅での広帯域レーダ（多周波ステップ CPC/ELD-SATP） による歩行者／車両判別技術の検討

渡辺 一宏 石崎 健太 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: watanabe.kazuhiro@inabalab.ee.uec.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広帯域レーダ方式（多周波ステップ CPC 方式）を提案している。また、本方式の出力信号に対し、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時空間適応信号処理（ELD-STAP）を提案している。これまで、道路脇からのクラッタが存在する環境下で、多周波ステップ CPC ミリ波レーダを用い道路を横切る歩行者のフィールド計測データを取得し、ELD-STAP のクラッタ抑圧性能の評価を行ってきた。今回、クラッタ抑圧で得られた検出物に対して ELD-STAP 処理結果の特徴量により歩行者と車両の判別技術の検討を行ったのでその結果を報告する。

**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, 歩行者検出

## Discrimination Method of Pedestrians and Cars by Broadband Radar with Narrow Receiver Bandwidth

Kazuhiro WATANABE Kenta Ishizaki 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.uec.ac.jp

**Abstract** The authors have proposed a broadband radar system (stepped multiple frequency CPC radar) capable of multi-target separation and achieving high range resolution in the narrow receiver band. And we have proposed Space-Time Adaptive Signal Processing (ELD-STAP) that suppresses unnecessary waves from road and structures and interference waves from other radars using the multi-frequency step CPC radar output signal. We obtained field measurement data of pedestrians crossing the road using this radar under some environments where clutter from the side of the road exists. We studied the method of discriminating between pedestrians and vehicles using feature quantities of ELD-STAP results and report the results.

**Keyword** ELD-STAP, Clutter suppression, stepped multiple frequency CPC, pedestrian detection

### 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。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。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]の適用を検討している。これまで、多周波ステップ CPC 方式を使ったミリ波レーダ用い、道路脇の植込み、ガードレール、車両、草地からの地面クラッタが存在する各種環境において道路を横切る歩行者のフィールド計測データを取得し、ELD-STAP によるクラッタ抑圧結果を示

すとともに抑圧性能の特性評価結果を示してきた[3].  
 今回、クラッタ抑圧で得られた検出物に対して  
 ELD-STAP 処理結果の特徴量を使った歩行者と車両の  
 判別技術の検討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

筆者らが提案する多周波数ステップ CPC 方式は、  
 CPC パルス圧縮と位相差を用いた距離推定（合成帯域  
 法）を複合したレーダ変調方式である。時分割で2つ  
 の相補となる CPC(Complimentary phase code)符号の送信  
 と複数個の送信周波数切り替えを行い、受信時に送信  
 周波数毎に復調する。受信信号をパルス圧縮処理した  
 後ドップラ周波数推定を行う。時分割送信によるドッ  
 プラシフトに対する位相補正処理を行い、相補の CPC  
 受信信号の加算により距離サイドローブを抑圧する。

さらに、複数ステップの周波数方向に受信信号を合  
 成する合成帯域法により、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るとともに遠距離性も両  
 立している。図1に送信シーケンス、図2に多周波ス  
 テップ CPC 方式の信号処理ブロック図、表1にレーダ  
 パラメータを示す。

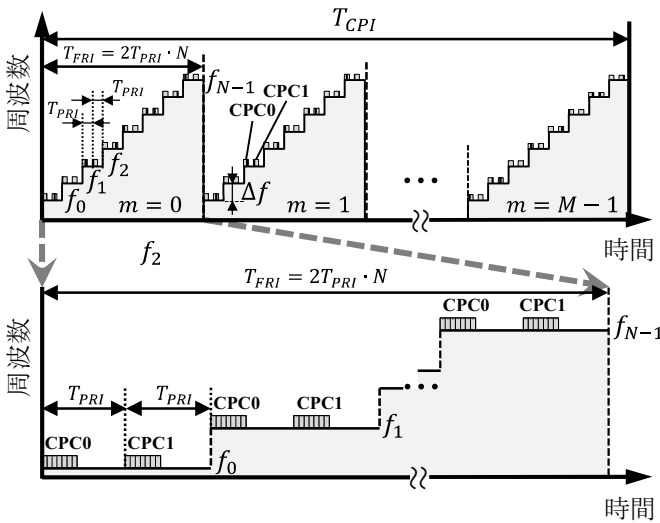


図1. 多周波ステップ CPC 方式送信シーケンス図

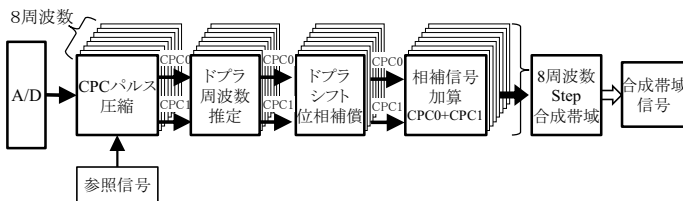


図2. 多周波ステップ CPC 方式の信号処理ブロック図

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

## 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

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、入出力の信号対クラッタ電力比 (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])を提案している。  
 ELD-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), ドップラ(m)  
 からなる 3 次元の受信データを用いてクラッタ抑圧  
 を行う (図 3-a)。

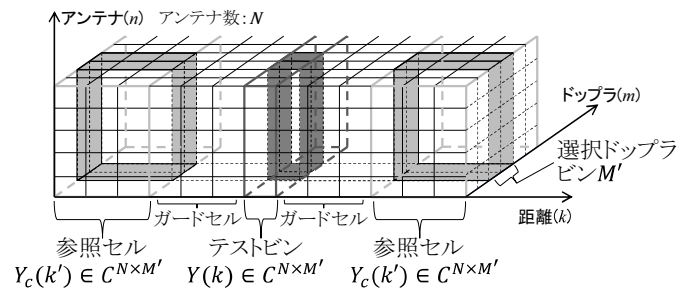


図 3-a. ELD-STAP 法で使用する受信データ

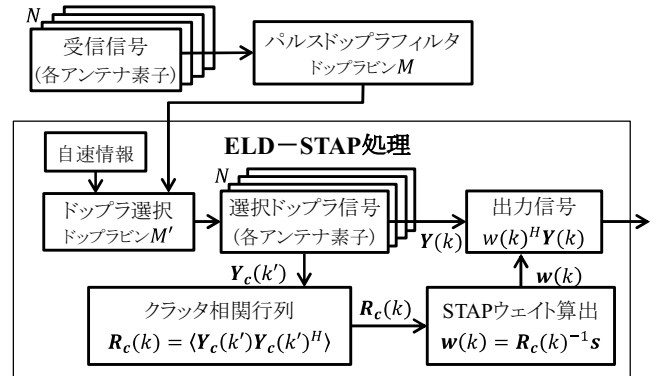


図 3-b. ELD-STAP 法の処理ブロック図

ELD-STAP ウェイト算出にはクラッタのみが含まれる信号の相関行列の逆行列が必要であり (図 3-b), 注目するテスト距離ビンの前後を参照セルとして推定する (図 3-a). 計算負荷を小さくするため, パルスドップラフィルタを前処理とすることで自速付近の選択したドップラ信号のみを使い, アンテナ方向と選択ドップラ方向の 2 次元適応フィルタによりクラッタを抑圧する.

#### 4. ELD-STAP による歩行者検出

クラッタ環境下における歩行者検出を目的として, 道路脇の植え込みから比較的大きなクラッタが入る環境でフィールド実験を行った. 計測環境として, 植え込みの他にガードレールが存在する環境や地面クラッタの大きな草地でも計測を行った. また, 歩行者の近傍に反射の大きな車両が存在する環境についても計測を行った. 歩行者については, ドップラ速度が静止物である植え込みや車両からのクラッタ速度に近くなり検出が困難となる道路を横切る人物を計測した. 計測は, 多周波ステップ CPC レーダを車載して約 20km/h で走行しながら反対車線の 5km/h で道路を横切る歩行者を捉えて行った.

道路脇に植え込みとガードレールが存在する環境 (図 4-b) で計測した MBF(Multi Beamforming)による距離-速度の 2 次元マップ (以降, RV マップ) を図 5-a に示し, 距離-電力特性を図 5-c の上側 line に示す. 歩行者はクラッタに完全に埋もれ, また, 1.85m 間隔のガードレール支柱群から強い反射があることから, 一定の閾値を用いて歩行者検出は難しい.

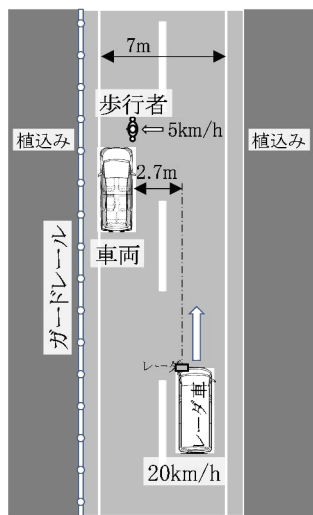


図 4-a. 計測環境



図 4-b. 歩行者のみ



図 4-c. 車両+歩行者

そこで, クラッタ抑圧信号処理である ELD-STAP を適用した歩行者検出に向けて道路脇の植え込みやガードレールからクラッタの抑圧を行い, その結果を図 5-b と図 5-c の下側 line に示す. クラッタ抑圧性能は, ガ

ードセル数, 参照セル数, 選択ドップラビン数で変わるが, ここでは, 事前検討で良好な性能が得られたものを使用した[3]. 具体的なパラメータは表 2 の通りである.

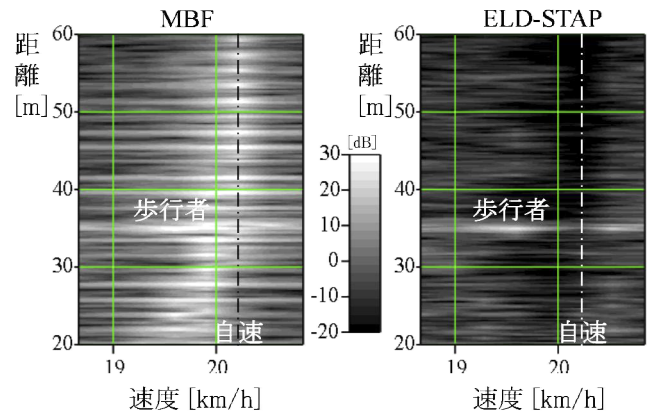


図 5-a. 歩行者のみ RV マップ(従来法)

図 5-b. 歩行者のみ RV マップ(ELD-STAP)

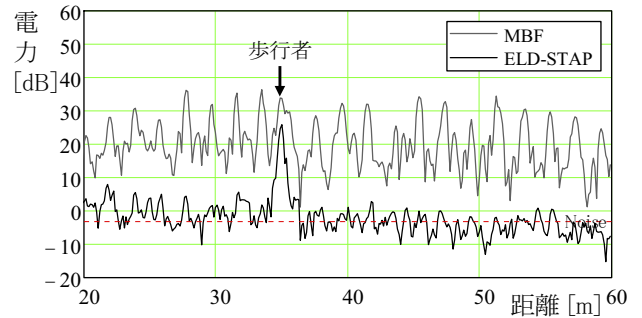


図 5-c. 歩行者のみ 距離-電力特性

表 2 ELD-STAP パラメータ

ガードセル数	参照セル数	選択ドップラ bin 数
15	32	8

ELD-STAP により, 歩行者を残しつつ植え込みとガードレールからのクラッタが約 20~30dB 抑圧されていることが確認でき, 一定の閾値を用いた歩行者検出が期待できる.

次に, 同じく植え込みとガードレールが存在し, さらに歩行者の近傍に反射の大きな車両が存在する環境 (図 4-c) で計測した MBF による結果を図 6-a に示し, 距離-電力特性を図 6-c の上側 line に示す. 一定の閾値を用いて歩行者検出を行った場合, 歩行者は道路脇のクラッタに完全に埋もれているため歩行者は検出されず近傍の車両のみが検出されてしまう. そこで, 前記と同様に ELD-STAP を適用したクラッタ抑圧を行い, その結果を図 6-b と図 6-c の下側 line に示す.

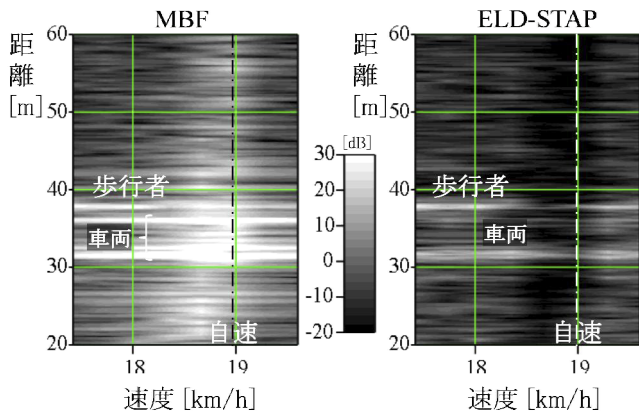


図 6-a. 車両+歩行者 RV マップ(従来法)

図 6-b. 車両+歩行者 RV マップ(ELD-STAP)

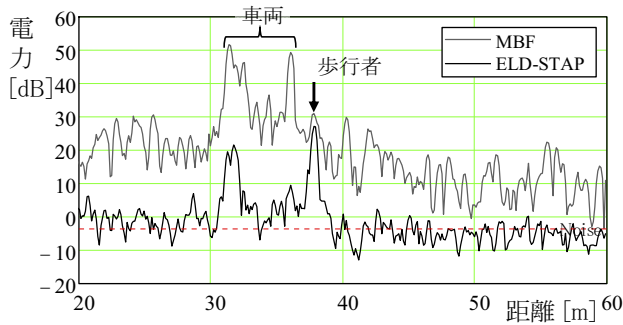


図 6-c. 車両+歩行者 距離-電力特性

道路脇のクラッタはノイズレベルまで抑圧され、さらに車両後部の強反射は約 30dB 抑圧される一方で歩行者の抑圧は数 dB に留まり歩行者を検出しやすくなった。しかし、ELD-STAP 後の両者の電力差が大きいため歩行者検出においては歩行者/車両判別が必要となる。

## 5. 歩行者/車両判別

### 5.1. フィールド実験

歩行者の近傍に反射の大きな車両が存在する環境でのフィールド実験の計測環境と計測数を表 3 に示す。

表 3. 計測環境と計測数

周囲環境	路面	計測数
植込み+車両	アスファルト	48
植込み+ガードレール+車両	アスファルト	57
植込み+車両	草地	20
総計測データ数		125

図 7 左に各計測データの ELD-STAP によってクラッタを抑圧した後の歩行者と車両のピーク電力を示し、図 7 右にそれらの平均電力と標準偏差 (エラーバー) を示す。ELD-STAP 後の両者の平均電力はほぼ同レベルであり、両者の判別が困難であることが分かる。

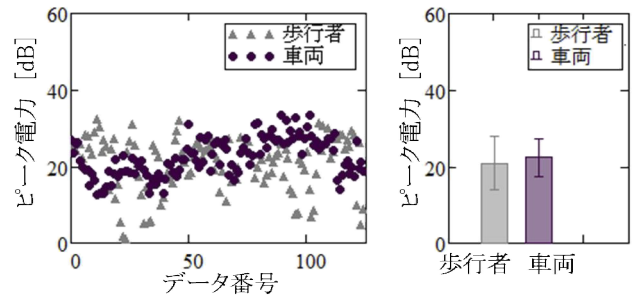


図 7. ELD-STAP ピーク電力 (実計測データ)

### 5.2. 判別のための特徴量

#### 5.2.1. シミュレーション

計測データから得られる歩行者と車両を判別できる有効な特徴量を検討するにあたり、歩行者、車両、クラッタを複数の移動点列でモデル化し、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[4]。図 8 に生成した疑似信号の RV マップを示す。

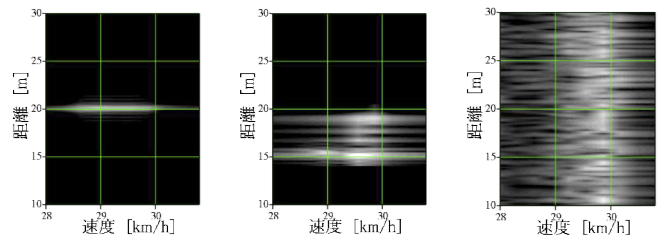


図 8-a. 歩行者

図 8-b. 車両

図 8-c. クラッタ

フィールド実験とほぼ同条件で生成した疑似信号に対して ELD-STAP 処理を行うことで判別に有効な特徴量を検討する。図 9 は、100 個の疑似信号に対して ELD-STAP 処理を行った後の歩行者と車両のピーク電力を示したものであり、やや車両電力が低めであるが図 7 の実計測データと同様に歩行者と車両の判別が困難な疑似信号が得られている。

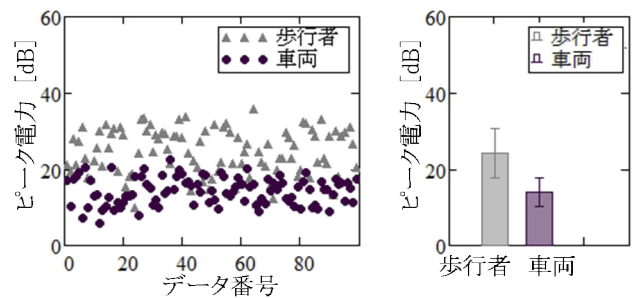


図 9. ELD-STAP ピーク電力 (シミュレーション疑似信号)

今回、歩行者と車両を判別可能な特徴量の検討にあたり、それらの位置における速度-電力特性に着目した。図 10 左に、MBF による RV マップを示し、図 10 右に ELD-STAP 処理後の RV マップを示す。図 11 にそれぞれの RV マップの歩行者と車両の位置における速度-電力特性を示す。



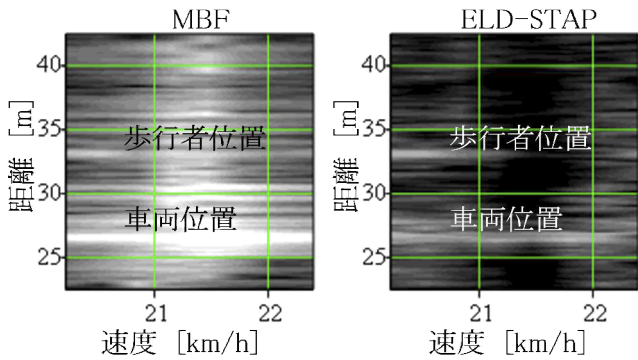


図 10. RV マップ (左 : MBF, 右 : ELD-STAP)

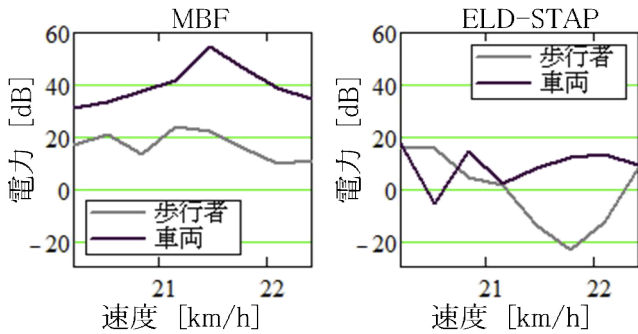


図 11. 速度-電力特性 (左 : MBF, 右 : ELD-STAP)

### (1) ELD-STAP 処理後の電力の拡がり (特徴量 A)

図 11 右に示すように, ELD-STAP 処理後の速度-電力特性は, 車両については速度方向に平坦な電力特性となり, 一方, 歩行者については MBF においてクラッタ電力が高い所 (速度 21.5km/h 近辺) で大きく低下し電力特性は拡がりを持つようになる. これは, クラッタ抑圧をする ELD-STAP のフィルタ特性が, その位置でヌルとなることによる. この傾向を利用した特徴量 A を下式(1)のように定義する

$$\begin{aligned} & Power_{stp} : \text{ELD-STAP 後の電力} \\ & \text{特徴量 A} = Power_{stp} \text{の標準偏差} \end{aligned} \quad (1)$$

100 個の疑似信号に対する特徴量 A の値とそれの平均値と標準偏差を図 12 に示す. 図 9 で示した ELD-STAP 処理後のピーク電力のみでは難しかった歩行者と車両の判別がしやすくなっている.

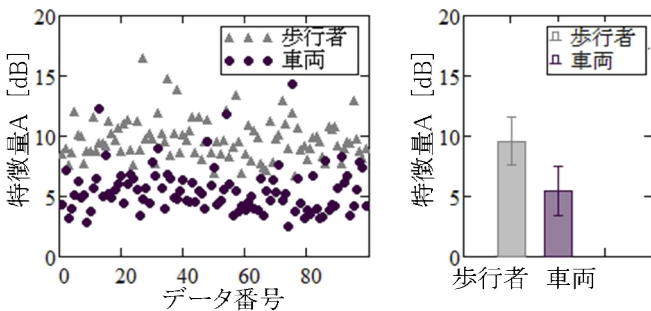


図 12. 特徴量 A (シミュレーション疑似信号)

### (2) ELD-STAP 処理前後のピーク電力差 (特徴量 B)

ELD-STAP 処理前後の速度-電力特性におけるピーク電力に着目すると, 図 11-a,b に示すように車両については 40dB 近く差があり, 一方, 歩行者については数 dB の差に留まっている. これは, 計測した車両が静止しており, 植込み等の静止クラッタと同じ速度にピーク電力が現れ ELD-STAP により大きく抑圧されるが, 一方, 歩行者の方は, 歩行時の手足の振りなどで速度方向に拡がりを持ち ELD-STAP フィルタのヌルから外れた両側で抑圧が行われなためである. この傾向を利用した特徴量 B を下式(2)のように定義する

$$\begin{aligned} & Peak_{mbf} : \text{ELD-STAP 前のピーク電力} \\ & Peak_{stp} : \text{ELD-STAP 後のピーク電力} \\ & \text{特徴量 B} = Peak_{mbf} - Peak_{stp} \end{aligned} \quad (2)$$

同じく 100 個の疑似信号に対する特徴量 B の値とそれの平均値と標準偏差を図 13 に示す. 歩行者と車両が大きく分離され極めて有効な特徴量となる可能性がある.

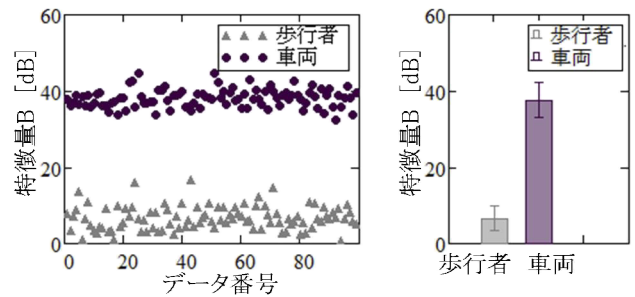


図 13. 特徴量 B (シミュレーション疑似信号)

### 5.2.2. 実計測データによる評価

シミュレーション検討で有効と考えた, 歩行者と車両の判別のための二つの特徴量について, 表 3 で示した 125 データの実計測データを用いて評価を行った. 図 14 に特徴量 A による結果を示す. 図 12 で示したシミュレーションによる傾向とよく似た結果となり, 図 7 で示した判別結果より改善したものとなった.

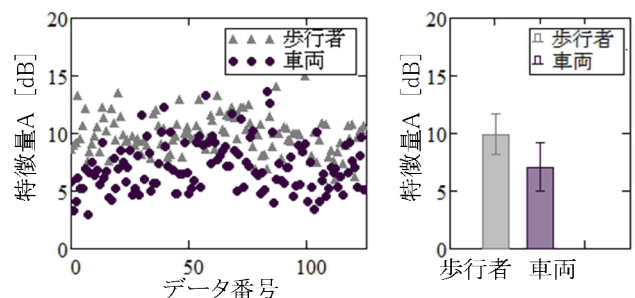


図 14. 特徴量 A (実計測データ)

次に、特徴量 B による実計測データを使った判別結果を図 15 に示す。計測データによっては分離が狭まっているところはあるものの図 13 で示したシミュレーション結果と似た傾向で歩行者と車両を効果的判別できるものとなっている。

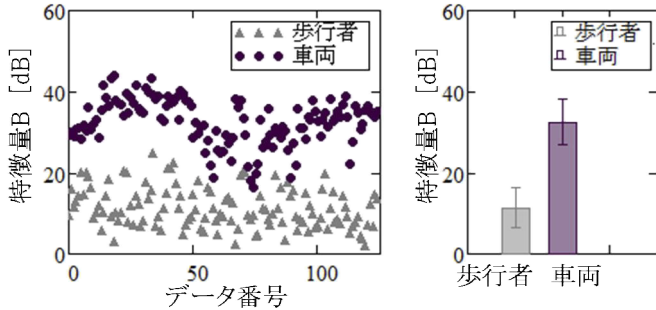


図 15. 特徴量 B (実計測データ)

特徴量 A, B について、歩行者と車両の分離度を定量的に示す一つの評価尺度として下記に示す  $\sigma$  index を式(3)のように定義し、表 4 にその値を示す。また、両特徴量値の分布が正規分布に従うと仮定した場合の  $\sigma$  index に対応する判別率を合わせて示す。特に、特徴量 B は 95.3% と高く、有効な特徴量として期待できる。

$$\sigma \text{ index} = \frac{|\text{平均値 (歩行者)} - \text{平均値 (車両)}|}{\text{標準偏差 (歩行者)} + \text{標準偏差 (車両)}} \quad (3)$$

表 4.  $\sigma$  index による定量評価

特徴量	ELD-STAP 後 ピーク電力	特徴量 A	特徴量 B
$\sigma$ index	0.115	0.724	1.991
判別率	9%	53.1%	95.3%

### 5.3. 機械学習アルゴリズムによる判別

上述の特徴量を学習して歩行者と車両を分類する SVM (サポートベクターマシン) を用いた判別結果を表 5 に示す。評価は全 125 データを 5 分割してそのうち 4 つを学習に用いる交差検定を 100 回行い、その平均値を示す。

表 5. SVM を用いた判別結果

特徴量	特徴量 A	特徴量 B	特徴量 A,B 組合せ
判別率	76.4%	95.6%	95.2%

組み合わせによる判別率は 95.2% で、特徴量 B 単体による 95.6% と大きく変わらず、特徴量 B の効果が支配的であった。特徴量 A, B を組み合わせた場合の散布図を図 16 に示す。二つの特徴量により、歩行者と車両が良く分離できていることが確認できる。ELD-STAP 後ピーク電力では困難であった判別が、特

徴量 A, B によって判別可能となり、特に ELD-STAP 処理前後のピーク電力差である特徴量 B による判別率は高く、有効な特徴量であることを確認した。

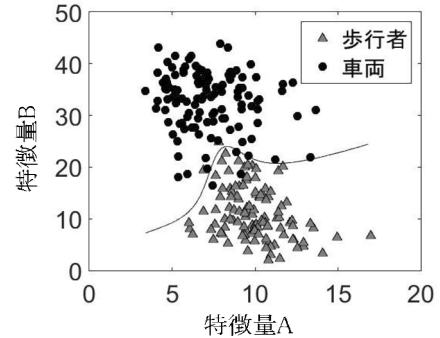


図 15. 特徴量 A,B の組合せによる分離 (実計測データ)

### 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、道路脇の植込み、ガードレール、車両、草地からの地面クラッタが存在する各種環境において道路を横切る歩行者の検出について検討を行った。ELD-STAP によりクラッタに完全に埋もれた歩行者を検出しやすくすると同時に、クラッタ抑圧で得られた検出物に対して ELD-STAP 処理結果の特徴量を使った歩行者と車両の判別について検討を行った。その結果、ELD-STAP 処理前後のピーク電力差による特徴量が特に有効であり、SVM を用いた特徴量学習により約 95% の判別率が得られることを確認した。ELD-STAP と今回の特徴量を使った判別技術は、28.6ms の短時間計測による歩行者検出に有効な手段と考える。

### 謝辞

本研究開発の一部は総務省 SCOPE(受付番号 175003002)の委託を受けたものです。

### 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] 渡辺一宏, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 多周波ステップCPCレーダによるELD-STAPのフィールド実験とクラッタ抑圧性能評価, 信学技報, vol. 116, no.427, pp.7-12, 2017  
 [4] 渡辺一宏, 横川貴洋, 高橋陸, 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, 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  
 [5] 中村真帆, 秋田学, 渡辺優人, 稲葉敬之, 多周波stepCPCレーダ及び機械学習アルゴリズムを用いた車両と歩行人物短時間特徴量と認識評価, 信学技報, vol. 116, no. 502, pp. 37-42, 2017  
 [6] W.L. Melvin, "A STAP overview", IEEE AES Systems Magazine Special Tutorials Issue.Vol.19, No.1, pp.19-35, January 2004