

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

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: 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。また、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、クラッタや歩行者の簡易モデルを作成しシミュレーションにより ELD-STAP の特性評価を行ってきた。今回、道路脇の植え込みやガードレール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 and Clutter Suppression Performance Evaluation for ELD-STAP using Stepped Multiple Frequency CPC Rader

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

Abstract Field experiments for Element Localized Doppler STAP (ELD-STAP) were performed in various environments where a walker, a vehicle, a guardrail, ground clutter is exist using the millimeter wave radar based on stepped multiple frequency CPC method. In previous our research, the statistical evaluation of ELD-STAP characteristics by simulation using simple models of vehicle and walker were performed. This paper describes evaluation of ELD-STAP characteristics using the field experiment data, and shows that the clutter suppression performance of ELD-STAP is higher than a conventional method and ELD-STAP is effective for the detection of a walker in clutter environments.

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

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、グラウンドクラッタの抑圧や、歩行者の検出における有効性を報告し[3][4]、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たシミュレーションにより ELD-STAP の抑圧特性評価を行い、有効性を報告してきた[5]。今回、道路脇の植え込みやガードレール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。表1にレーダパラメータ、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

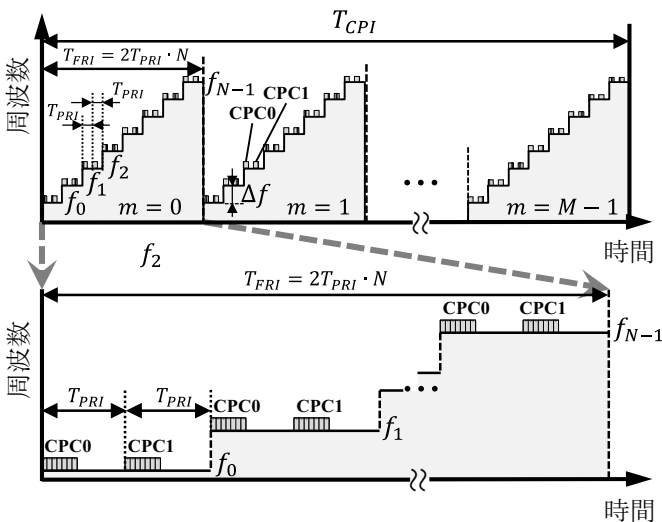


図1. 多周波ステップCPC方式送信シーケンス図

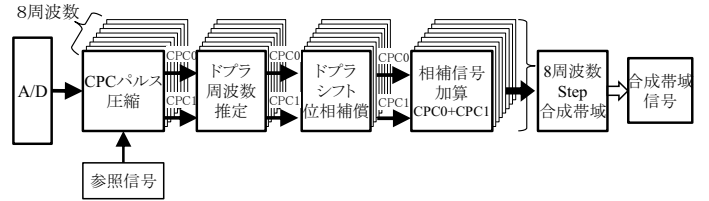


図2. 多周波ステップCPC方式の信号処理ブロック図

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)。

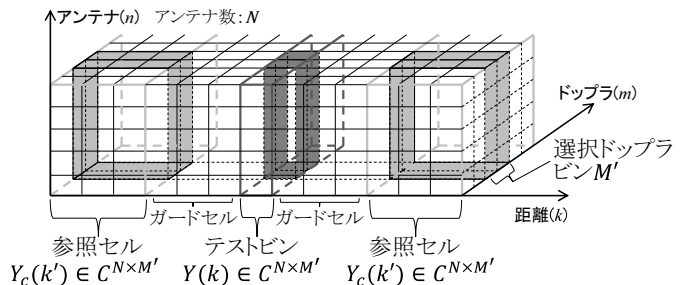


図3-a. ELD-STAP法で使用する受信データ

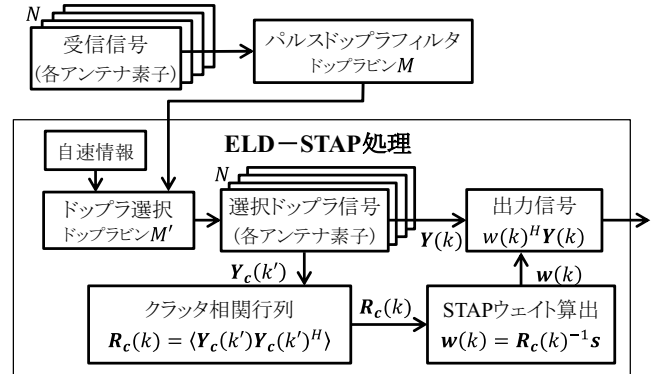


図3-b. ELD-STAP法の処理ブロック図

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. これまで, 静止車両や歩行者の疑似反射信号モデルを作成し, これらモデルと疑似クラッタを用いてシミュレーションにより ELD-STAP の抑圧特性評価を行いクラッタ抑圧に対する有効性を報告してきた [5].

4. ELD-STAP のフィールド実験

4.1. 計測条件

今回, 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. 計測環境と計測数を表 2 に示す. 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.

表 2. 計測環境と計測数

歩行者近傍	周囲環境	路面	計測数
なし	植込み	アスファルト	32
なし	植込み +ガードレール	アスファルト	80
車両	植込み	アスファルト	48
車両	植込み +ガードレール	アスファルト	64
なし	植込み	草地	32
車両	植込み	草地	48
総計測データ数			304

4.2. クラッタ抑圧結果の例

道路の両側に植込みが存在し, 左側にガードレールがある環境 (図 4) での ELD-STAP によるクラッタ抑圧の代表例を示す (図 5, 図 6). 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, 後述の ELD-STAP パラメータの検討で良好な性能が得られたものを使用した. 具体的なパラメータは表 3 の通りである.

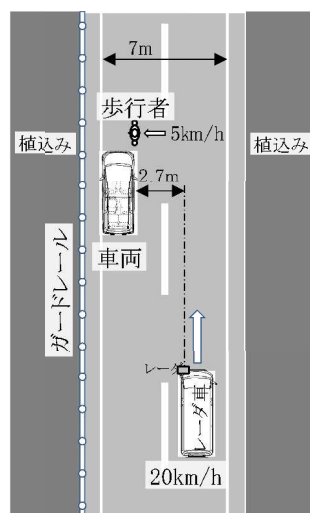


図 4-a. 計測環境



図 4-b. 歩行者のみ



図 4-c. 車両+歩行者

表 3 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	30	8

図 5 に, 車両が歩行者近傍にない計測データに対して ELD-STAP によるクラッタ抑圧を行った結果を示す.

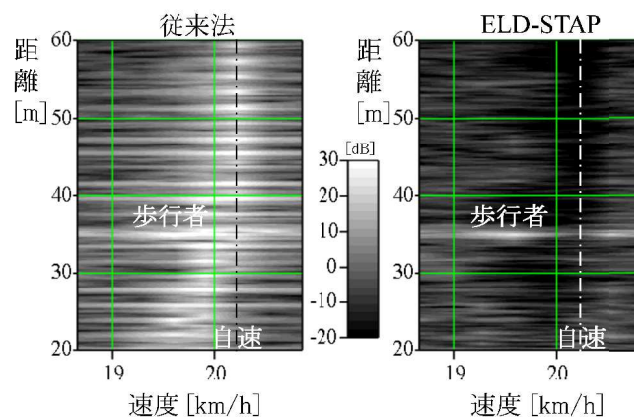


図 5-a. 歩行者のみ
RV マップ(従来法)

図 5-b. 歩行者のみ
RV マップ(ELD-STAP)

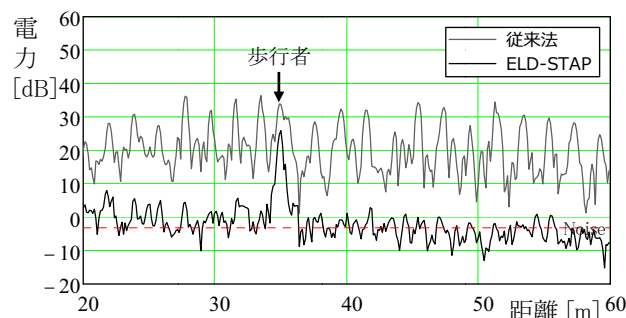


図 5-c. 歩行者のみ 距離-電力特性

図 5-a は、従来法（パルスドップラフィルタと通常のビームフォーミング）により、速度と距離を 2 次元マップ（以降、RV マップ）で表示したものある。植込みからの反射の上にガードレールの支柱からの等間隔の反射が強く重なったクラッタにより、歩行者を判別しにくい状況となっている。一方、図 5-b に示す ELD-STAP によるクラッタ抑圧を行った結果では、これらクラッタが抑圧され歩行者のみが残り検出しやすくなっている。距離-電力特性（図 5-c）に示すとおり、歩行者を残しつつ植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る。

図 6 に、車両が歩行者近傍にある計測データに対して ELD-STAP によるクラッタ抑圧を行った結果を示す。図 6-a に示す通り、ガードレールの反射は車両の陰となり、植込みと車両からの反射が主なクラッタとなっている。従来法では、特に車両からの反射は強く歩行者を判別しにくい状況となっている。一方、図 6-b に示す ELD-STAP によるクラッタ抑圧を行った結果では、車両からの反射が残るものの車両電力は約 30dB 下がり（図 6-c）、歩行者近傍に強い車両からの反射がある場合においても影響をあまり受けず歩行者を残しつつクラッタが抑圧できることが確認できる。

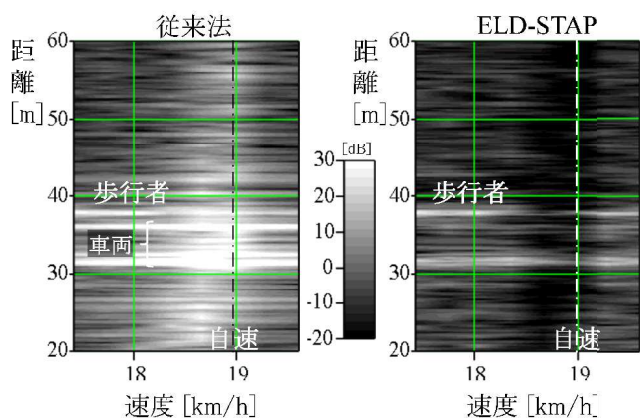


図 6-a. 車両+歩行者 RV マップ(従来法) 図 6-b. 車両+歩行者 RV マップ(ELD-STAP)

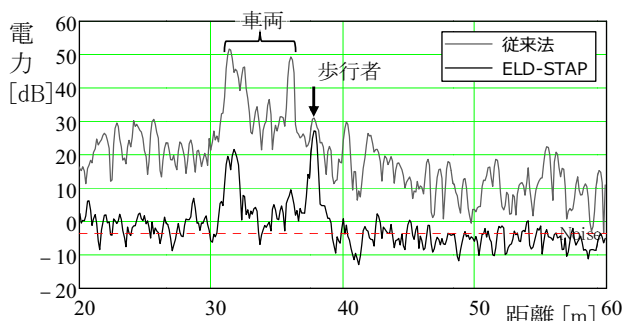


図 6-c. 車両+歩行者 距離-電力特性

5. ELD-STAP パラメータ

ELD-STAP の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等の ELD-STAP パラメータ（図 7）で変わる。ELD-STAP のフィルタウエイトの推定に使うクラッタとして、注目するテスト距離ビンの前後の参照セル区間の計測データを使う。一般に目標からの反射は拡がりを持ち、参照セル区間に目標拡がりが入ると、クラッタのみならず目標電力も抑圧する。そのため、テストビン前後にガードセルを設け参照セルを目標拡がりから離れた位置に設定する（図 7-a）。また、ドップラ周波数方向では、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数~十数ビンの信号を選択して使う。この時、クラッタおよび目標が選択した幅に入るように設定する。

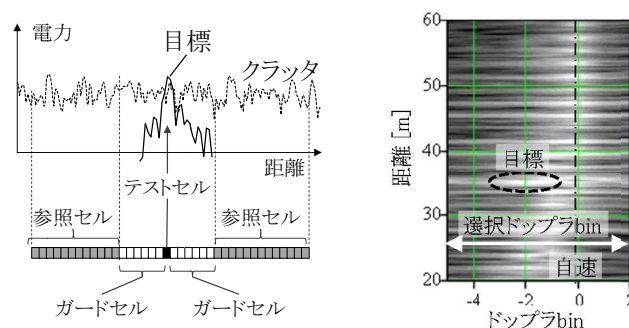


図 7-a. ガードセルと参照セル 図 7-b. 選択ドップラ bin
図 7. ELD-STAP パラメータ

今回、各計測 304 データについて、ガードセル数（片側）を 2~40 の 6 種、参照セル数（片側）を 20~60 の 4 種、選択ドップラ bin 数を 8~20 の 7 種の全ての組合せ 168 通りについて、クラッタ抑圧処理（ELD-STAP）前後のクラッタ電力および目標ピーク電力を調査した。その代表例を図 8, 図 10 に示す。ここで、1セル幅は 0.117m, 1 ドップラ bin 間隔は 0.311km/h である。

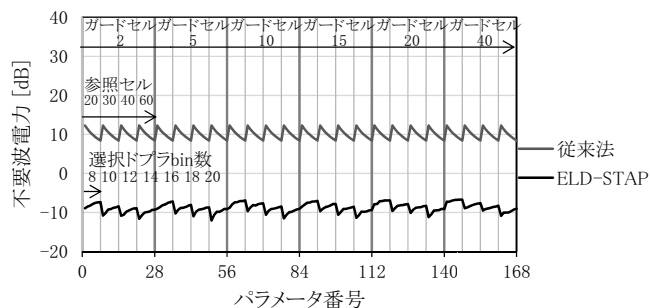


図 8. ELD-STAP パラメータによるクラッタ電力

ELD-STAP により、クラッタ電力は従来法に比べ約 -20dB 抑圧され、これらパラメータ組合せによって数 dB の変化はあるものの大きく変わることはなかった。

今回の計測では、S/N(Signal to noise ratio)は約 30dB であり、使用したレーダのこの S/N での点目標の拡がりは 10 ~ 15bin 程度であるため(図 9)、ガードセル数は 15 以上の設定する必要がある。図 10 に示す通り、ガードセル数 10 までは目標ピーク電力は ELD-STAP 処理前(従来法)に比べ 6~25dB まで抑圧されてしまうが、セル数 15 以上では安定して約 4dB 程度に収まる。ガードセル数を大きくしても目標電力は大きく変化しないが、参照セルがテストビンから離れすぎると目標近傍のクラッタ特性から離れる可能性があるため、次に述べる ELD-STAP の特性評価は、ガードセル数を 15 に固定して行った。

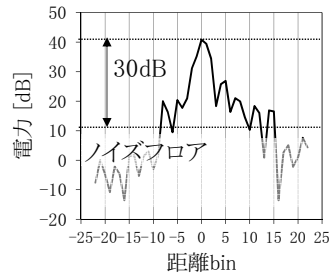


図 9. 点目標の拡がり

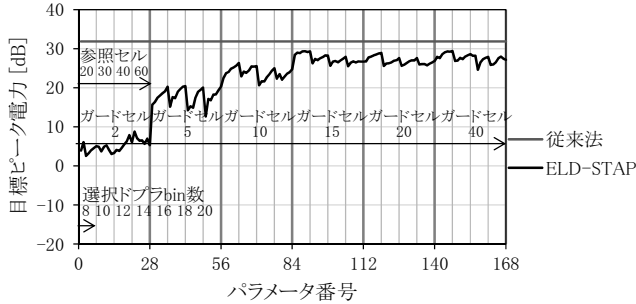


図 10. ELD-STAP パラメータによる目標ピーク電力

6. ELD-STAP の特性評価

6.1. 評価指標

クラッタ抑圧性能の評価指標には IF(Improvement Factor)を用いる。IF とはクラッタ抑圧処理によって S/C(Signal to Clutter ratio)がどの程度改善するかを入出力 S/C を用いて表す指標である。信号のデータベクトルとクラッタの相関行列および ELD-STAP ウェイトを用いて次式のように IF を算出する。

$$IF_{\text{従来法}} = \frac{S/C_{\text{従来法}}}{S/C_{\text{入力}}} = \frac{\frac{s^H s}{s^H R_c s}}{\text{trace}(R_c)} \quad (1)$$

$$IF_{\text{ELD-STAP}} = \frac{S/C_{\text{ELD-STAP}}}{S/C_{\text{入力}}} = \frac{\frac{w^H s s^H w}{w^H R_c w}}{\text{trace}(R_c)} \quad (2)$$

S/C : Signal to Clutter 比
s : 信号のデータベクトル
R_c : クラッタの相関行列
w : ELD-STAP ウェイト

6.2. 計測環境に対する特性

計測環境による従来法と ELD-STAP による計測データの IF 平均値の比較を図 11 に示す。それぞれの計測データ数は表 2 の通りである。エラーバーは標準偏差値を示す。ELD-STAP により、従来法に比べ IF 値が 15 ~ 23dB 改善されている。歩行者近傍に反射の大きな車両やガードレールが有る場合についてもそれらの影響を受けて抑圧性能が下がることなく、それらが無い場合と同等以上の IF 値となっている。車両やガードレールによるクラッタの上昇で S/C_{入力} が下がってもクラッタ抑圧処理による S/C_{ELD-STAP} が大きく低下しないため、この場合の IF 値は上昇している。

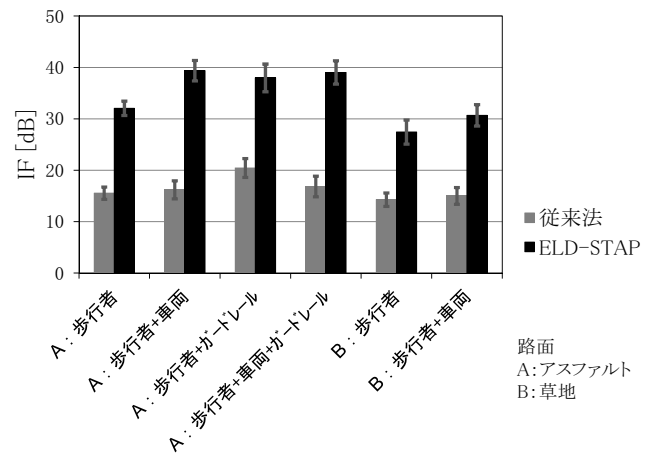


図 11. 計測環境に対する IF 値

6.3. 選択ドップラビン数に対する特性

選択ドップラビン数を変えた場合の従来法と ELD-STAP による全 304 計測データの IF 平均値の比較を図 12 に示す。ビン数が増えるにしたがって両方の IF 値はゆるやかに上昇する。ELD-STAP と従来法の IF 値の差は約 19dB である。一方、選択ドップラの幅が広がるにつれ、クラッタの相関行列の次元数がこの幅の 2 乗に比例して大きくなるため計算処理負荷が大きくなる。処理時間を計測した結果、選択ビン数が 20 ビンの場合、8 ビンの場合に比べ約 5 倍となった。

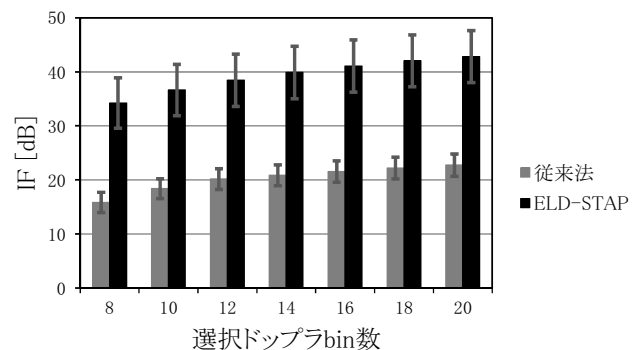


図 12. 選択ドップラビン数に対する IF 値

6.4. 参照セル数に対する特性

参照セル数を変えた場合の従来法と ELD-STAP による全 304 計測データの IF 平均値の比較を図 13 に示す。参照セル数を変えても両方の IF 値は大きく変わらない。ELD-STAP と従来法の IF 値の差は約 20dB である。一般に STAP の抑圧性能の保持のためには参照セルにおけるクラッタ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)条件を満たすことが前提になっている。参照セル数 40,60 ではやや標準偏差値が大きくなっているが、セル内に車両の強反射部分が入るようになり IID 条件から外れるようになったことが考えられる。

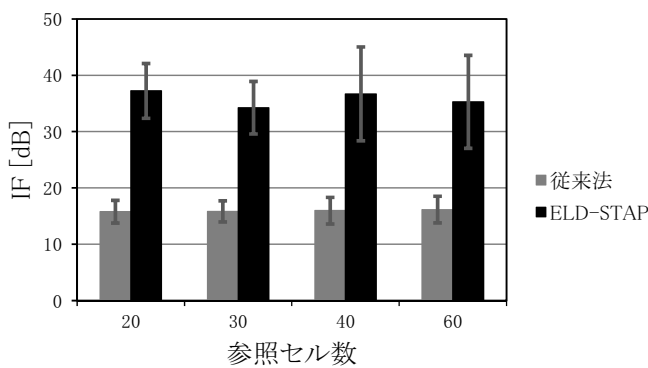


図 13. 参照セル数に対する IF 値

6.5. C/N に対する特性

ELD-STAP パラメータをガードセル数 15, 参照セル数 30, 選択ドップラビン数 8 として, C/N(Clutter to noise ratio)を変えた場合の従来法と ELD-STAP による全 304 計測データの IF 平均値の比較を図 14 に示す。従来法では, C/N にかかわらずほぼ一定となるが, ELD-STAP では C/N に比例して IF 値は大きくなる。これは, クラッタ電力が大きくなっても ELD-STAP により目標ピーク電力を保持しつつクラッタをノイズレベルまで抑圧できていることによるものである。

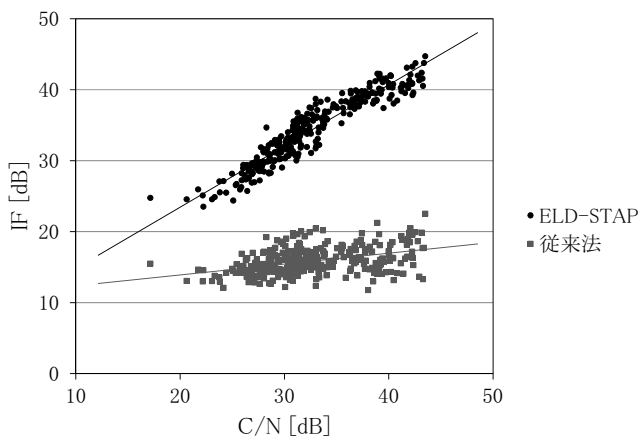


図 14. C/N に対する IF 値

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フィールド計測データを合計 304 データ取得し, ELD-STAP によるクラッタ抑圧結果を示すと同時に抑圧性能の特性評価結果を示した。

ELD-STAP による 2 次元 RV マップや距離電力特性において, 歩行者を残しつつ植込みとガードレールからのクラッタが約 20~30dB 抑圧され, 歩行者近傍に強反射体である車両が存在する場合においても, 車両の反射が残るものの車両電力は約 30dB 下がり, 車両の影響をあまり受けず歩行者を残しつつクラッタが抑圧でき, 歩行者を検出しやすくなることを確認した。

また, 評価指標として IF 値を用いたクラッタ抑圧性能の特性評価を行った。使用したレーダの点目標拡がり考慮したガードセル数での特性評価を行った結果, 上記各種環境において, ELD-STAP の IF 値が従来法に比べて 15~23dB 改善することを示した。C/N に対する特性評価では, C/N に比例して IF 値が大きくなることを示した。ELD-STAP は, クラッタ電力の大きな環境において, 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] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [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. .