

時間領域適応型信号処理を用いた 超広帯域レーダにおける複数運動目標の分離

森本 和志[†] 奥村 成皓[†] 阪本 卓也^{††} 佐藤 亨[†]

[†] 京都大学大学院情報学研究科

〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町

^{††} 兵庫県立大学大学院工学研究科

〒 6671-2280 兵庫県姫路市書写 2167

あらまし 超広帯域レーダはその高い距離分解能から、周囲環境の影響を受けにくい周辺把握手法の一つとして注目を集めている。しかし、同一レンジゲート内に複数の目標が存在する場合、その分離が求められる。本稿では複数回パルスを送受信し、ドップラ速度を推定することで目標のドップラ速度の違いにより分離する方法について報告する。ドップラ速度を高精度かつ高分解能に推定するため、適応型信号処理を適用する。特に、高分解能適応型信号処理に必要な同一レンジ内の目標数推定方法と、距離分解能以上の高精度な複数目標の位置推定方法について報告する。

キーワード 超広帯域レーダ, 適応的信号処理

Separation of Multiple Moving Targets Using Time-Domain Adaptive Signal Processing for Ultra-Wideband Radar

Kazushi MORIMOTO[†], Shigeaki OKUMURA[†], Takuya SAKAMOTO^{††}, and Toru SATO[†]

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University

Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

^{††} Graduate School of Informatics, University of Hyogo

University of Hyogo, 2167 Shosha, Himeji, Hyogo 671-2280, Japan

Abstract Ultra-wideband radar is a promising tool monitoring moving targets because of its high range resolution and tolerance for environmental noise. However, when multiple targets exist in the same range bin, the separation of the received signals is required. In this study, we separate signals using their Doppler velocities. To estimate the Doppler velocities accurately, we apply the adaptive signal processing to signals sampled in the time domain. In particular, we investigate the performance in estimating the number of targets in the same range bin. In addition, we propose a technique to estimate an accurate target position.

Key words Ultra-wideband radar, adaptive signal processing

1. はじめに

ロボット運用時の安全確保や防犯のために、人体等の移動物体を正確に認識する技術が求められている。従来、このような周辺認識には主に光学カメラによるモニタリングが用いられてきた [1, 2]。しかし、光学カメラによるモニタリングは、霧や粉塵などにより視界が遮られる状況下では認識性能が悪化する。

広帯域の極めて短いパルス長の信号を照射する超広帯域 (Ultra-Wideband; UWB) レーダは、夜間や視界不良の状況下

でも運用できるためカメラの弱点を補う周辺認識手法として注目されている [3-5]。UWB レーダは高い距離分解能を持つため、タイムゲーティング処理により、レーダから目標までの距離の差によって複数の目標を分離することができる。しかし、同一レンジゲート内に目標が存在する場合、その分離が必要である。

近年、複数目標からの反射波を目標のドップラ速度の違いで分離したあと、少数アンテナ素子における位相差の違いから到来方向を推定する移動人体のイメージング方法が提案された [6, 7]。さらに Anabuki ら [8] はこの方法を拡張し、複数

素子からなるアレイレーダに適応型信号処理を適用して高分解能な到来方向推定を行い、ドップラ速度に加えて到来方向でも目標を分離して移動人体の高分解能なイメージングを実現している。

これらの方法では共通してドップラ速度の違いで目標を分離しているが、速度分解能の制約により速度差の小さい複数目標を分離することは困難であった。このため、更に高い速度分解能が求められている。ドップラ速度推定を正確に行うことで、更に多くの目標を分離することができるようになり、アレイ内の素子数を削減できる可能性がある。そこで、本研究ではドップラ速度の高分解能推定に着目し、単一アンテナ素子を有するレーダを用いてドップラ速度のみによる複数運動目標の分離を目指す。

ドップラ速度を推定する方法として短時間フーリエ変換 (Short time Fourier transform; STFT) が知られている。この方法は時系列信号における、目標のドップラ速度に対応する位相回転の違いから目標のドップラ速度を推定する。しかし、分解能は低く、使用する時系列信号の時間長に依存する。分解能を向上させる方法として、Capon 法 [9] や ESPRIT 法 [10] などの適応型信号処理を用いた方法が知られている [11]。その中でも ESPRIT 法は分解能が高く、推定にピーク探索を必要としないため、多数回推定を行う場合計算コストを削減できる。本研究では、目標が存在すると考えられる複数のレンジゲートにおいて多回数ドップラ速度を推定するため、ピーク探索が不要な ESPRIT 法は有効である [12]。

しかし、ESPRIT 法を用いてドップラ速度推定を行う場合、予め同一レンジゲート内の目標数を推定する必要がある。本研究では、情報量基準を用いた目標数の推定方法に着目し、数値シミュレーションによって検討を行う。加えて、ESPRIT 法は分離した信号それぞれの信号電力を推定することができる。そこで、推定電力を用いて距離分解能を超える高い精度で目標位置を推定可能な方法を提案する、

2. 時間領域 ESPRIT 法を用いた速度による複数運動目標の分離方法

2.1 時間領域干渉計法によるドップラ速度推定方法

時間方向に連続した複数の送信パルスに対応する複数の受信信号を用いて、目標の移動により生じる反射波の位相回転を観測することで、特定の時間・レンジゲートにおける目標のドップラ速度を推定することができる。本稿ではこれを時間領域干渉計法と呼ぶ。

ドップラ速度 v_l ($l = 1, 2, \dots, L$) で移動する L 個の点目標が存在する状況を仮定する。このとき、時間 t , レンジ r におけるレーダ受信信号 $s(t, r)$ と、時間 kT が経過した後の受信信号は次式で表される。

$$s(t + kT, r) = \sum_{l=1}^L a_k(v_l) s_l(t, r) + n \quad (1)$$

$$a_k(v_l) = \exp(-j4\pi f_c v_l kT / c) \quad (2)$$

ただし、 T はパルス繰り返し間隔、 k はパルス番号、 s_l は l 番

目の目標に対応する受信信号、 f_c は中心周波数、 c は光速、 n は雑音である。ここで、 kT 間の信号の振幅の変化や距離による減衰は無視した。

次に、 K パルス分の信号ベクトル $\mathbf{s}(t, r)$ 、速度ベクトル $\mathbf{a}(v)$ を次式で定義する。

$$\mathbf{s}(t, r) = [s(t - KT/2, r) \cdots s(t + KT/2 - 1, r)]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{a}(v) = [a_{-K/2}(v) \cdots a_{K/2-1}(v)]^T \quad (4)$$

ただし v はドップラ速度である。

目標速度は次式で得られるスペクトル $P_d(v, t, r)$ の極大値を速度方向に探索することで推定できる。

$$P_d(v, t, r) = \mathbf{a}^H(v) \mathbf{s}(t, r) \mathbf{s}^H(t, r) \mathbf{a}(v) \quad (5)$$

$$= \mathbf{a}^H(v) \mathbf{R}(t, r) \mathbf{a}(v) \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{R}(t, r)$ は信号ベクトルの相関行列である。

2.2 ESPRIT 法による高分解能ドップラ速度推定

本節では ESPRIT 法によるドップラ速度推定の概要について述べる。ドップラ速度 v_1 で運動する単一目標のみが存在する場合、式 (1) に示されるように、目標のドップラ速度は次式で推定できる。

$$v_1 = \angle [s^*(t + T, r) s(t, r)] c / (4\pi f_c T) \quad (7)$$

ただし、雑音 n の影響は無視した。式 (5) と異なり、式 (7) では極大値の探索なしにドップラ速度を推定できていることがわかる。しかし、複数目標からの信号が混在する場合、式 (7) による方法ではドップラ速度を推定できない。そこで、ESPRIT 法は相関行列に固有値展開を適用して受信信号を信号空間と雑音空間に分離し、その後式 (7) を拡張した方法で複数目標のドップラ速度を推定する。

ESPRIT 法は推定の際に、複数目標から得られる信号間の相関がないことを仮定する。よって、ESPRIT 法でドップラ速度推定を行うためには、相関行列のアンサンブル平均による信号間の相関の抑圧が必要である。本研究では、平均後の相関行列 \mathbf{R}_{av} を次式で求める。

$$\mathbf{R}_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=-N/2+1}^{N/2} \mathbf{R}(t + iT, r) \quad (8)$$

ここで、 N は相関行列の平均回数である。

相関行列の固有値 λ_i は $\lambda_1 \geq \cdots \geq \lambda_L > \lambda_{L+1} = \cdots = \lambda_K = \sigma^2$ と表される。ただし、 σ^2 は雑音電力である。固有値 $\lambda_1 \cdots \lambda_L$ に対応する固有ベクトルが張る空間を信号空間、 $\lambda_{L+1} \cdots \lambda_K$ に対応する固有ベクトルが張る空間を雑音空間と呼ぶ。ESPRIT 法を用いて高精度にドップラ速度を推定する場合、信号空間と雑音空間の分離が重要である。しかし、実際のデータでは雑音空間に対応する固有値は雑音電力と一致せず、分離が難しい。そのため、目標数 L の推定が課題であった。

2.3 情報量基準による目標数推定

目標数を推定する方法として、情報量基準を用いた方法が提案されている。本研究では、Minimum description length(MDL)

を用いる。レーダ分野において MDL は主に到来方向推定時の目標数判定に応用して用いられているが [13]、到来方向推定とドップラ速度推定の原理は共通しており、そのアルゴリズムをそのまま時間領域の速度推定時の目標数判定に用いることができる。以下に本稿で用いる MDL による情報量基準 MDL(l) を示す。

$$\text{MDL}(l) = -\log \left\{ \frac{\prod_{j=l+1}^K \lambda_j}{(\overline{\sigma^2}(l))^{K-l}} \right\}^N + \frac{l}{2}(2K-l) \log N \quad (9)$$

$$\overline{\sigma^2}(l) = \frac{1}{K-l} \sum_{j=l+1}^K \lambda_j \quad (10)$$

MDL(l) を最小化する l が推定目標数となる。(9) 式は第一項が最大対数尤度、第二項が自由度による項を表す。MDL は雑音強度 σ^2 が $\overline{\sigma^2}(L)$ で推定されることを利用し、最も確からしい固有ベクトル、固有値、雑音強度のモデル選択を行い目標数 L を推定する [13]。

しかし、固有値の推定安定度によっては、目標数の推定結果が不安定になる場合がある。それを防ぐため、固有値展開の前に \mathbf{R}_{av} に $\eta \mathbf{I}$ を印加し、安定化させる方法が提案されている [14]。ただし、 \mathbf{I} は単位行列である。このとき、 η の大きさを変えることで MDL による目標数推定の安定性を調整することができる。本研究ではこれを UWB ドップラレーダを用いた速度推定に適用する。

η の値の大きさと MDL により抽出可能な目標電力の大きさの間には密接な関係があり、目標の到来電力や雑音電力などによる状況の違いや目的に合わせた η の選択が重要である。そこで本稿では η を変更した場合の目標数推定結果について検討を行い、精度と安定性を評価する。

3. レンジ間補間による高精度目標位置推定方法

前節で説明した方法により、時間・レンジ毎に目標数が推定され、さらにその数だけ推定速度と推定電力が得られる。ある目標からの反射波による推定電力が単一あるいは複数のレンジで得られる場合、それらのうちの電力が最大となるレンジがその目標の位置と推定できる。しかし、この方法による位置推定はその精度がレーダの距離分解能とレンジ方向のサンプリング間隔に依存する。そこで、本稿ではレンジ間補間による高精度位置推定を導入する。

レンジ間補間は、ある目標が隣接する二つのレンジの間に位置する場合に、その二つのレンジにおける到来電力比が目標位置により異なることを利用して距離分解能より高い精度で位置推定を行う手法である [6]。レンジ間補間を用いるためには、時間毎に推定電力と目標を関連付けられる必要がある。従来は到来方向の違いによってこの対応付けを行っていた。本稿では、ドップラ速度を高精度に推定できているため、ドップラ速度によって対応付けを行う方法を提案する。

複数レンジゲートにわたる信号において、同一の目標に対応する信号は近いドップラ速度を持つと考えられる。そこで

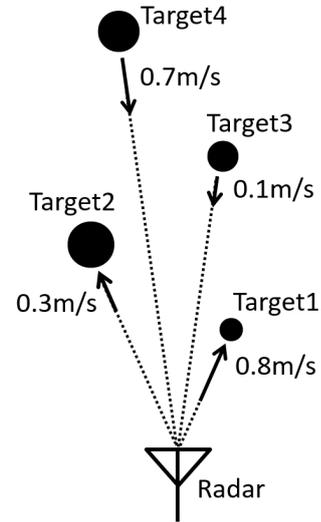


図1 システムモデル概略図

速度差がしきい値 v_{th} を下回る速度差を持つ推定速度に対応する推定電力を同じ目標によると関連付けてレンジ間補間を導入する。

4. 提案手法のシミュレーションによる評価

4.1 システムモデル

本稿では、パルス繰り返し周期を $T = 0.238$ ms、レンジ方向のサンプリング間隔を 0.075 m とし、中心周波数 $f_c = 79$ GHz、電力半値帯域幅 2GHz の信号を照射する単一アンテナ素子を有するレーダを用いる。シミュレーションの概略図を図1に示す。図1のように、レーダから4つの移動点目標に対して電波を照射してその反射波を受信する。目標は時間 0.476sec でレーダからの距離 0.45m で4点目標すべてが交差するものとし、点目標速度を $[0.8 \text{ m/s}, 0.3 \text{ m/s}, -0.1 \text{ m/s}, -0.7 \text{ m/s}]$ に設定する。加えて点目標の最大到来電力がそれぞれ異なり、その大きさが $[-24 \text{ dB}, 0 \text{ dB}, -16 \text{ dB}, -8 \text{ dB}]$ であるとする。また、雑音として強度 -24 dB の白色ガウス雑音を印加する。本稿ではシャドウイング、距離減衰は考慮しない。

図2に上の条件の元で得られる受信信号の強度情報を示す。図2から、最大到来電力が雑音強度と同じ -24 dB である速度 0.8 m/s の目標は、強度情報においては雑音と区別できず、確認できないことがわかる。また、到来電力の小さい目標による反射波が他の目標による反射波と重なる箇所ではその目標数や位置、速度の把握が難しく、4目標が交差する時間 0.476sec、レンジ 0.45m 付近においては特に区別が難しくなっていることがわかる。

4.2 MDL による目標数推定結果

得られた受信信号に対して MDL を適用して時間・レンジ毎に目標数の推定を行う。MDL を用いるにあたり、受信信号ベクトルのパルス数 $K = 24$ 、平均回数 $N = 24$ として相関行列 \mathbf{R}_{av} を求め、 \mathbf{R}_{av} に $\eta = -30 \text{ dB}$ としたときの $\eta \mathbf{I}$ を印加してその固有値を算出する。ただし、 η の値は到来電力や雑音電力と同様、 0.3 m/s の点目標の最大到来電力を 0 dB としたときの

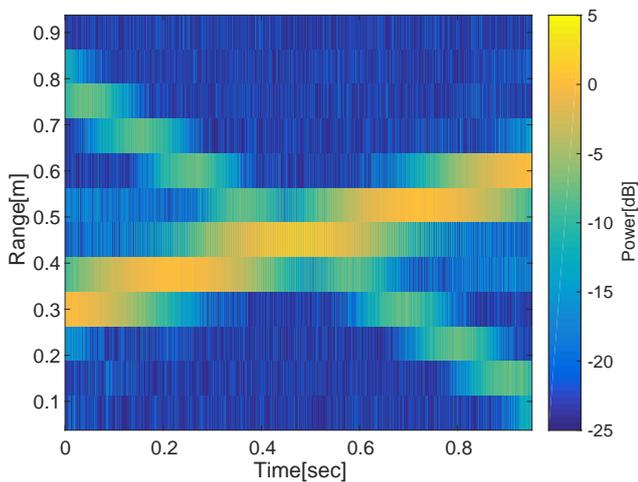


図 2 受信信号の強度情報

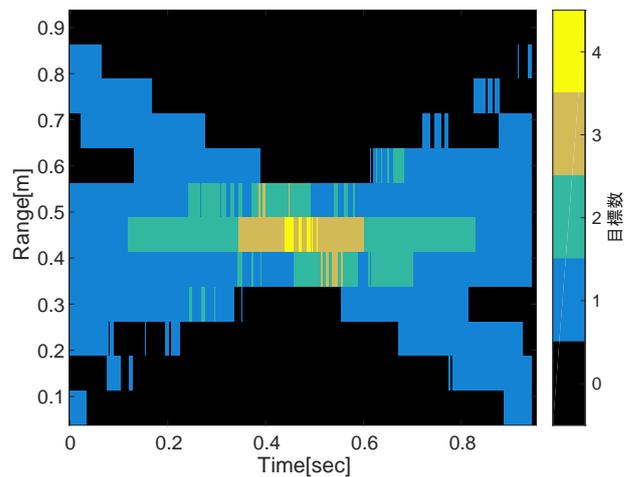


図 4 MDL による目標数推定結果 ($\eta = -20$ dB)

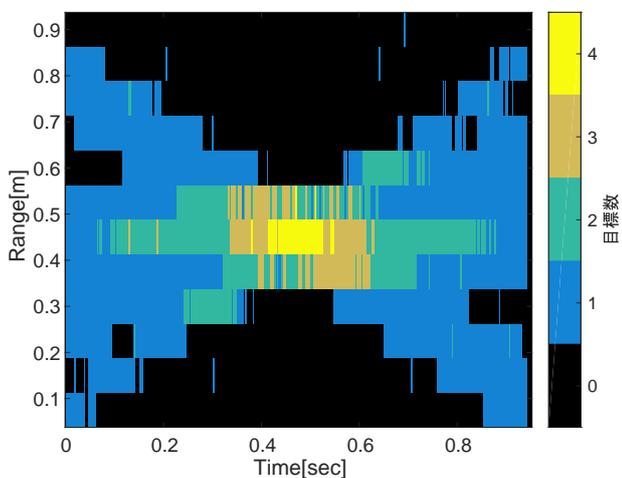


図 3 MDL による目標数推定結果 ($\eta = -30$ dB)

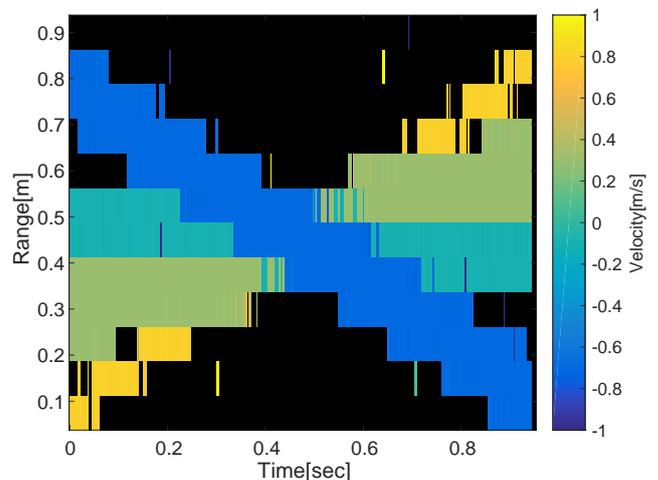


図 5 時間領域 ESPRIT 法による速度推定結果。各レンジゲートにおいて、最も速度が小さい目標のみの速度推定結果を示している。

デシベル値で定義している。

固有値から MDL により目標数を推定した結果を表した図を図 3 に示す。この結果は、各目標について -28 dB 以上の反射波電力をもつ場合に 1 つの目標数と数えたものを目標数の真値として、全ての時間・レンジの 94.85 % の箇所でも正しく目標数を推定できており、同一のレンジゲートに 4 目標が存在する場合も含めて目標数推定に成功した。

一方で、全ての目標から 1 レンジ以上離れた明らかに目標が存在しない時間・レンジにおいて、目標数 0 と推定されている中に混じっていくつか目標数 1 と判定されている箇所が存在している。これは雑音を目標と誤判定したことによるものであり、この誤判定は MDL の感度を左右する η を雑音強度より 6 dB 小さい値に設定したことに起因すると考えられる。そこで、 η の値を雑音強度より 4 dB 大きい $\eta = -20$ dB に変更した場合の、MDL による同様の目標数推定結果を図 4 に示す。

η の変更により、全ての目標から 1 レンジ以上離れた時間・レンジにおける雑音の影響による誤判定の数が 0 となったが、同時に抽出できた目標の数も減り、全体の推定目標数は変更

前の 80.8 % に減少した。特に到来電力が小さい 0.8 m/s の目標の抽出が困難になっており、0.8 m/s の目標が -28 dB 以上の反射波電力をもつ時間・レンジにおいて目標数を 0 と判定した割合は $\eta = -30$ dB の場合で 95.7 %、 $\eta = -20$ dB の場合で 66.7 % であった。

4.3 ESPRIT 法による速度推定結果

4.2 節で得られた $\eta = -30$ dB とした場合の目標数推定結果を用いて、時間領域 ESPRIT 法により目標のドップラ速度の推定を行う。このとき、ESPRIT 法に用いる M 、 N 、 \mathbf{R}_{av} は 4.2 節と同様のものとする。

時間領域 ESPRIT 法による推定結果を図 5 に示す。ただし、図 5 は複数目標と判定され、複数の速度が推定されている時間・レンジにおいて、それらのうち最も速度が小さい一つの推定速度のみを示している。複数目標判定箇所の複数の推定速度も含めて、時間毎に全てのレンジゲートにおける推定速度を示した結果を図 6 に示す。

図 5、図 6 から、複数目標箇所も含めてレンジゲート毎に複

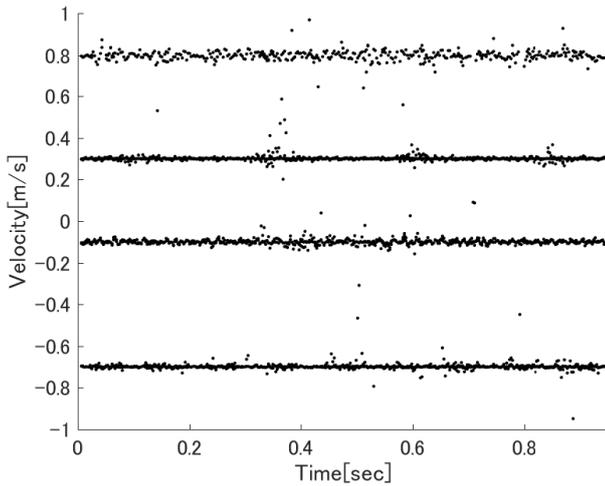


図6 時間領域 ESPRIT 法による速度推定結果。レンジ情報は無視し、目標の速度推定結果を示す。

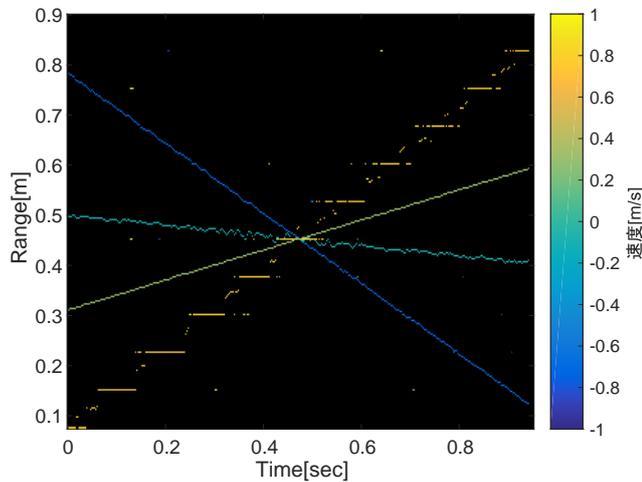


図7 レンジ間補間による目標位置推定結果

数の推定速度が得られていることがわかる。このとき、全ての推定速度のうちの94.2%が目標速度の真値 $\pm 0.025\text{m/s}$ 以内の値をとる精度で推定が行うことができた。

4.4 レンジ間補間による位置推定結果

ESPRIT 法により得られる速度・電力の推定結果から目標の位置推定を行う。このとき、同一目標の関連付けを行う速度差しきい値 v_{th} を 0.1m/s とする。

レンジ間補間による位置推定結果を図7に示す。図7からそれぞれの目標について、レンジ間補間により、レンジ方向のサンプリング間隔 0.075m より細かい位置推定値が得られていることがわかる。位置推定値のRMSE(最小二乗誤差)は、 0.8 m/s 、 0.3 m/s 、 -0.1 m/s 、 -0.7 m/s の目標の時間毎の位置の真値それぞれに対して 0.032m 、 0.0006m 、 0.0029m 、 0.0012m であり、3つの目標について、レンジ方向のサンプリング間隔 0.075m の20分の1以下の精度で位置推定を行うことができた。一方で速度 0.8m/s の目標については推定精度は低く、レンジ間補間の効果があまり得られなかったといえる。これは、

到来電力が小さい 0.8m/s の目標は複数レンジゲートに跨って推定電力が得られる割合が低く、レンジ間補間が行えないことが多かったためである。図7においてレンジ間補間が行えない場合は、推定位置が 0.075m 刻みで離散化されたままの状態として現れているため、信号対雑音比が低い場合であっても提案手法により距離精度が悪化することはない。一方、信号対雑音比が高い場合には距離推定精度に顕著な改善が見られる。

5. まとめ

本稿では、情報量基準による目標数推定法を導入した、単一アンテナ素子を有するレーダを用いた複数運動目標のドップラ速度による分離方法の検討を行った。また、ドップラ速度による分離結果に適用可能な、高精度な目標位置の推定方法を提案した。まず、ESPRIT 法による高分解能速度推定のために必要な目標数推定方法として MDL を導入し、二通りのパラメータ η について4つの目標が存在する数値シミュレーションを用いて評価を行った。その結果、 η を雑音電力より 4dB 大きな値に設定した場合は雑音による誤検出が抑えられるが、 η を雑音電力より 6dB 小さい値に設定した場合と比べ、雑音電力と同じ最大到来電力をもつ目標の検出割合が 29% 減少することが示された。その後、MDL による目標数推定結果に基づいて ESPRIT 法により目標のドップラ速度による分離を行った。最後に、レンジ間補間による位置推定をドップラ速度による分離情報に適用し、最大到来電力/雑音電力が 8dB 以上の目標については、RMSE がレンジ方向のサンプリング間隔の $1/20$ 以下の値となる位置推定精度が得られた。今後は、提案手法により推定される位置・ドップラ速度情報を活用した目標の追跡方法や、より複雑な目標を対象としたときのドップラ速度による分離手法の開発に取り組む。

文献

- [1] K. Schindler, A. Ess, B. Leibe, and L. V. Gool, "Automatic detection and tracking of pedestrians from a moving stereo rig," ISPRS J. of Photogramm. Remote Sens., vol. 65, pp. 523-537, 2010.
- [2] Y. Hohikawa, Y. Hashimoto, A. Moro, K. Terabayashi, and K. Umeda, "Tracking of human groups using subtraction stereo," SICE J. Contr. Meas. Sys. Integr., vol. 4, pp. 214-220, 2011.
- [3] Y. Kim and H. Ling, "Human activity classification based on microDoppler signatures using a support vector machine," IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens., vol. 47, pp. 1328-1337, 2009.
- [4] S. H. Chang, M. Wolf, and J. W. Burdick, "An MHT algorithm for UWB radar-based multiple human target tracking," in Proc. IEEE International Conference on Ultra-Wideband, pp. 459-463, 2009.
- [5] D. Tahmoush and J. Silvius, "Simplified model of dismount microDoppler and RCS," in Proc. IEEE Radar Conference., pp. 31-34, 2010.
- [6] K. Saho, T. Sakamoto, T. Sato, K. Inoue, and T. Fukuda, "Pedestrian imaging using UWB Doppler radar interferometry," IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, pp. 613-623, 2013.
- [7] H. Yamazaki, T. Sakamoto, H. Taki, and T. Sato, "False image suppression in two-dimensional shape estimates of a walking human using multiple ultra-wideband Doppler radar interferometers," IEICE Trans. Commun., vol. E99-B, pp. 134-142, 2016.

- [8] M. Anabuki, S. Okumura, T. Sakamoto, K. Saho, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda and H. Sakai, “Ultra-Wideband Radar Imaging using Adaptive Array and Doppler Separation,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* vol. 53, no. 1, pp. 190-200, Feb. 2017.
- [9] J. Capon, “High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis,” *Proc. IEEE*, vol. 57, pp. 1408-1418, 1969.
- [10] R. Roy, A. Paulraj, and T. Kailath, “ESPRIT-A subspace rotation approach to estimation of parameters of cisoids in noise,” *IEEE Trans. Acous. Speech, Sig. Proc.*, vol. 34, no. 5, pp. 1340-1342, 1986.
- [11] F. Gran, A. Jakobsson, and J. A. Jensen, “Adaptive spectral doppler estimation,” *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Control*, vol. 56, pp. 700-714, 2009.
- [12] 上品彰斗, 奥村成皓, 阪本卓也, 佐藤亨, “適応的信号処理に基づく超広帯域レーダを用いた複数運動目標信号の分離,” 電子情報通信学会. 総合大会予稿集, B-2-52, 2017.
- [13] M. Wax, T. Kailath, “Detection of signals by information theoretic criteria,” *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol.33, pp. 387-392, 1985.
- [14] S. Sauer, L.Ferro-Famil, E.Pottier, A. Reigber, “Physical parameter extraction over urban areas using L-band POL-SAR data and interferometric baseline diversity,” *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2007 IEEE International*, pp. 5045-5048, 2007