

## ドップラー速度と航跡を照合するクラッタ環境向け目標追尾開始方式

小幡 康<sup>†a)</sup> 前川 良二<sup>††</sup> 亀田 洋志<sup>†</sup> 系 正義<sup>†††</sup>  
小菅 義夫<sup>†††</sup>

Track Initiation Method under Clutter Environment Comparing Doppler  
Measurement and Tracking Estimation

Yasushi OBATA<sup>†a)</sup>, Ryoji MAEKAWA<sup>††</sup>, Hiroshi KAMEDA<sup>†</sup>, Masayoshi ITO<sup>†††</sup>,  
and Yoshio KOSUGE<sup>†††</sup>

あらまし レーダを用いたクラッタ環境下の目標追尾開始では、目標航跡とクラッタの誤相関により誤航跡が発生し、レーダの電力資源を浪費する。本論文ではこの問題を解決するためドップラー速度情報を用いた誤相関の抑圧を試みる。低 PRF (Pulse Repetition Frequency) の搜索レーダの場合、ドップラー速度の観測値は折返しにより目標航跡と観測値の照合が困難となるが、本論文では目標航跡の予測値と観測値の双方を補正して照合する予測値照合方式を提案する。また更にその相関性能を高めるために、目標航跡の平滑値と観測値の照合を行う平滑値照合方式を提案する。性能評価シミュレーションにより、提案方式の誤航跡抑圧の効果と、折返し幅が狭い場合における平滑値照合方式の有効性を示す。

キーワード 追尾フィルタ、ドップラー速度、追尾開始、MHT、相関判定

## 1. ま え が き

航空管制等で利用される目標追尾はレーダ等のセンサから得られる観測値を使って航跡を生成し、位置や速度等の目標の運動諸元を推定する。海面や雲等が目標付近に存在する場合、目標以外のクラッタが観測値として得られ、目標航跡以外の誤航跡が発生する。航空管制では開始された航跡に対してレーダのビームを割り当てて追尾を継続する必要があるが、誤航跡が多発するとレーダの電力資源が浪費され、目標の追尾が継続できなくなる可能性が生じるため、誤航跡の発生は最小限に抑える必要がある。不要信号環境に対応し

た目標追尾方式として MHT [1] とその追尾開始性能を高めた改良アルゴリズムである航跡型 MHT (Multiple Hypothesis Tracking) [2], [3] が知られている。

本論文では航跡型 MHT の誤航跡抑圧性能を更に高めるため、レーダ観測値に含まれる属性情報を利用することを試みる。属性情報としては信号強度があり、これを利用して誤警報と航跡の相関を抑制する方式が提案されている [4]。しかしこの方式は目標信号とクラッタに電力差がなければ性能は期待できず、反射断面積の大きなクラッタを抑圧しようとする場合、この方式は有効とはいえない。そこで本論文ではドップラー速度観測値の利用を検討する。なお、本論文ではウェザークラッタ、シークラッタの双方のうち、信号処理で消え残りであり、かつ距離変化率が 0 [m/s] 付近で揺らぐクラッタを対象とし、これらを低速クラッタと名づける。ドップラー速度は目標の距離変化率の情報であり、目標航跡の状態ベクトル推定値との照合により相関の有無の判定に利用できる。レーダから得られる距離変化率情報を利用する改良 MHT 方式が提案されており、高密度環境下での効果が確認されている [5]。ただし距離変化率の観測値はドップラーシフト差、すなわちパルス圧縮レーダの直線状周波数変調

<sup>†</sup> 三菱電機株式会社情報技術総合研究所, 鎌倉市  
Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric  
Corporation, Kamakura-shi, 247-8501 Japan

<sup>††</sup> 三菱電機株式会社通信機製作所, 尼崎市  
Communication Systems Center, Mitsubishi Electric Corporation,  
Amagasaki-shi, 661-8661 Japan

<sup>†††</sup> 三菱電機株式会社鎌倉製作所, 鎌倉市  
Kamakura Works, Mitsubishi Electric Corporation,  
Kamakura-shi, 247-8520 Japan

<sup>††††</sup> 長崎大学工学部, 長崎市  
Faculty of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki-shi,  
852-8521 Japan

a) E-mail: Obata.Yasushi@dr.MitsubishiElectric.co.jp

のアップチャープとダウンチャープで発生する距離観測値のずれの差異から算出することを前提としているが、その精度は十分ではない。これに対してレーダの送信波と受信波の周波数差より算出したドップラー速度観測値は上記のドップラーシフト差をもとにした距離変化率よりも高精度であるため、その観測値を入力とする追尾処理の開始性能についても向上が期待できる。しかし遠距離目標向けのレーダの低 PRF (Pulse Repetition Frequency) の設定では、この周波数差によるドップラー速度観測値にアンビギュイティが発生する [6]。すなわち、ドップラー速度の観測値は真の値からある限られた範囲に収まるように折り返された値となって現れる。そのため前述の改良 MHT 方式に周波数差をもとにするドップラー速度観測値を適用すると、目標航跡は観測値をゲート内に捕そくできず、追尾の継続が不可能となる。よって現状では低 PRF のレーダでは観測値のドップラー速度情報を無視して位置情報のみで追尾するしか手段がない。

この課題に対して、本論文ではドップラー速度の折返しを考慮したゲート内外判定を行う予測値照合方式を提案する。この方式では観測値と航跡の相関決定において、観測値と航跡から算出されるドップラー速度の双方を、折返しを考慮して補正処理した上で照合することにより、低 PRF でのドップラー速度観測値の利用を可能とする。

また、折り返された目標のドップラー速度の観測値の分布は低速クラッタのドップラー速度の分布に近づくことから追尾において目標航跡と低速クラッタの誤相関が起きやすくなる。この課題に対して、本論文では観測値の距離、角度からなる位置情報を用いて航跡をいったん平滑してからドップラー速度の照合を行う平滑値照合方式を提案する。平滑ベクトルはその推定精度が予測ベクトルよりも高いため、この方式ではゲートの領域がより限定され、低速クラッタ捕そくの可能性を低減できる。

本論文の構成は次のとおりである。2. で追尾の座標系とフィルタのモデル設定及び初期推定値の算出方法を、3. で従来方式として観測値の位置情報のみを利用する航跡型 MHT による相関決定と追尾開始方式を説明する。4. では低 PRF レーダにおけるドップラー速度情報利用の課題を述べ、予測値照合方式と平滑値照合方式を提案する。5. でシミュレーションによる性能評価を行い、6. でまとめを行う。

## 2. 座標系と追尾フィルタのモデルと初期値算出方法

### 2.1 座標系

図 1 のようにレーダを原点、東を  $x$  軸の正、北を  $y$  軸の正、水平面鉛直方向を  $z$  軸の正にとった座標系を北基準直交座標という。

また、図 1 のようにレーダから目標までの距離を  $r$ 、水平面から目標までの仰角を  $e$ 、水平面内で北方向から目標までの方位角を  $by$  とした座標を極座標という。各変数の間には以下の式 (1), (2) で示す関係がある。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos e \sin by \\ r \cos e \cos by \\ r \sin e \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} r \\ e \\ by \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \tan^{-1} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \tan^{-1} \frac{y}{x} \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 2.2 運動モデル

時刻  $t_k$  における目標の状態変数ベクトル  $x_k$  を北基準直交座標の位置、速度で記述し、以下とする。

$$x_k = [x_k \ y_k \ z_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \dot{z}_k]^T \quad (3)$$

運動モデルを以下の式 (4) に従って設定する。

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + \Gamma_{1k} w_k \quad (4)$$

ここで  $\Phi_k$  は推移行列であり、サンプリング間隔  $\Delta t$  より以下の式で表す。

$$\Phi_k = \begin{pmatrix} I & (\Delta t) I \\ 0 & I \end{pmatrix} \quad (5)$$

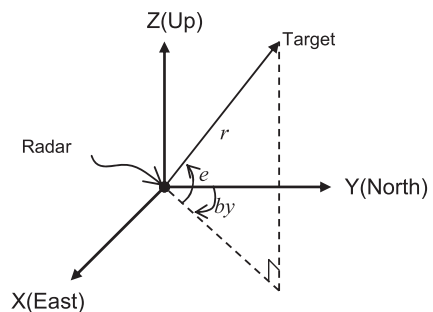


図 1 北基準直交座標

Fig. 1 NEU coordinate systems.

$I$  は 3 行 3 列の単位行列,  $0$  は零行列である. また  $w_k$  は駆動雑音ベクトルであり, 平均  $0$ , 分散  $Q_k$  の白色雑音過程に従う.

$$E[w_k] = 0 \quad (6)$$

$$E[w_k w_k^T] = Q_k \quad (7)$$

また  $\Gamma_{1k}$  は駆動雑音変換行列で以下の式 (8) で表される.

$$\Gamma_{1k} = \begin{pmatrix} (\Delta t)^2 I \\ 2 \\ (\Delta t) I \end{pmatrix} \quad (8)$$

### 2.3 観測モデル

時刻  $t_k$  の直交座標による観測ベクトルを  $z_k$  とすると,

$$z_k = [x_{ko} \ y_{ko} \ z_{ko}]^T \quad (9)$$

である. ただしレーダより直接得られる観測値は距離, 仰角, 方位角からなる極座標での情報  $z_k^P \equiv [r_{ko} \ e_{ko} \ by_{ko}]^T$  であるため, 式 (1) を用いた座標変換を行う. このとき観測モデルは以下の式 (10) となる.

$$z_k = H x_k + \Gamma_{2k} v_k \quad (10)$$

ここで  $H$  は観測行列であり, 以下の式 (13) で記述される.

$$H = [I \ 0] \quad (11)$$

また  $v_k$  は極座標によるレーダの観測雑音ベクトルであり, 平均  $0$ , 分散  $R_k$  の白色雑音過程に従う.

$$E[v_k] = 0 \quad (12)$$

$$E[v_k v_k^T] = R_k \quad (13)$$

また  $\Gamma_{Rk}$  は, 観測雑音が微量であることを仮定して以下の式 (14) に従って北基準直交座標による観測雑音ベクトルを極座標による観測雑音ベクトルの線形一次変換で表す場合の変換行列であり, 式 (15) となる.

$$v_k^C \simeq \Gamma_{Rk} v_k \quad (14)$$

$$\Gamma_{2k} \equiv \left. \frac{\partial r_k}{\partial r^P} \right|_{r^P=r_k^P} \quad (15)$$

ただし  $v_k^C$  は北基準直交座標による観測雑音ベクトル,  $r_k$  は北基準直交座標で表した目標の位置ベクトル,  $r_k^P$  は極座標で表した目標の位置ベクトルである.

## 3. 航跡型 MHT による追尾開始方式

クラッタ環境下の追尾開始では, 相関決定方式の高度化により航跡と低速クラッタの相関を抑制する必要がある. 追尾開始機能をもち, 不要信号環境に対応可能な追尾アルゴリズムとして航跡型 MHT が知られている [2], [3].

### 3.1 相関決定方式

航跡型 MHT の相関決定方式の概要を説明する. 航跡型 MHT では航跡と観測値の相関の組合せについて複数の仮説を生成, 維持する. 生成される仮説群の中には得られた観測値を新目標とみなす仮説が含まれ, この仮説が含む航跡を確立させて追尾開始を行う.

観測値に低速クラッタが含まれる状況で低速クラッタを新目標とみなす誤った仮説が生成される. この仮説が成長すると誤航跡が発生するため, 仮説を誤りと判断して棄却する必要がある. 仮説の採択, 棄却は仮説ごとに算出される信頼度によって判断する. 航跡型 MHT における仮説の信頼度算出式は以下の式 (16) に示すとおりである.

$$\beta_i = \frac{\gamma_i}{L} \sum_{i=1} \gamma_i \quad (16)$$

ここで  $\gamma_i$  は仮説のゆう度であり, 信頼度はゆう度の正規化により得られる. ゆう度  $\gamma_i$  は以下の式 (17) に従って算出する.

$$\begin{aligned} \gamma_i = & \beta_{p(i)} \times \prod_{n=1}^{N_{DT}} (P_D \cdot g_{m,n}) \times \prod_{n=1}^{N_{TRK}-N_{DT}} (1 - P_D P_G) \\ & \times \prod_{m=1}^{N_{FT}} \beta_{FT} \times \prod_{m=1}^{N_{NT}} \beta_{NT} \end{aligned} \quad (17)$$

ここで  $\beta_{p(i)}$  は更新前仮説の信頼度である. また  $N_{TRK}$  は更新前仮説内の既存航跡数,  $N_{DT}$  は更新前仮説内の既存航跡で, 最新観測時刻の観測値と相関した航跡の数,  $N_{FT}$  は仮説に含まれる不要信号数,  $N_{NT}$  は仮説に含まれる新航跡数である. また  $g_{m,n}$  は観測値が得られた場合の既存航跡のゆう度であり, 観測誤差の分布としてガウス分布を仮定すると,  $z_m$  を観測位置ベクトル,  $\hat{z}_n$  を予測観測位置ベクトル,  $S_n$  を残差共分散行列として以下の式 (18) に従って算出される.

$$g_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 |S_n|}} \exp\left(-\frac{1}{2} (z_m - \hat{z}_n)^T S_n^{-1} (z_m - \hat{z}_n)\right) \quad (18)$$

また  $P_D$  はレーダの探知確率,  $P_G$  はゲート内捕そく確率,  $\beta_{FT}$  は誤警報等の不要信号の発生密度であり,  $\beta_{NT}$  は新目標発生密度である. 式 (17) は現時刻の仮説信頼度が, 1 観測時刻前の仮説信頼度と現時刻の観測値の観測値に基づくゆう度を積算することにより再帰的に計算できることを示す. この式の第 2 項は既存航跡から観測値が得られた場合のゆう度であり, 第 3 項は既存航跡が探知抜けを起こした場合のゆう度であり, 第 4 項は新目標が得られた場合のゆう度である. またこのゆう度計算式 (17) は, ベイズ推定の考え方に基づいて, 時刻 0 から  $k$  に至るまでのある観測値群  $Z^k = \{Z(0), Z(1), \dots, Z(k-1), Z(k)\}$  が得られた場合に, 該当仮説  $\Omega_i^k$  が成立する確率  $P_i^k \equiv P(\Omega_i^k | Z^k)$  をベイズの定理を用いて以下のように展開すると導出できる [1].

$$\begin{aligned}
 & P\left(\Omega_g^{k-1}, \psi_h | Z(k), Z^{k-1}\right) \\
 &= \frac{1}{c} P\left(Z(k) | \Omega_g^{k-1}, \psi_h, Z^{k-1}\right) \cdot P\left(\psi_h | \Omega_g^{k-1}, Z^{k-1}\right) \\
 & \quad \cdot P\left(\Omega_g^{k-1} | Z^{k-1}\right) \quad (19)
 \end{aligned}$$

ここで  $\Omega_g^{k-1}$  は  $\Omega_i^k$  の親仮説, すなわち 1 時刻前の相関仮説であり,  $\psi_h$  は現観測時刻  $k$  における観測値  $Z(k)$  と観測時刻  $k-1$  で生成された航跡の割当てである. 右辺の  $c$  は  $P(Z(k) | Z^{k-1})$  に等しく, 相関に依存しないため定数として扱える. 第 1 項は観測時刻  $k$  の観測値  $Z(k)$  の観測諸元に関する仮説のゆう度であり, 目標観測値の観測誤差をガウス分布, 低速クラッタの発生位置の分布を一様分布と仮定する. 右辺第 2 項は観測値と航跡の組合せのゆう度であり, 目標観測値が得られる確率がレーダの探知確率に従い, 低速クラッタの発生個数がポアソン分布に従うと仮定して計算する. また第 3 項は親仮説  $\Omega_g^{k-1}$  の信頼度であり, 1 観測時刻前に計算済みである.

以上より式 (19) は 1 観測時刻前の仮説信頼度に, 現時刻の観測値の組合せと観測諸元に基づくゆう度を積算することにより再帰的に計算できる.

### 3.2 追尾開始判定方式

MHT で生成される航跡群から追尾開始を判定する方法の一つとして, 航跡信頼度を用いた手法がある. この方法では航跡を採択する仮説の信頼度の合計である航跡信頼度と航跡と相関した観測値の数がしきい値を超えたら航跡を確立させる [7].

## 4. ドップラー速度利用方式の改善

### 4.1 低 PFR レーダにおける課題

レーダの PRF が高い場合は, 図 2 上に示すように, 航跡から算出されるドップラー速度観測値の予測領域と低速クラッタのドップラー速度観測値の分布の重なりが極めて小さいため, 予測値照合方式における相関の誤りの可能性は低い. しかしレーダの PRF が低い場合, 図 2 下のようにドップラー速度情報が折り返され, 目標本来の距離変化率からかけ離れた観測値となる. このためこの折返し時の補正処理が必要となる. また, この折返しにより目標のドップラー速度観測値の分布は低速クラッタから得られるドップラー速度の分布に近づくことから両者の区別がつきにくくなり, 誤相関の可能性が大きくなる.

### 4.2 予測値照合方式

ドップラー速度観測値を利用した相関決定の精密化について説明する. この精密化では, 航跡型 MHT の各航跡と観測値の相関の有無の判定において通常の距離, 角度観測値の追尾航跡のゲート内外判定に加えて, 追尾フィルタによって推定される予測ベクトルから距離変化率を算出してドップラー速度の観測値と照合する 2 段階の判定を行う. この相関決定処理の機能構成を図 3 に示す. 二重線で示されたブロックがドップラー速度の比較を行うドップラー速度ゲート内外判定処理である.

以下, ドップラー速度ゲートの内外判定方式を説明する. 追尾フィルタが算出した予測ベクトルを用いて, ドップラー速度の予測観測値を以下のように計算する.

$$D_{kp} = -\frac{B}{2} + \text{mod}\left(\dot{R}_{kp} - \frac{B}{2}, B\right) \quad (20)$$

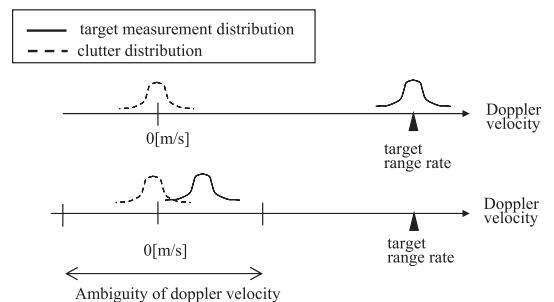


図 2 ドップラー速度の分布  
Fig. 2 Distribution of doppler velocity (Up: No ambiguity, Down: Strong ambiguity).

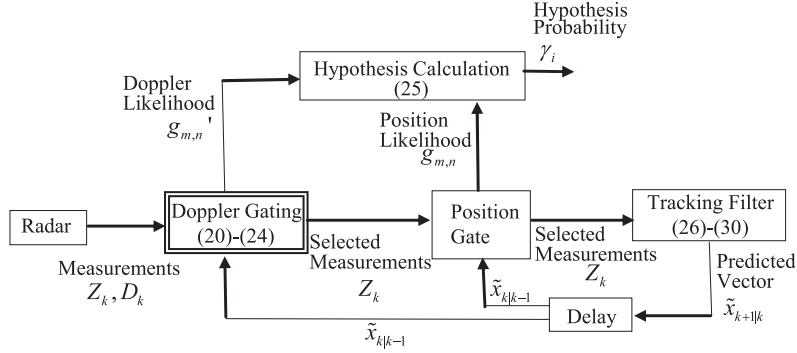


図 3 予測値照合方式の機能構成図  
Fig. 3 Block diagram of prediction comparing method.

ここで  $B$  はドップラー速度観測値の折返し幅, 関数  $\text{mod}(a, b)$  は  $a$  を  $b$  で割って得られる剰余であり,  $\hat{R}_{kp}$  は距離変化率の予測値で, 追尾フィルタが算出した予測ベクトル  $\hat{x}_{k|k-1} \equiv (x_{kp} \ y_{kp} \ z_{kp} \ \dot{x}_{kp} \ \dot{y}_{kp} \ \dot{z}_{kp})^T$  から以下に従って算出する.

$$\hat{R}_{kp} = \frac{x_{kp}\dot{x}_{kp} + y_{kp}\dot{y}_{kp} + z_{kp}\dot{z}_{kp}}{\sqrt{x_{kp}^2 + y_{kp}^2 + z_{kp}^2}} \quad (21)$$

ドップラー速度の観測値はアンビグイティを考慮して得られる複数の距離変化率の候補のうち, 上記の予測値に最も近い値に補正し, これを  $D'_k$  とする. 図 4 に例を示すが, もとの折返し幅内の観測値  $D_k$  に対して丸数字で示した複数の候補が考えられ, これらの候補のうち最も予測値観測値  $D_{kp}$  に近い②を  $D'_k$  とする.

ゲートの大きさを決定する残差共分散行列は以下に従って算出する.

$$S_k = H_k P_{kp} H_k^T + R_D \quad (22)$$

ここで  $R_D$  はドップラー速度の観測精度,  $P_{kp}$  は追尾フィルタの予測誤差共分散行列を示す. 観測行列  $H_k$  は以下の式に従い, 追尾フィルタの予測ベクトルを用いて計算する.

$$H_k = \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{R}_k}{\partial x_k} & \frac{\partial \dot{R}_k}{\partial y_k} & \frac{\partial \dot{R}_k}{\partial z_k} & \frac{\partial \dot{R}_k}{\partial \dot{x}_k} & \frac{\partial \dot{R}_k}{\partial \dot{y}_k} & \frac{\partial \dot{R}_k}{\partial \dot{z}_k} \end{pmatrix} \quad (23)$$

以上の算出結果を用いて, ドップラー速度ゲート内外判定は以下のように行う.

$$(D'_k - D_{kp})^T S_k^{-1} (D'_k - D_{kp}) < d \quad (24)$$

ここで  $D_k$  はドップラー速度観測値,  $d$  は一次元のゲ-

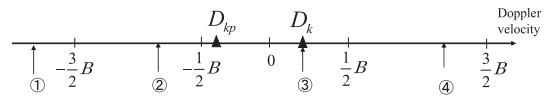


図 4 ドップラー速度の観測値と真値の候補例  
Fig. 4 An example of doppler velocity measurement and target range rate.

トサイズパラメータである.

仮説信頼度計算は, 以下となる.

$$\begin{aligned} \gamma_i = & \beta_{p(i)} \times \prod_{n=1}^{N_{DT}} (P_D \cdot g'_{m,n}) \times \prod_{n=1}^{N_{TRK}-N_{DT}} (1 - P_D P_G) \\ & \times \prod_{m=1}^{N_{FT}} \beta_{FT} \times \prod_{m=1}^{N_{NT}} \beta_{NT} \end{aligned} \quad (25)$$

式 (25) と従来方式の式 (17) との相違は積算される第 2 項の観測値のゆう度が  $g_{m,n}$  でなく  $g'_{m,n}$  となっている点にある. この  $g'_{m,n}$  は位置のみでなくドップラー速度を含んだ四次元の観測値に基づく航跡のゆう度である. これは式 (19) の計算において, 右辺第 2 項のみが従来と異なる計算になるためである. ドップラー速度の観測誤差は, 距離, 角度の観測誤差から独立であると仮定して,  $g'_{m,n}$  は以下となる.

$$g'_{m,n} = g_{m,n} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi|S_k|}} \times \exp\left(-\frac{1}{2}(D'_k - D_{kp})^T S_k^{-1} (D'_k - D_{kp})\right) \quad (26)$$

また, 位置情報に関するゆう度  $g_{m,n}$  は従来方式と同等の値となる.

### 4.3 平滑値照合方式

前節で説明した課題に対する解決策として, ドップラーゲートの幅を狭めて低速クラッタとの誤相関の可

能性を低減することを試みる．本論文で提案する平滑値照合方式では，相関判定の対象となる観測値の距離，角度情報を用いていったん航跡を平滑し，その平滑された運動諸元の推定値から距離変化率を算出してドップラー速度との比較を行う．この相関決定処理の機能構成を図5に示す．二重線で示すブロックがドップラー速度の比較を行うドップラー速度の照合処理に相当する．

以下ドップラー速度の照合方式について説明する．まず，観測値の位置情報を用いて以下の手順で平滑処理を行う．

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k [z_k - H \hat{x}_{k|k-1}] \quad (27)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H) P_{k|k-1} \quad (28)$$

ここで  $\hat{x}_{k-1|k-1}$  ,  $P_{k-1|k-1}$  は前観測時刻における航跡の平滑値，平滑誤差共分散行列である．また  $\tilde{x}_{k|k-1}$  ,  $P_{k|k-1}$  は現観測時刻における予測ベクトルとそれに伴う予測誤差共分散行列であり，2.2の運動モデルに従って以下のように計算する．

$$\tilde{x}_{k|k-1} = \Phi_{k-1} \hat{x}_{k-1|k-1} \quad (29)$$

$$P_{k|k-1} = \Phi_{k-1} P_{k-1|k-1} \Phi_{k-1}^T + \Phi_{k-1} \Gamma_{1(k-1)} Q_{k-1} \Gamma_{1(k-1)}^T \Phi_{k-1}^T \quad (30)$$

また  $K_k$  はカルマンゲインであり，2.3の観測モデルに従って以下のように計算する．

$$K_k = P_{k|k-1} H^T [H P_{k|k-1} H^T + \Gamma_{2k} R_k \Gamma_{2k}^T]^{-1} \quad (31)$$

航跡の平滑ベクトルを用いて，距離変化率を以下のよ

うに計算する．

$$D_{k_s} = -\frac{B}{2} + \text{mod} \left( \dot{R}_{k_s} - \frac{B}{2}, B \right) \quad (32)$$

ここで  $B$  はドップラー速度観測値の折返し幅， $\dot{R}_{k_p}$  は距離変化率の予測値で，追尾フィルタが算出した平滑ベクトル  $\hat{x}_{k|k} \equiv (x_{k_s} \ y_{k_s} \ z_{k_s} \ \dot{x}_{k_s} \ \dot{y}_{k_s} \ \dot{z}_{k_s})^T$  から以下に従って算出する．

$$\dot{R}_{k_s} = \frac{x_{k_s} \dot{x}_{k_s} + y_{k_s} \dot{y}_{k_s} + z_{k_s} \dot{z}_{k_s}}{\sqrt{x_{k_s}^2 + y_{k_s}^2 + z_{k_s}^2}} \quad (33)$$

以下の評価関数を計算する．

$$F = \dot{R}_{k_s} - D'_k \quad (34)$$

ここで  $D'_k$  は予測値照合方式で説明したドップラー速度の観測値の補正值である．両者が同一の目標運動を反映していれば，評価関数は0に近い値となる筈である．航跡の平滑ベクトルから算出した距離変化率とドップラー速度が同一の目標から得られたとする仮説を検定する．評価関数の共分散は以下のように計算する．

$$P' \equiv \begin{pmatrix} P_{k_s} & 0 \\ 0 & \sigma_D \end{pmatrix} \quad (35)$$

ここで  $\sigma_D$  はドップラー速度の観測精度， $P_{k_s}$  は航跡の平滑誤差共分散行列である．以上の計算結果を用いて，仮説検定は以下の式(36)で行う．

$$\frac{F(x_{k_s}, y_{k_s}, z_{k_s}, \dot{x}_{k_s}, \dot{y}_{k_s}, \dot{z}_{k_s}, D_k)^2}{L P' L^T} < d \quad (36)$$

ここで， $L$  は式(37)に従って評価関数  $F$  を各引数で

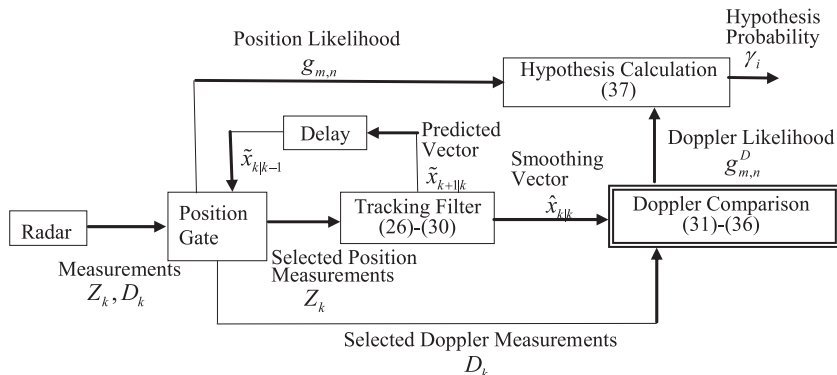


図5 平滑値照合方式の機能構成図  
Fig. 5 Block diagram of smooth comparing method.

偏微分することによって得られるベクトルであり，式 (36) はドップラー照合のゲート内外判定に相当する．

$$L = \left( \frac{\partial F}{\partial x_k} \frac{\partial F}{\partial y_k} \frac{\partial F}{\partial z_k} \frac{\partial F}{\partial \dot{x}_k} \frac{\partial F}{\partial \dot{y}_k} \frac{\partial F}{\partial \dot{z}_k} \frac{\partial F}{\partial D_k} \right) \quad (37)$$

仮説信頼度計算は，以下となる．

$$\begin{aligned} \gamma_i = & \beta_{p(i)} \times \prod_{n=1}^{N_{DT}} \left( P_D \cdot g_{m,n} \cdot g_{m,n}^D \right) \times \prod_{n=1}^{N_{TRK}-N_{DT}} (1 - P_D P_G) \\ & \times \prod_{m=1}^{N_{FT}} \beta_{FT} \times \prod_{m=1}^{N_{NT}} \beta_{NT} \end{aligned} \quad (38)$$

式 (37) と従来方式の式 (17) との相違は積算される第 2 項の航跡のゆう度が  $g_{m,n}$  に  $g_{m,n}^D$  が積算されている点にあるが，これは位置情報の観測値まで反映された航跡の，ドップラー速度の観測値に基づくゆう度であり，以下の式となる．

$$\begin{aligned} g_{m,n}^D = & \frac{1}{\sqrt{2\pi|LP'L^T|}} \\ & \times \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{F(x_{k_s}, y_{k_s}, z_{k_s}, \dot{x}_{k_s}, \dot{y}_{k_s}, \dot{z}_{k_s}, D_k)^2}{LP'L^T}\right) \end{aligned} \quad (39)$$

式 (38) は時刻  $k$  の観測値を位置情報のみから成る観測値で，次にドップラー速度のみから成る観測値で仮説信頼度を 2 段階に更新，すなわち式 (19) の計算を 2 回に分けて行うことによって得られる．最初の段階で得られる信頼度は従来の式 (17) となり，次の段階の計算では式 (19) の計算において，右辺第 2 項は相関決定が前段階で一意に定まっているため 1.0 となり，右辺第 1 項に式 (39) が反映されて，式 (38) が得られる．式 (38) の導出を付録に示す．また，位置情報に関するゆう度  $g_{m,n}$  は従来方式と同等の値となる．

## 5. シミュレーション

直進目標の追尾開始を例とするシミュレーションにより，前章で提案した方式を従来方式と比較評価した．

### 5.1 目標運動と観測条件

シナリオの目標運動を図 6 に示す．目標はレーダからの地表距離 70 km の地点からレーダに向かって速度 170 m/s で 100 秒間直進する．観測条件は次のとおりである．観測間隔は 6 秒とし，観測誤差の標準偏差を距離 100 m，角度については 7 mrad，ドップラー速度は 3 m/s とする．探知確率は 0.5 とし，低速クラッタの発生頻度は誤警報確率に換算して  $1.0 \times 10^{-3}$  相当

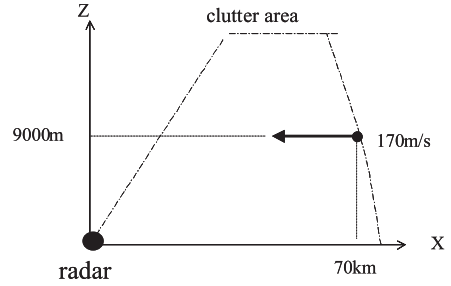


図 6 目標運動の軌跡 (シナリオ 1)  
Fig. 6 Motion of the target in the simulation scenario 1.

とし，図の仰角 70 度以内，高さ 2 km 以内の固定領域にポアソン分布に従って発生させる．これをシナリオ 1 とする．

また，シナリオ 1 の観測間隔を 10 秒に広げてより厳しい条件とし，目標速度を 270 m/s と変更したシナリオをシナリオ 2 とする．

### 5.2 追尾開始方式

提案方式の評価として以下の 3 方式の性能を比較した．試行回数 100 回のモンテカルロシミュレーションを行い，目標航跡の開始成功率，更に誤航跡発生率を測定した．目標航跡開始確率はシミュレーションにおける各観測時刻で目標航跡が確立されている試行の全試行に対する割合の推移を示したもので，これが早期に 1.0 に近づくほど，より遠方で目標の発見が可能であることを示す [3]．また，誤航跡発生率は各シミュレーション時刻における 1 試行当りの誤航跡発生数を示す．

#### (1) 従来方式

観測値の位置情報のみを利用する航跡型 MHT による追尾開始方式である．

#### (2) 予測値照合方式

航跡型 MHT にドップラー速度観測値の予測値照合機能を加えた追尾開始方式である．

#### (3) 平滑値照合方式

航跡型 MHT にドップラー速度観測値の平滑値照合機能を加えた追尾開始方式である．

### 5.3 追尾開始性能

ドップラー速度の折返しがない条件における追尾開始性能を図 7 に示す．図の上が目標航跡開始確率のシミュレーション時刻に応じた推移を示しており，早期の上昇が望ましい．図の下が誤航跡の推移を示しており，少ないほど望ましい．図 7 に示す，折返しがない

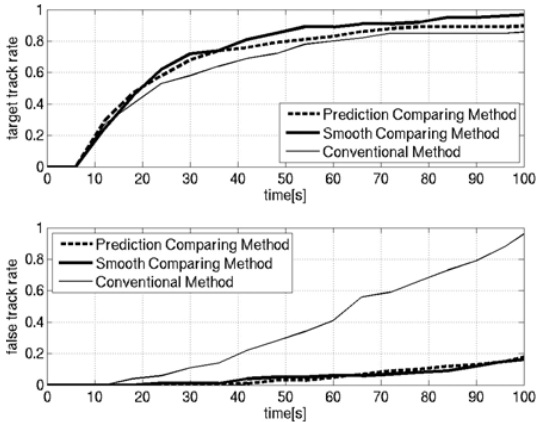


図 7 折返しがない場合の追尾開始性能の比較

Fig. 7 Tack initiation performance in no-ambiguity (Up: Target track rate, Down: False track rate).

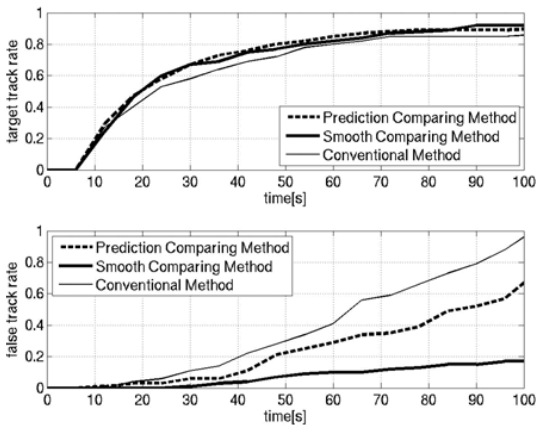


図 8 折返し幅 200 m/s での追尾開始性能

Fig. 8 Tack initiation performance in 200 m/s ambiguity (Up: Target track rate, Down: False track rate).

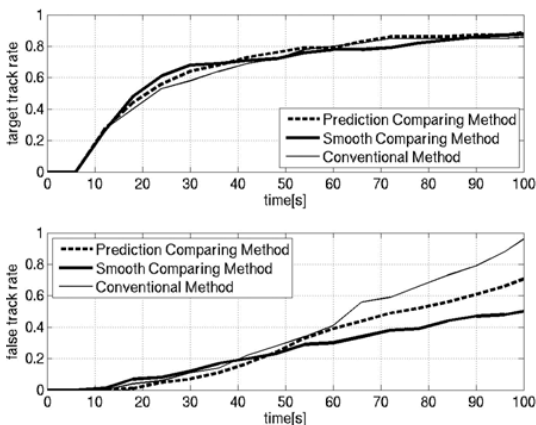


図 9 折返し幅 100 m/s での追尾開始性能

Fig. 9 Tack initiation performance in 100 m/s ambiguity (Up: Target track rate, Down: False track rate).

場については予測値照合方式，平滑値照合方式がともに目標航跡開始確率は従来方式よりも上回っており，かつ誤航跡は削減されている．

折返し幅を 200 m/s，100 m/s，60 m/s とした条件における追尾開始性能を図 8～図 10 に示す．折返し幅が狭くなるに従って予測値照合方式，平滑値照合方式の誤航跡数が増加している．ただし両方式とも従来方式以上の性能は維持している．また，平滑値照合方式の方が誤航跡数が少なく，特に折返し幅が 60 m/s の条件では予測値照合方式は従来方式との差がほとんどないのに対して，平滑値照合方式では従来方式に対して約半分の誤航跡削減を示している．すなわち，折返し幅が狭いほど予測値照合方式と平滑値照合方式の誤航跡発生数は増加して従来方式に近づくが，後者の方がより狭い折返し幅でも従来方式に対する優位性を維持している．

折返し幅 100 m/s なる条件での追尾航跡例を以下に示す．図 11 は各々ドップラー不使用方式，予測値照合方式で追尾を行った場合の XY 平面上的観測値と航跡の平滑値であり，図 12 は平滑値照合方式で追尾を行った場合の観測値と航跡の平滑値である．目標航跡は同一時刻に開始されているが，予測値照合方式では誤航跡が一つ発生するのに対して平滑値照合方式ではその誤航跡が抑圧されている．

次に同じ観測条件における予測値照合方式と平滑値照合方式の航跡から推定したドップラー速度の照合における初探知時刻 0 からのゲート幅の推移を図 13 に

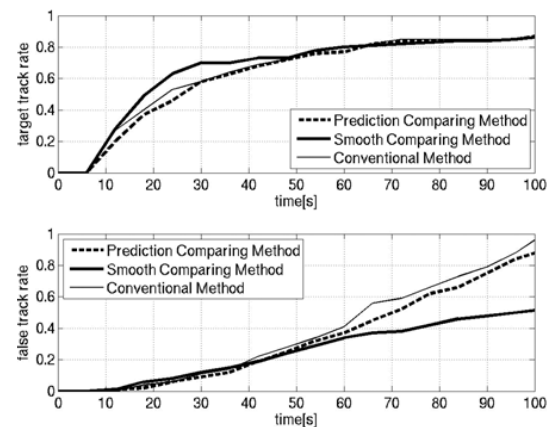


図 10 折返し幅 60 m/s での追尾開始性能

Fig. 10 Tack initiation performance in 60 m/s ambiguity (Up: Target track rate, Down: False track rate).



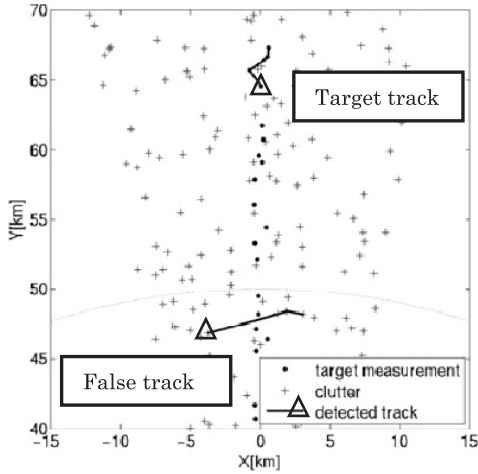


図 11 予測値照合方式の航跡例  
Fig. 11 A track example using prediction comparing method.

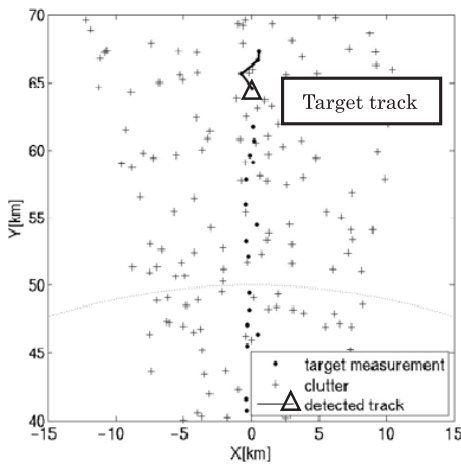


図 12 平滑値照合方式の航跡例  
Fig. 12 A track example of smooth comparing method.

示す．なおこれは予測値照合方式については式 (22) の一次元の残差共分散行列の平方根，平滑値照合方式は式 (36) の分母の平方根である．この値が小さい程低速クラッタとの誤相関の可能性が低くなるが，第 3 観測時刻である 12 秒におけるゲートの大きさは平滑値照合方式が予測値照合方式のその約半分まで抑えられていることが分かる．また，予測値照合方式は第 2 観測時刻である 6 秒ではゲートの設定ができないが，平滑値照合方式ではこの時点から照合が可能となる．

次に，シナリオ 1 での追尾開始性能を折返しがない場合，折返し幅 200m/s とした場合の 1 サンプル

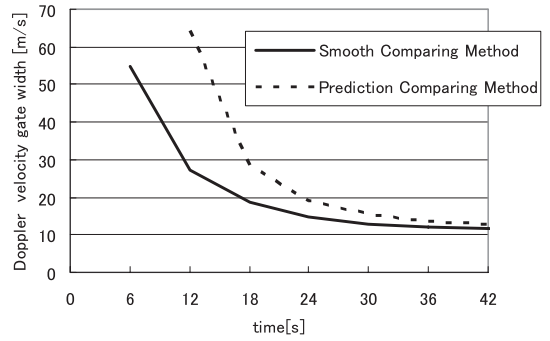


図 13 ドップラー速度ゲート幅の推移  
Fig. 13 Comparison of doppler velocity gate width.

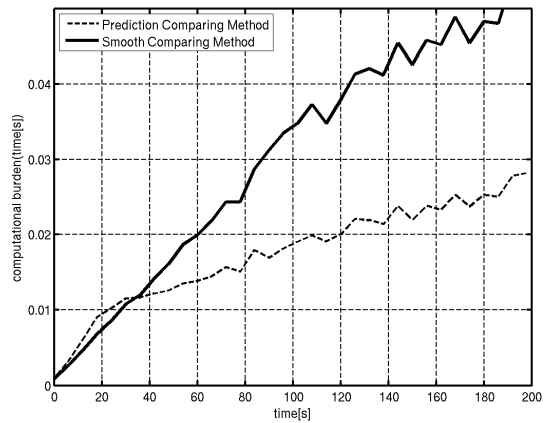


図 14 折返しがない場合の演算時間の比較  
Fig. 14 Computational burden in no-ambiguity.

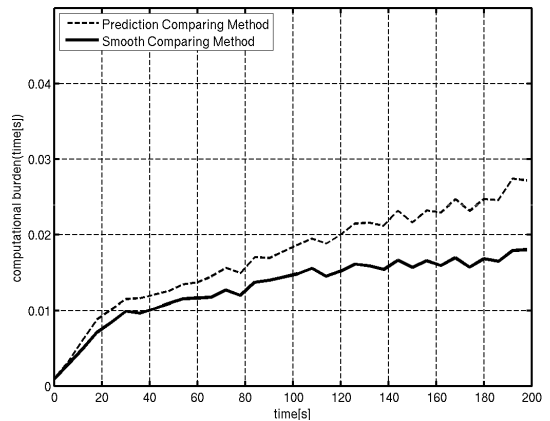


図 15 折返し幅 200 m/s での演算時間の比較  
Fig. 15 Computational burden in 200 m/s ambiguity.

時刻当りの演算時間の推移を図 14，図 15 に示す．折返しがない場合は 1 航跡当りの照合処理にかかる負荷の高い平滑値照合方式よりも予測値照合方式の方が低

い演算負荷を示す．一方，折返し幅が 200 m/s の場合は，平滑値照合方式の方が発生する誤航跡数が少ないため，全体での処理負荷が予測値照合方式よりも低くなる．

以上より折返し幅が狭い場合は平滑値照合方式が性能面，演算時間の面でも予測値照合方式に比べて有利であり，折返し幅が広い場合は予測値照合方式が演算負荷の面から有利であるといえる．ここで折返し幅の設定について考察する．折返し幅はレーダの PRF に依存する．レーダの送信周波数 1GHz における，折返し幅と最大距離の関係を表 1 に示す．この表より，100 km 以上の距離にある目標を対象とする場合は平滑値照合方式が有利であるといえる．また目標速度 300 m/s で折返しが発生しないためには 600 m/s 以上の折返し幅が必要となり，最大距離が 38 km となる．よって距離数十 [km] の範囲内では予測値照合方式と平滑値照合方式の性能は変わらず，演算負荷が少ない予測値照合方式が有利と考えられる．

次に，シナリオ 2 での追尾開始性能を折返しがない場合，折返し幅 200m/s，100 m/s，60 m/s とした場合について図 16～図 19 に，折返しがない場合と折返

表 1 折返し幅と最大距離の関係  
Table 1 Relation between doppler ambiguity and maximum target range.

Doppler ambiguity[m/s]	Maximum range[km]
60	380
100	230
200	110

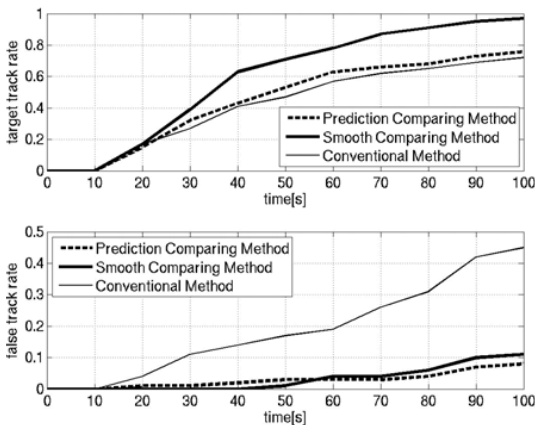


図 16 折返しがない場合の追尾開始性能の比較

Fig. 16 Tack initiation performance in no-ambiguity (Up: Target track rate, Down: False track rate).

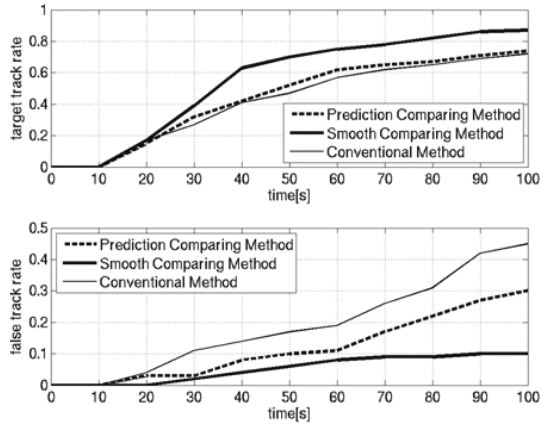


図 17 折返し幅 200 m/s での追尾開始性能

Fig. 17 Tack initiation performance in 200 m/s ambiguity (Up: Target track rate, Down: False track rate).

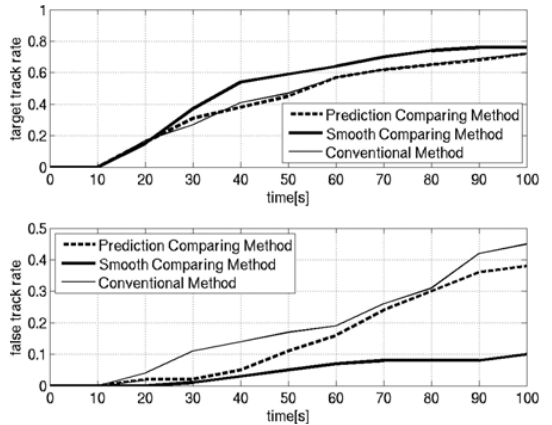


図 18 折返し幅 100 m/s での追尾開始性能

Fig. 18 Tack initiation performance in 100 m/s ambiguity (Up: Target track rate, Down: False track rate).

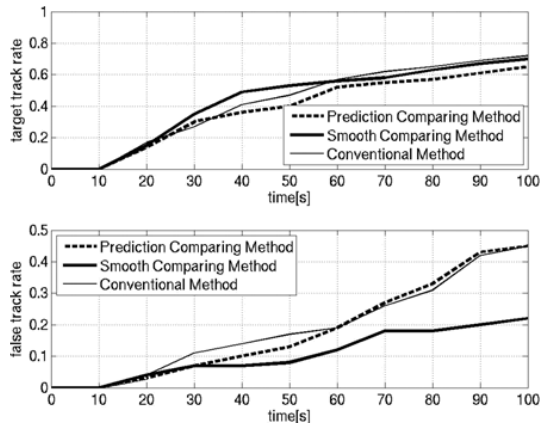


図 19 折返し幅 60 m/s での追尾開始性能

Fig. 19 Tack initiation performance in 60 m/s ambiguity (Up: Target track rate, Down: False track rate).

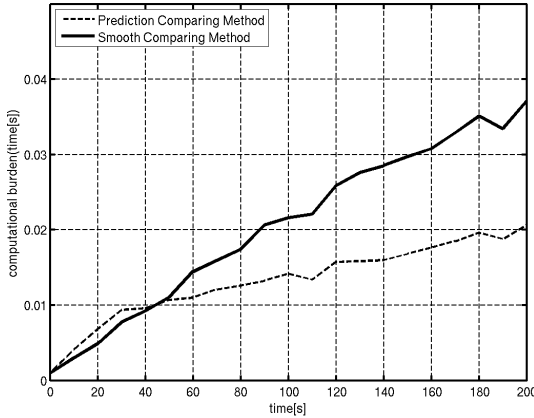


図 20 折返しがない場合の演算時間の比較  
Fig. 20 Computational burden in no-ambiguity.

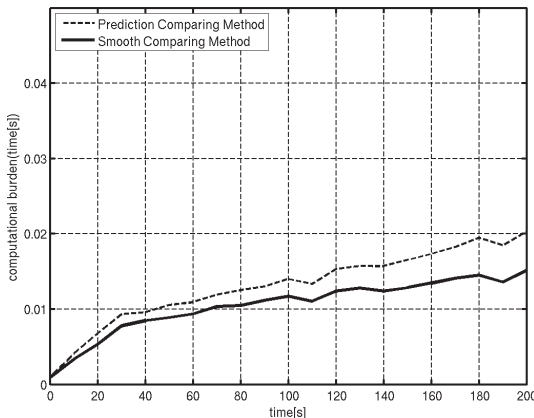


図 21 折返し幅 200 m/s での演算時間の比較  
Fig. 21 Computational burden in 200 m/s ambiguity.

し幅 200 m/s の場合の演算時間の推移を図 20, 図 21 に示す。観測間隔がシナリオ 1 に比べて長いと目標航跡開始確率は低くなるが、誤航跡数の発生数については同様のこと、すなわち提案方式が従来方式に対して優位性を示すこと、折返しがない場合は予測値照合方式と平滑値照合方式で同等の性能で演算負荷の面より予測値照合方式が有利であること、折返し幅が狭い場合は平滑値照合方式が有利であることが分かる。

## 6. むすび

レーダを用いたクラッタ環境下での目標追尾開始において、誤航跡の削減を目的としたドップラー速度観測値の利用方式として予測値照合方式と平滑値照合方式を提案した。シミュレーション評価の結果、折返しがある条件でも従来方式に比べて誤航跡抑圧効果が現

れることが確認された。また、折返し幅が狭くなるに従って提案方式の誤航跡削減効果は少なくなるが、予測値照合方式に比べて平滑値照合方式の方が、より狭い折返し幅の条件下でも誤航跡削減効果が維持されることが分かった。一方、演算負荷と追尾性能を考慮すると予測値照合方式は折返し幅の広い場合に有効であることも分かった。提案手法におけるドップラー速度照合に伴う演算負荷の削減が今後の課題である。

## 文 献

- [1] D.B. Reid, "An algorithm for tracking multiple targets," IEEE Trans. Autom. Control, vol.AC-29, no.2, pp.843-854, Dec. 1984.
- [2] 小菅義夫, 立花康夫, 辻道信吾, "航跡型多重仮説相関方式を用いた多目標追尾," 信学論 (B-II), vol.J79-B-II, no.10, pp.677-685, Oct. 1996.
- [3] 小幡 康, 系 正義, 小菅義夫, "航跡型 MHT による目標追尾開始の性能評価," 信学論 (B), vol.J88-B, no.5, pp.987-996, May 2005.
- [4] 小幡 康, 前川良二, 亀田洋志, 系 正義, 小菅義夫, "後ろ向き予測を用いた低 S/N 目標の追尾開始," 信学論 (B), vol.J91-B, no.11, pp.1502-1511, Nov. 2008.
- [5] H. Iwama, Y. Kosuge, T. Aiba, and H. Kawazoe, "Track initiation using MHT in dense environments," Proc. IEICE International Symposium on Noise and Clutter Rejection in Radars and Imaging Sensors, pp.608-613, 1989.
- [6] S. Blackman and R. Popoli, Design and Analysis of Modern Tracking Systems, Artech House, MA, 1999.
- [7] Y. Bar-Shalom and X.-R. Li, Estimation and Tracking: Principles, Technique and Software, Artech House, MA, 1993.
- [8] 小幡 康, 亀田洋志, 系 正義, "N パックスキャン MHT の短観測周期における目標追尾開始性能," 2007 信学ソダ (通信), B-2-14, 2007.

## 付 録

(平滑値照合方式における仮説信頼度計算式 (38) の導出)

時刻  $k$  における仮説信頼度を以下のように定義する。

$$P_i^k \equiv P(\Omega_i^k | Z^k) \tag{A-1}$$

式中の記号の意味は以下のとおりである。

$\Omega_i^k$ : 時刻  $k$  における  $i$  番目の仮説。  $\Omega_g^{k-1}$  を親仮説とする。

$Z^k$ : 時刻  $k$  までの観測値の集合。時刻  $j$  の観測値  $Z(j)$  の集合として、以下のように表せる。

$$Z^k = \{Z(0), Z(1), \dots, Z(k-1), Z(k)\}$$

$\psi_h$  : 現観測時刻  $k$  における観測値  $Z(k)$  と観測時刻  $k-1$  で生成された航跡の割当  $\Omega_g^{k-1}$  と  $\psi_h$  の組合せで仮説  $\Omega_i^k$  が一意に決定される。

ベイズの定理を利用して, 上式を展開すると以下となる。

$$P\left(\Omega_g^{k-1}, \psi_h | Z(k), Z^{k-1}\right) = \frac{1}{c} P\left(Z(k) | \Omega_g^{k-1}, \psi_h, Z^{k-1}\right) \cdot P\left(\psi_h | \Omega_g^{k-1}, Z^{k-1}\right) \cdot P\left(\Omega_g^{k-1} | Z^{k-1}\right) \quad (\text{A.2})$$

右辺の  $c$  は  $P(Z(k) | Z^{k-1})$  に等しく, 相関に依存しないため定数として扱える。右辺第 2 項は観測値の情報を含まない組合せのゆう度であるため従来方式と同様の計算結果となる。また第 3 項は親仮説  $\Omega_g^{k-1}$  の信頼度である。右辺第 1 項について, 観測値  $Z(k)$  はその位置の成分  $Z_{pos}(k)$  とドップラーの成分  $Z_{dop}(k)$  により構成されるから,

$$\begin{aligned} P\left(Z(k) | \Omega_g^{k-1}, \psi_h, Z^{k-1}\right) &= P\left(Z_{pos}(k), Z_{dop}(k) | \Omega_g^{k-1}, \psi_h, Z^{k-1}\right) \\ &= P\left(Z_{pos}(k) | \Omega_g^{k-1}, \psi_h, Z^{k-1}\right) \\ &\quad \cdot P\left(Z_{dop}(k) | Z_{pos}(k), \Omega_g^{k-1}, \psi_h, Z^{k-1}\right) \quad (\text{A.3}) \end{aligned}$$

最終段の第 1 項は従来方式で計算する位置情報のみに基づく航跡のゆう度  $g_{m,n}$  であり, 第 2 項は観測値の位置情報まで得られた状況でのドップラー観測値の確率密度であるから

$$P\left(Z(k) | \Omega_g^{k-1}, \psi_h, Z^{k-1}\right) = g_{m,n} \cdot g_{m,n}^D \quad (\text{A.4})$$

以上の個々の計算結果を積算して整理すると, 式 (A.1) は本文中の式 (38) となる。

(平成 21 年 5 月 27 日受付, 9 月 24 日再受付)



小幡 康 (正員)

平 5 東大・工・電子卒。平 7 同大学院修士課程了。同年, 三菱電機(株)入社。以来, データベース, 目標追尾の研究開発に従事。現在, 同社情報技術総合研究所電子システム技術部勤務。長崎大学大学院生産科学研究科社会人コースに在籍。



前川 良二

平 10 京大・工・電子卒。平 12 同大学院情報学研究所修士課程了。同年三菱電機(株)入社。以来, レーダシステムの研究開発に従事。現在, 同社通信機製作所勤務。



亀田 洋志 (正員)

平元山口大・工・電気卒。平 3 九大大学院工学研究科修士課程了。同年三菱電機(株)入社。以来, レーダによる目標追尾に関する研究に従事。現在, 同社情報技術総合研究所勤務。計測自動制御学会会員。



系 正義 (正員)

昭 62 早大・理工・電気卒。平元同大学院修士課程了。同年, 三菱電機(株)入社。平 8~18 同社情報技術総合研究所にてレーダ, 光学センサによる目標追尾の研究開発に従事。現在, 同社鎌倉製作所勤務。博士(工学)。IEEE シニア会員。



小菅 義夫 (正員)

昭 47 早大・理工・数学卒。昭 49 同大学院修士課程了。同年三菱電機(株)入社。以来, 単一センサ及び複数センサによる多目標追尾に関する研究開発に従事。現在, 長崎大学工学部教授。工博。計測自動制御学会, IEEE シニア各会員。