

2周波 ICW を送信波としたバイスタティックレーダによる測位・測速

日原 健人 秋田 学 小菅 義夫 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: hihara.kento@inabalab.ee.ucc.ac.jp

あらまし 安全運転支援システム開発において、電波を用いたレーダ技術の適用が注目されている。そこで当研究室では本システムでの運用を想定した監視用レーダセンサの変調方式として2周波 ICW 方式を提案している。本稿では、上記2周波 ICW レーダと離れた位置に配置した1つの受信局を同期させ、時刻同期した距離和、速度和が計測可能なバイスタティックレーダシステムを構築したので報告する。また基礎実験により、マルチラテレーション時のアンビギュイティ問題をゲーティング処理にて対処することで位置及び速度ベクトルの推定が可能であることを示す。

キーワード バイスタティックレーダ, NN アソシエーション, マルチラテレーション, 2周波 ICW

Target Localization and Velocity Estimation with a Bistatic Radar Using Two Frequency ICW for Transmit Signal

Kento HIHARA Manabu AKITA Yoshio KOSUGE 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: hihara.kento@inabalab.ee.ucc.ac.jp

Abstract In the development of Driving Safety Support Systems (DSSS), applications of Radar technology with radio waves are drawing attention. So, we are proposing Two Frequency Interrupted Continuous Wave as a modulation method of the surveillance Radar sensor. This paper presents development of a Bistatic Radar system which allows measurement of sum of range and sum of velocity at the same time by synchronizing the Two Frequency ICW Radar and one receiver deployed to distantly position. Also, a basic experiment shows that Bistatic Radar system allows estimation of position and velocity vector by addressing ambiguity in Multi-Lateration through the use of gating processing.

Keywords Bistatic Radar, NN Association, Multi-Lateration, Two Frequency ICW

1. まえがき

全天候対応路車協調型の安全運転支援システム開発において、電波を用いたレーダ技術の適用が注目されている。当研究室では、本システムでの運用を想定した監視用レーダセンサの変調方式として2周波 ICW(Interrupted Continuous Wave)方式を提案し、実環境下にて交差点に進入する自動車の検知実験、及び横断歩道内を歩行する複数の人物検知を想定した屋外試験を行い、従来法である2周波 CW方式と比較してその優位性を検証した[1][2]。また従来法の中でも最も一般的な近距離レーダ方式である FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)方式との比較では、ある高さから覆域を見下ろすような設置条件が想定される監視用レーダセンサにおいて、特に静止物をクラッタとして検出しない点で優れていることを確認した。本研

究では、レーダセンサ単体の価格低減を狙い、受信チャンネル数の増加に繋がるアンテナ系に工夫を施した角度計測機能を割愛し、距離、速度（本稿においてドップラを意味する）のみが計測可能である複数のレーダセンサを時刻同期させ活用することによるマルチラテレーションの研究・開発を進めている[3]。本稿におけるマルチラテレーションとは複数のレーダセンサから得られた目標とレーダセンサ間の距離和と速度和を用いて、直角座標系における目標の位置ベクトル、速度ベクトルを算出するものであるが、多目標時のアンビギュイティ対策が課題である。この課題に対し、車載レーダへの応用を想定した FMCW レーダにて、追尾フィルタのゲーティング処理によって対処する方法が提案されている[4]。また、目標追尾によるゲーティング処理でのアソシエーション問題への対処は、FMCW

方式での測距・測速におけるペアリング問題の解消に使われている例もある[5].

本稿では、マルチラテレーションと追尾フィルタを組み合わせたアンビギュイティ解消法の研究を進めていく目的のために、上記2周波ICWレーダと離れた位置に配置した1つの受信局を同期させ、時刻同期した距離和、速度和が計測可能なバイスタティックレーダシステムを構築したので報告する。また本研究の第一段階として、基礎実験にてマルチラテレーション時のアンビギュイティ問題をゲーティング処理にて対処することで、従来のレーダ装置に受信局をただ1つ追加するだけで二次元における位置ベクトルと速度ベクトル、すなわち4つのパラメータの推定が可能であることを示す。

2. マルチラテレーション

本稿におけるマルチラテレーションとは、同時刻に各レーダで得られた目標の距離和と速度和を用いて、直角座標系における目標の位置ベクトル及び速度ベクトルを求める手法である。ここで距離和とは、送信局と目標間の距離と受信局と目標間の距離の和を、速度和とは送信局と目標間の相対速度と受信局と目標間の相対速度の和を指す。

2台のレーダ装置で観測される距離和を R_i 、送信局位置ベクトルを $\mathbf{P}_0 = (x_0 \ y_0)^T$ (既知)、各受信局位置ベクトルを $\mathbf{P}_i = (x_i \ y_i)^T$ (既知)、目標の位置ベクトルを $\mathbf{P}_{tgt} = (x_{tgt} \ y_{tgt})^T$ (推定対象の未知ベクトル) とすると、次式の方程式が成り立つ。ただし、レーダ装置番号を i ($i = 1, 2$)とした。

$$|\mathbf{P}_{tgt} - \mathbf{P}_0| + |\mathbf{P}_{tgt} - \mathbf{P}_i| = R_i \quad (1)$$

式(1)で与えられる2つの方程式(今回は受信局が2つであるため)を解くことによって目標の位置ベクトル \mathbf{P}_{tgt} を推定する。

また、2台のレーダ装置で観測される速度和を V_i とすれば、目標の速度ベクトルを $\mathbf{V}_{tgt} = (Vx_{tgt} \ Vy_{tgt})^T$ (推定対象の未知ベクトル) に関する方程式として次式が成り立つ。ここで、 $\hat{\mathbf{P}}_{tgt}$ は式(1)により推定した目標の位置ベクトルである。

$$\mathbf{V}_{tgt} \cdot \left(\frac{\hat{\mathbf{P}}_{tgt} - \mathbf{P}_0}{|\hat{\mathbf{P}}_{tgt} - \mathbf{P}_0|} + \frac{\hat{\mathbf{P}}_{tgt} - \mathbf{P}_i}{|\hat{\mathbf{P}}_{tgt} - \mathbf{P}_i|} \right) = V_i \quad (2)$$

目標の位置ベクトルを推定するときと同様に、式(2)で与えられる2つの方程式を解くことによって目標の速度ベクトル \mathbf{V}_{tgt} を推定する。ただし、多目標環境下では、マルチラテレーションへ入力する検知データの組み合わせにアンビギュイティが発生し得る。このアンビギュイティ問題について、次章で説明するゲーティング処理によって対処する。

3. ゲーティング処理によるアソシエーション

ゲーティング処理によるアソシエーションを組み合わせたマルチラテレーションの処理概要を図1に示す。本章では図1において一点鎖線で囲った処理ブロックであるゲーティング処理によるアソシエーション、及びその他の処理ブロックである予測値の算出について述べる(破線で囲ったブロックは前章で述べたマルチラテレーションである)。

レーダの観測時間を T としたサンプリング時刻 $t_k = kT$ ($k = 0, 1, 2, \dots$)の各レーダにおける検知データベクトル \mathbf{X}_{idk} 、各レーダに対する予測値ベクトル \mathbf{X}_{ipk} 、目標ごとに紐付けされた観測値ベクトル \mathbf{X}_{ok} 、直角座標系における観測値ベクトル \mathbf{Y}_{ok} 、直角座標系における予測値ベクトル \mathbf{Y}_{pk} を式(3)に定義する。ここで x, y, Vx, Vy はそれぞれ直角座標系における目標の位置ベクトルの x 成分、 y 成分、速度ベクトルの x 成分、 y 成分を表す。また、上付き文字 T は、ベクトルの転置を表す。

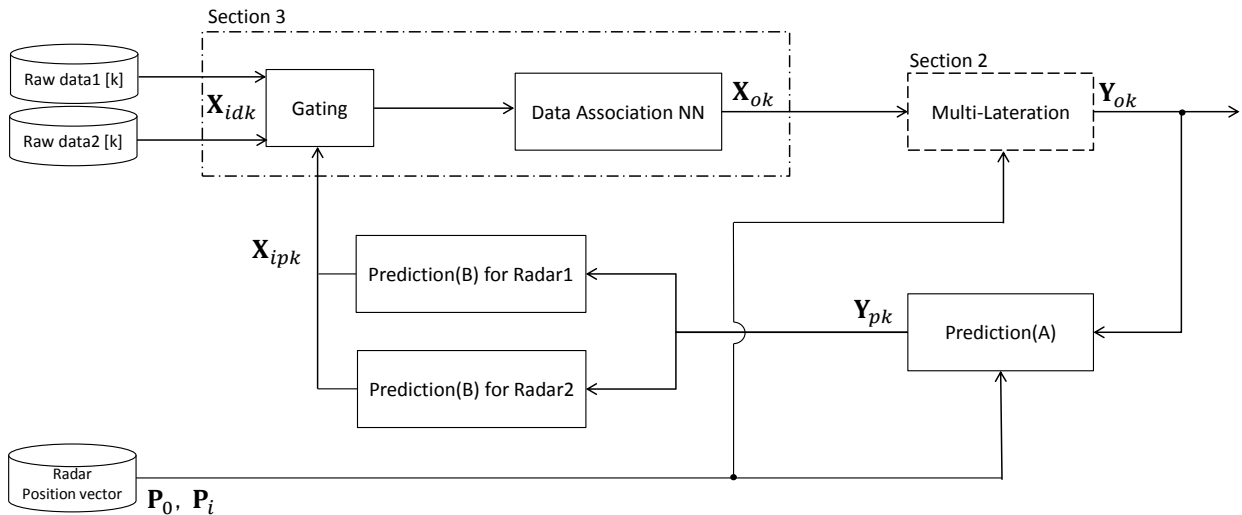


図1 ゲーティング処理によるアソシエーションを組み合わせたマルチラテレーション

以下、図1を用いて処理概要を説明する。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{idk} &= [R_{idk} \ V_{idk}]^T \\ \mathbf{X}_{ipk} &= [R_{ipk} \ V_{ipk}]^T \\ \mathbf{X}_{ok} &= [R_{1ok} \ V_{1ok} \ R_{2ok} \ V_{2ok}]^T \\ \mathbf{Y}_{ok} &= [x_{ok} \ y_{ok} \ Vx_{ok} \ Vy_{ok}]^T \\ \mathbf{Y}_{pk} &= [x_{pk} \ y_{pk} \ Vx_{pk} \ Vy_{pk}]^T \end{aligned} \quad (3)$$

各レーダで得られた観測値に対するゲーティング処理には、前サンプリング時刻 t_{k-1} における観測値ベクトル \mathbf{Y}_{ok-1} を用いて算出したサンプリング時刻 t_k における予測値を使用する。予測値の算出は以下の手順によって行う。

予測値の算出

(A) 直角座標系での予測値

前サンプリング時刻 t_{k-1} の直角座標系における観測値ベクトル \mathbf{Y}_{ok-1} からサンプリング時刻 t_k の直角座標系での予測値ベクトル \mathbf{Y}_{pk} を求める。今回想定する運用におけるサンプリング間隔はデータレートが高いため(後述)、サンプリング時刻 t_{k-1} から t_k の間は等速直線運動を行うと仮定すると、直角座標系での予測値ベクトル \mathbf{Y}_{pk} は式(4)のようになる。

$$\mathbf{Y}_{pk} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{Y}_{ok-1} \quad (4)$$

(B) 各レーダからみた距離和、速度和の予測値

サンプリング時刻 t_k の直角座標系での位置、速度ベクトルの予測値をサンプリング時刻 t_k の各レーダからみた距離和、速度和に対する予測値に変換する。サンプリング時刻 t_k の位置ベクトルの予測値 \mathbf{P}_{pk} を $\mathbf{P}_{pk} = (x_{pk} \ y_{pk})^T$ 、速度ベクトルの予測値 \mathbf{V}_{pk} を $\mathbf{V}_{pk} = (Vx_{pk} \ Vy_{pk})^T$ と定義すると、式(1)、式(2)から次の変換式を得る。

$$\begin{aligned} R_{ipk} &= |\mathbf{P}_{pk} - \mathbf{P}_0| + |\mathbf{P}_{pk} - \mathbf{P}_i| \\ V_{ipk} &= \mathbf{V}_{pk} \cdot \left(\frac{|\mathbf{P}_{pk} - \mathbf{P}_0|}{|\mathbf{P}_{pk} - \mathbf{P}_0|} + \frac{|\mathbf{P}_{pk} - \mathbf{P}_i|}{|\mathbf{P}_{pk} - \mathbf{P}_i|} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

次に式(5)によって算出したサンプリング時刻 t_k における予測値を用いて、以下の手順に従いゲーティング処理及びアソシエーションを行う。

ゲーティング処理

ゲーティング処理は、入力である検知データベクトル \mathbf{X}_{idk} と式(5)を用いて算出した各レーダに対する予測値の距離和、速度和の残差を評価する。全検知データの総数を N_{ik} 、 n_i 番目の検知データベクトルを $\mathbf{X}_{idk,n_i} = [R_{idk,n_i} \ V_{idk,n_i}]^T$ ($n_i = 1, 2, \dots, N_{ik}$)とし、距離和と速度和の残差を次式で定義する。ここで $\sigma_{ri}(R)$ 、 σ_{vi} はそれぞれ、各レーダにおける距離観測雑音の標準偏差(レーダと目標間距離の関数)、速度観測雑音の標準偏差を表し、それらで距離和と速度和の残差を正規化している。

$$D(\mathbf{X}_{idk,n_i}, \mathbf{X}_{ipk}) = \frac{(R_{ipk} - R_{idk,n_i})^2}{\sigma_{ri}(R)^2} + \frac{(V_{ipk} - V_{idk,n_i})^2}{\sigma_{vi}^2} \quad (6)$$

定数 d を設定することでゲート幅を決定し、次式を満足する検知データをサンプリング時刻 t_{k-1} から追尾している目標の観測値の候補とする。

$$D(\mathbf{X}_{idk,n_i}, \mathbf{X}_{ipk}) \leq d \quad (7)$$

NNアソシエーション

本稿では、当研究室で提案した車載レーダにおける多目標追尾処理[7]で採用しているNN(Nearest Neighbor)法を用いたアソシエーションを行う。NNアソシエーションはゲーティング処理後の観測値の候補の中から予測値に最も近い検知データを観測値として採用する相関処理である。ゲート内に存在、すなわち式(7)を満足する検知データの総数を M_{ik} とし、 m_i 番目の検知データのベクトルを $\mathbf{X}_{idk,m_i} = [R_{idk,m_i} \ V_{idk,m_i}]^T$ ($m_i = 1, 2, \dots, M_{ik}$)とし、次式に示すように距離和と速度和の残差が最小となる検知データ番号 \hat{m}_i を探索し、観測値として採用する。

$$\hat{m}_i = \arg \min D(\mathbf{X}_{idk,m_i}, \mathbf{X}_{ipk}) \quad (8)$$

4. バイスタティックレーダ

今回構築したバイスタティックレーダシステムは、送受信を行うレーダ1と、受信のみを行うレーダ2で構成されており、これらのレーダは過去当研究室で開発した実験装置であるソフトウェアレーダ[6]に基づいている。ソフトウェアレーダは、ソフトウェアにて作成した任意ベースバンド波を汎用ベクトル信号発生器にダウンロードし、24GHz帯特定小電力無線規格に準拠したRF部にてup/down-周波数変換および増幅することで各種レーダ変復調方式を送受信することを可能にしている。そのため、今回構築したバイスタティックレーダにおいても同様に各種レーダ変復調方式を送受信することが可能である。

構築したバイスタティックレーダは図2に示す系統図のように、RF部(1)(2)、PSG(Programmable Vector Signal Generator)(1)(2)、SG(RF Signal Generator)(1)(2)、A/D変換器マスター、スレーブからなる。このうち、24[GHz]帯特定小電力無線局規格に準拠しており、送受信局を1つずつ備えたRF部(1)、PSG(1)(2)、SG(1)、A/D変換器マスターで構成される装置をレーダ1、送受信局を終端し受信局を1つ備えたRF部(2)、PSG(1)(2)、SG(2)、A/D変換器スレーブで構成される装置をレーダ2と呼称する。

送受信を行うレーダ1は従来までの構成と同様であり、まず周波数を高速ホッピングさせるためのPSG(1)で作られたIF信号は、SG(1)の信号とミキシングされ24[GHz]帯にアップコンバージョンされる。次に、パ

ルス波やパルス内変調波を作成する PSG(2)からの IF 信号とミキシングされ送信される。一方受信系では、PSG(1)と SG 信号をミキシングした 24[GHz]帯信号でダウンコンバージョンさせる。次に、PSG(2)からの 2[GHz]無変調 IF 信号を用いて I/Q 検波を行う。

受信のみを行うレーダ 2 を構成する機器のうち、PSG(1)及び PSG(2)については、信号をパワーディバイダーにより分配することでレーダ 1 と共有している。なお、分配に使用するケーブルの長さは同一とする。その一方で 23.95[GHz]の信号を出力する SG に関しては、各レーダにおいて個別に使用している。レーダ 2 における SG(2)は、レーダ 1 の受信系における SG(1)の運用と同様に、PSG(1)とのミキシングにより 24[GHz]帯信号を生成し、受信信号のダウンコンバージョンに使用する。そのため、SG(1)と SG(2)の動作は 10[MHz]のリファレンスクロックによって相互に同期をとっている。

ベースバンド化された受信信号は、レーダ 1 では A/D 変換器マスター、レーダ 2 では A/D 変換器スレーブにてデジタル信号として計測される。この時、計測開始トリガの役割を担う Data Head Trigger は、PMSG(2)において 10[MHz]のリファレンスクロックを逡倍、分周して生成・出力され、A/D 変換器マスターへ入力される。A/D 変換器はこの Data Head Trigger を受け、マスター、スレーブ共に同時に動作するため、同時刻の観測データが両レーダにて得られ、マルチラテレーションの前提条件が満たされる。なお、信号波形のジッタを防ぐために、マスター、スレーブそれぞれの A/D 変換器に PMSG(2)から 10[MHz]のリファレンスクロックを分配して入力している。

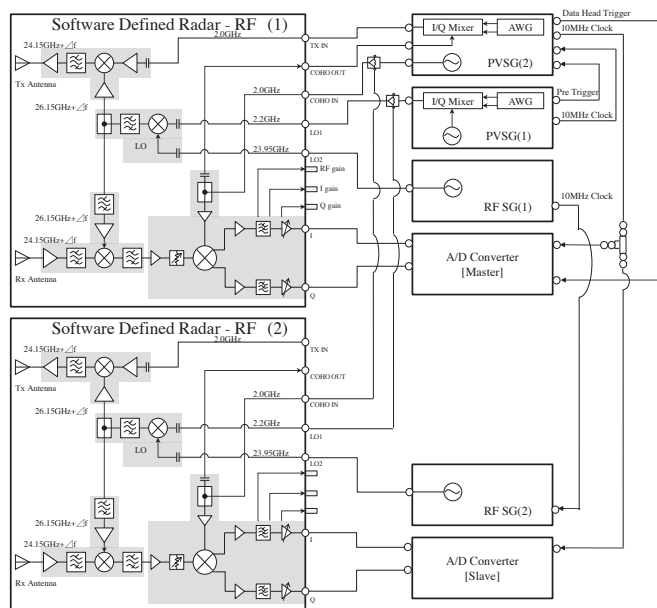


図 2 バイスタティックレーダの系統図

5. 実験

実験のセットアップを図 3 に、目標諸元を表 1 に示す(速度はレーダへ近づく方向を正とした)。本稿では、位置ベクトルの単位を x 成分, y 成分共に[m], 速度ベクトルの単位を x 成分, y 成分共に[km/h]としている。なお、レーダ 1 の送信局の位置ベクトルは(0,0), 受信局の位置ベクトルは(0.07, 0), レーダ 2 の受信局の位置ベクトルは(5.1,-0.1)である。また計測時間は 9 秒であり、目標 1 は計測開始時刻から可動範囲を往復運動、目標 2 は目標 1 が 1 往復半した時刻に奥から手前へと等速運動を始める。

実験で使用した 2 周波 ICW のレーダパラメータ及び期待性能を表 2 に示す。なお、一度の信号処理に 1 観測時間の 3 倍を使用することで速度分解能を向上させている。



図 3 実験のセットアップ

表 1 : 目標諸元

目標	位置ベクトル(可動範囲) [m]	近接時:(0.7, 2.6), 離反時:(0.7, 4.2)
	速度ベクトル [km/h]	(0, ±4)
目標 1	レーダ1からの距離 [m]	近接時:2.7, 離反時:4.3
	レーダ1との相対速度 [km/h]	近接時:±3.8, 離反時:±3.9
	レーダ2からの距離 [m]	近接時:5.2, 離反時:6.2
	レーダ2との相対速度 [km/h]	近接時:±2.0, 離反時:±2.7
	位置ベクトル(可動範囲) [m]	近接時:(2.5, 2.6), 離反時:(2.5, 4.2)
目標 2	速度ベクトル [km/h]	(0, 1)
	レーダ1からの距離 [m]	近接時:3.6, 離反時:4.9
	レーダ1との相対速度 [km/h]	近接時:0.72, 離反時:0.86
	レーダ2からの距離 [m]	近接時:3.7, 離反時:5.0
	レーダ2との相対速度 [km/h]	近接時:0.70, 離反時:0.84

表 2 : レーダパラメータ及び期待性能

送信周波数 [GHz]	24.15
パルス繰り返し間隔 [μ sec]	0.6
周波数ステップ幅 [MHz]	20
パルス幅 [nsec]	50
A/D変換速度 [MHz]	40
観測時間 [msec]	25.2
距離分解能 [m]	-
最大距離視野 [m]	82.5
速度分解能 [km/h]	0.29
最大速度視野 [km/h]	3106

5.1. 距離和及び速度和の推定

レーダ 1 で観測された目標の距離和，速度和を図 4 に，レーダ 2 で観測された目標の距離和，速度和を図 5 に，今回の目標配置から算出した計算値と併せてそれぞれ示す．

まずレーダ 1 で得られた距離和について図 4 から，目標 1 は約 5.4[m]から 8.5[m]の区間を往復運動していることがわかる．表 1 から計算される距離和は 5.4[m]から 8.6[m]となっているため，概ね妥当な観測値であると思われる．目標 2 は計測開始から 4.56 秒後に約 9.8[m]で観測されており，距離和の計算値である 9.8[m]に対して妥当な値が得られた．速度和については，目標 1 は近接時，離反時共に ± 7.69 [km/h]，目標 2 は 1.77[km/h]で観測されており，それぞれの計算値である ± 7.6 [km/h] \sim ± 7.8 [km/h]，1.72[km/h]に対して速度分解能以下の精度で観測されている．次にレーダ 2 で得られた距離和について図 5 から，目標 1 は約 7.8[m]から 10.5[m]の区間を往復運動していることがわかる．距離和の計算値は表 1 から，7.9[m]から 10.5[m]となるので概ね妥当な観測値であると思われる．目標 2 に対しても，計測開始から 4.56 秒後に約 10[m]で観測されており，距離和の計算値 9.9[m]に対して概ね妥当な値が得られたといえる．速度和についてはレーダ 1 と同様に，目標 1 は近接時に ± 5.91 [km/h]，離反時に ± 6.51 [km/h]，目標 2 は 1.77[km/h]で観測されており，それぞれの計算値である ± 5.8 [km/h]から ± 6.6 [km/h]，1.70[km/h]に対して速度分解能以下の精度で観測されている．以上のことから，構築したバイスタティックレーダによって，レーダと目標間の距離和と速度が計測可能であることを示した．なお，今回のセットアップではレーダ照射範囲内に建物等の反射物が存在するが，2 周波 ICW 方式の特性上，それらをクラッタとして検知していない．

5.2. 位置，速度ベクトルの推定

図 4，5 の観測値を入力として，マルチラレーションにより目標の位置，速度ベクトルを推定した．ただし，距離観測雑音の標準偏差と速度観測雑音の標準偏差は，実験により算出した $\sigma_{r1}(R) = 0.112$ [m]， $\sigma_{r2}(R) = 0.219$ [m]， $\sigma_{v1} = 0.161$ [km/h](=0.045[m/s])， $\sigma_{v2} = 0.159$ [km/h](=0.044[m/s])とし， $d = 2$ とした．また，サンプリング間隔は表 2 に示す観測時間であり， $T = 25.2$ [msec]である．ゲーティング処理を行わない場合とゲーティング処理によるアソシエーションにてアンビギュイティ問題を解消した場合の位置ベクトル推定結果を図 6 に，速度ベクトル推定結果を図 7 にそれぞれ示す．

位置ベクトルについて図 6 から，ゲーティング処理を行わない場合には，同一目標に対する観測値の誤っ

た組み合わせにより，マルチラレーションの出力において偽目標が確認できる．これにより，2 目標の航跡の区別がつかず，目標の位置ベクトルが推定出来ていない．また，これら偽目標はレーダ照射範囲内に存在しているため，安全運転支援システムの誤作動に繋がる恐れがある．一方でゲーティング処理によるアソシエーションを行った場合の推定結果では， x 方向の精度があまり良くないものの，(0.7, 2.6)と(0.7, 4.2)を運動する目標 1 の航跡と，(2.5, 4.2)から手前に運動する目標 2 の航跡がおおよそ推定出来ていると言える．推定精度については，マルチラレーションの入力である各レーダでの観測値のばらつきに依存するため，図 4，5 に示したように目標が低速で動いている時に距離和の観測値のばらつきが大きいことが影響していると考えられる．

次に速度ベクトルについて図 7 から，ゲーティング処理を行わない場合には位置ベクトル推定結果と同様，マルチラレーション時のアンビギュイティにより，目標の速度ベクトルの設定値である(0, ± 4)，(0, 1)以外の速度ベクトルが偽目標のものとして推定されている．一方でゲーティング処理によるアソシエーションを行った場合の推定結果では，往復運動する目標 1 の速度ベクトルの変化と，等速運動する目標 2 の速度ベクトルを推定できていることがわかる．

以上から，マルチラレーション時のアンビギュイティ問題をゲーティング処理にて対処することで位置及び速度ベクトルの推定が可能であることを示した．

6. むすび

本稿では，マルチラレーションと追尾フィルタを組み合わせたアンビギュイティ解消法の研究を進めていく目的のために構築したバイスタティックレーダシステムについて報告した．また，2 周波 ICW 方式を送信波とした基礎実験にて，マルチラレーション時のアンビギュイティ問題をゲーティング処理にて対処することで，従来のレーダ装置に受信局をただ 1 つ追加するだけで位置ベクトルと速度ベクトルが可能であることを示した．

この手法によりマルチラレーション時のアンビギュイティ問題はほぼ解決するが，確実な処理ではなく，目標検知数が多い場合や目標の位置関係によってはアソシエーションに誤りが生じることも予想される．今後は安全運転支援システムのための監視用レーダセンサとして，ゲーティング処理を組み合わせたマルチラレーションを採用した 2 周波 ICW 方式レーダの追尾フィルタやアソシエーション法の最適化を図るとともに，FMCW 方式などの従来法と比較した提案法の有効性を定量的に評価していく予定である．

文 献

- [1] T. Inaba, T. Muranaga, I. Jinbo, K. Hihara, S. Ogawa, M. Yamada, and A. Kamemura, "Experimental Study of Infrastructure Radar Modulation for Vehicle and Pedestrian Detection," ITS World congress 2013, Tokyo, Oct. 2013.
- [2] 日原健人, 稲葉敬之, 小川昇平, "安全運転支援システムへの適用を想定した2周波ICW方式レーダによる歩行者分離," 電子情報通信学会総合大会, Mar.2014.
- [3] 稲葉敬之, 千葉勇, "CW波を用いたマルチステイック測位・測速法," 電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J90-B No.3 pp.298-310, Mar.2007.
- [4] Florian Fölster, Hermann Rohling, Urs Lübbert, "An Automotive Radar Network Based On 77GHz FMCW Sensors," Radar Conference, 2005 IEEE International, pp.871-876, May.2005.
- [5] 高林祐樹, 亀田洋志, 特開 2010-256083(2010.11.11)
- [6] 塚田 渉, 植松大貴, 坪田光, 矢野公大, 稲葉敬之, "ソフトウェアレーダの構築と各種レーダ方式の実験的検証", 電子情報通信学会, 信学技報, pp.1-6, Nov.2010.
- [7] 深町弘毅, 渡辺優人, 稲葉敬之, 小菅義夫, "車載レーダにおけるNNアソシエーションを適用した先行車両追尾," 電子情報通信学会, 信学技報, vol.112, No.391, pp.37-42, Jan.2012.

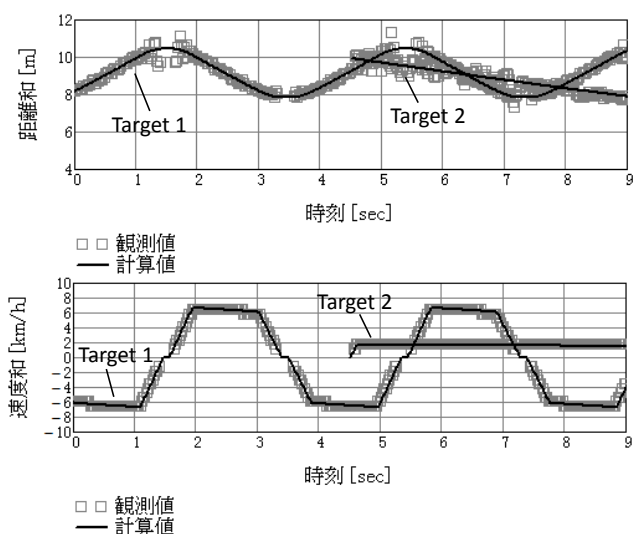


図5 レーダ2で観測された距離和及び速度和
(上図: 距離和の時間推移, 下図: 速度和の時間推移)

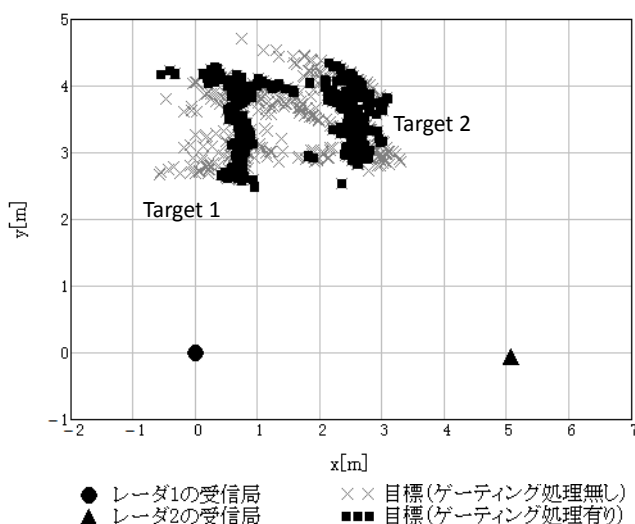


図6 位置ベクトルの推定結果

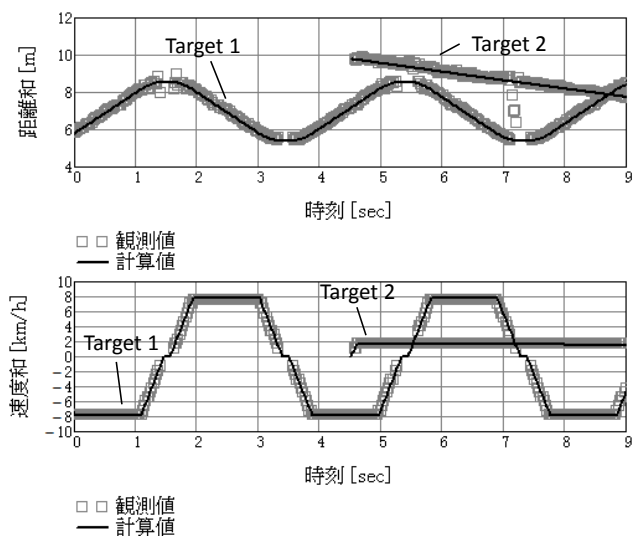


図4 レーダ1で観測された距離和及び速度和
(上図: 距離和の時間推移, 下図: 速度和の時間推移)

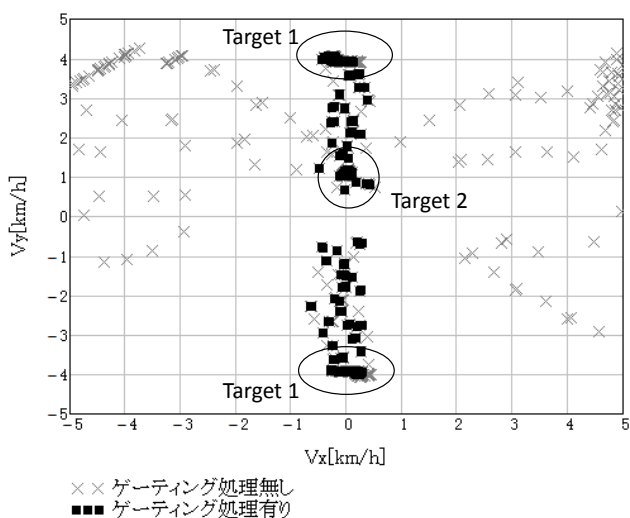


図7 速度ベクトルの推定結果