

一种多元信息辅助的双基地雷达检测跟踪一体化方法

严俊坤^{*①} 王颖萍^① 吕进东^② 邓晓波^③ 刘宏伟^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(中国电子科技集团公司电子科学研究院 北京 100000)

^③(中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所 无锡 214063)

摘要: 该文针对双基地雷达提出一种多元信息辅助的检测跟踪一体化方法。结合雷达在目标跟踪阶段获取的目标位置与回波幅度等多元先验信息,辅助设计跟踪波门内检测门限,以期提升目标的检测与跟踪性能。该文首先根据已获取的目标位置先验信息,在概率数据互联(PDA)框架下基于贝叶斯最小错误准则修正了传统似然比检测器。为进一步提升弱目标探测性能,该文引入航迹终结准则松弛了门限设置规则,并计算了跟踪波门内的平均虚警概率和检测概率。最后,该文重新推导了多元信息辅助情况下PDA算法的关联概率计算方式,完整地给出了算法流程,并通过仿真实验验证了算法的可行性和有效性。

关键词: 双基地雷达; 多元信息辅助; 航迹终结准则

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)04-1236-07

DOI: 10.11999/JEIT220261

An Integrated Detection and Tracking Algorithm Assisted by Multi-information for Bistatic Radar

YAN Junkun^① WANG Yingping^① LÜ Jindong^②
DENG Xiaobo^③ LIU Hongwei^①

^①(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100000, China)

^③(AVIC Leihua Electronic Technology Institute, Wuxi 214063, China)

Abstract: In this paper, an integrated detection and tracking algorithm assisted by multi-information is proposed for bistatic radar. Combining with multiple prior information such as target position and echo amplitude obtained by the radar in the target tracking stage assist in the design of the detection threshold within the tracking gate in order to improve the detection and tracking performance of the target. Firstly, according to the prior information of the acquired target location, the traditional likelihood ratio detector is modified based on the Bayesian minimum error criterion under the framework of Probabilistic Data Association (PDA). In order to improve further the weak target detection performance, the track termination criterion is introduced to relax the threshold setting rules, and the average false alarm probability and detection probability within the tracking gate are rededuced. Finally, the calculation method of the association probability of the PDA algorithm are calculated in the case of multi-information assistance. A complete algorithm flow is given, and the feasibility and effectiveness of the algorithm are verified through simulation experiments.

Key words: Bistatic radar; Multi-information assistance; Track termination criterion

收稿日期: 2022-03-11; 改回日期: 2022-06-17; 网络出版: 2022-06-25

*通信作者: 严俊坤 jkyan@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62071345), 陕西省自然科学基金(2020JQ-297), 中国航空科学基金(201920081002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(62071345), The Natural Science Foundation of Shannxi Province (2020JQ-297), The Aero Science Foundation of China (201920081002)

1 引言

相较于单基地雷达，双基地雷达将发射和接收设备位于不同位置，具有较高的生存和探测等能力^[1,2]，得到国内外广泛的关注和研究^[2]，并且在目标检测跟踪方面具有很大潜力。

为获取目标跟踪状态，传统双基地雷达采用先检测后跟踪的单向信息传递工作框架^[3,4]。在目标跟踪过程中，雷达可获取多元目标先验信息，如果能将这些信息进行合理的反馈与应用，指导雷达设计检测工作参数，目标的检测跟踪性能有望得到提升^[5-7]。文献^[5]在单基地雷达背景下提出了基于贝叶斯准则的检测跟踪一体化算法，该算法耦合贝叶斯检测器与数据关联概率(Probabilistic Data Association, PDA)算法，利用前一时刻跟踪阶段反馈的位置先验信息，修改门限设置方案提升了目标检测跟踪性能，然而该算法以提升虚警概率为改善性能的代价，当跟踪波门较大时，过门限的虚警点数很多，造成计算机过载，因此不适用于雷达探测背景，针对此，文献^[7]研究了一种波门平均虚警概率恒定的贝叶斯检测跟踪一体化算法。

上述算法虽通过优化门限设计，提升了目标的检测跟踪性能，但仍存在以下问题：(1)传统雷达信号处理框架下，虚警概率面向信号处理机的存储和计算等能力设定，为了避免过载，通常取值较低，典型值为 10^{-6} ，容易发生目标丢失的情况。随着信号处理机能力的提升，允许适当降低检测门限以提升目标的检测能力，然而较低的门限会带来过多的虚警导致目标突然消失时航迹不能及时被终结。为此，文献^[8,9]提出航迹终结准则动态地调整波门内平均虚警概率，以保证在航迹正确终结概率恒定的条件下，自适应地调整波门内检测门限的形状和高低，提升目标的检测性能。(2)上述算法的数据关联过程仅使用了目标位置信息，忽略了雷达回波其他有用信息，在数据关联中使用更多的先验信息量，有希望进一步提升算法的性能。因此，文献^[10-12]在检测跟踪一体化算法上引入幅度信息，提出基于贝叶斯检测的幅度信息辅助数据概率互联算法，算法的跟踪性能得到进一步优化。

由于航迹终结准则的引入与多元信息的辅助可大幅提升雷达目标跟踪性能，因此本文将两种技术结合应用于双基地雷达目标跟踪背景，提出了一种基于航迹终结准则的多元信息辅助检测跟踪一体化算法，主要思想是在航迹正确终结概率恒定的条件下，利用目标的位置和幅度等多元信息辅助以提升目标与虚假的区分度，改善系统的探测性能。

2 目标跟踪模型

2.1 目标运动模型

双基地雷达的特性源于将发射和接收设备置于不同位置，在研究问题时，通常考虑双基地雷达和目标位于同一平面内^[13-15]，称之为双基地平面。为了简便分析，考虑目标在双基地平面内做匀速直线运动，运动方程可以表示为

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{u}_{k-1} \quad (1)$$

其中， \mathbf{x}_k 表示 k 时刻目标状态向量， $\mathbf{x}_k = [x_k, \dot{x}_k, y_k, \dot{y}_k]^T$ ， (x_k, y_k) 和 (\dot{x}_k, \dot{y}_k) 分别表示 k 时刻目标位置和速度， \mathbf{F} 为目标状态转移矩阵^[6]， \mathbf{u}_{k-1} 表示 $k-1$ 时刻零均值的高斯过程噪声。

2.2 目标观测模型

图1以发射机和接收机基线为 X 轴，建立平面直角坐标系，展示了双基地雷达对目标的观测模型。

如图1所示，发射机和接收机分别位于 (x_T, y_T) 和 (x_R, y_R) 处，距离为 d ，目标位于 (x, y) 处，速度为 v ， θ_T 和 θ_R 分别是发射机和接收机的天线波束指向角， β 是双基地角， R_T 和 R_R 分别是目标到发射机和接收机的距离，双基地背景下目标的量测为 R_T 与 R_R 之和 r 以及目标的多普勒频移 f_B ，将其定义为波长 λ 归一化的散射信号的总路径长度随时间的变化率^[6]。

假设在 k 时刻，雷达的相关波门内有 m_k 个过门限的观测，可表示为

$$\mathbf{Z}(k) = \left\{ \mathbf{z}_k^j \right\}_{j=1}^{m_k} \quad (2)$$

其中，第 j 个观测 \mathbf{z}_k^j 可表示为

$$\mathbf{z}_k^j = \begin{cases} \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k, & \text{来源于目标} \\ \mathbf{v}_k, & \text{来源于虚警} \end{cases} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)$ 表示目标的观测函数

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}_k) = [r(\mathbf{x}_k), f_B(\mathbf{x}_k)]^T \quad (4)$$

$r(\mathbf{x}_k)$ 和 $f_B(\mathbf{x}_k)$ 分别表示为目标到雷达站的径向距离和以及多普勒频移

$$\left. \begin{aligned} r(\mathbf{x}_k) &= R_T + R_R \\ f_B(\mathbf{x}_k) &= \frac{1}{\lambda} \frac{d}{dt} (R_T + R_R) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

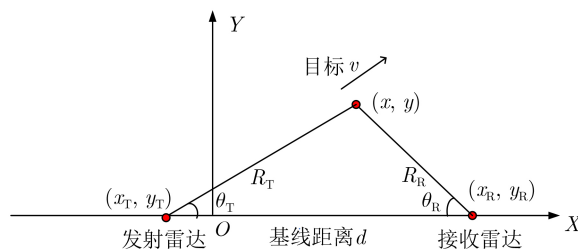


图1 双基地雷达对目标的观测模型

其中, R_T 和 R_R 表达式为

$$\left. \begin{aligned} R_T &= \sqrt{(x_k - x_T)^2 + (y_k - y_T)^2} \\ R_R &= \sqrt{(x_k - x_R)^2 + (y_k - y_R)^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

以及

$$\left. \begin{aligned} \frac{dR_T}{dt} &= \frac{(x_k - x_T)\dot{x}_k + (y_k - y_T)\dot{y}_k}{\sqrt{(x_k - x_T)^2 + (y_k - y_T)^2}} \\ \frac{dR_R}{dt} &= \frac{(x_k - x_R)\dot{x}_k + (y_k - y_R)\dot{y}_k}{\sqrt{(x_k - x_R)^2 + (y_k - y_R)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(3)中, \mathbf{w}_k 表示量测误差, 其协方差为 \mathbf{R}_k , 表示为

$$\mathbf{R}_k = \text{blkdiag}(\sigma_r^2, \sigma_{f_B}^2) \quad (8)$$

其中, $\sigma_r^2, \sigma_{f_B}^2$ 分别为距离与多普勒频率的量测误差, 虚警 \mathbf{v}_k 在波门内服从独立的均匀分布^[17], 其概率分布函数为

$$p(\mathbf{v}_k) = \frac{1}{V_k} \quad (9)$$

其中, V_k 表示 k 时刻相关波门的大小^[18].

3 算法描述

3.1 检测模型

雷达对跟踪波门中各分辨单元的回波信号进行检测, 在 H_0 (回波中只有杂波)和 H_1 (回波中含有目标杂波)两种假设下的概率密度函数为

$$\left. \begin{aligned} H_0 : p(a_k^l | H_0) &= \exp(-a_k^l) \\ H_1 : p(a_k^l | H_1) &= \frac{1}{1 + \rho_k} \exp\left(-\frac{a_k^l}{1 + \rho_k}\right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中, a_k^l 表示 k 时刻第 l 个分辨单元信号的幅度(目标RCS服从Swelling I模型^[14], 且I, Q通道平方律检波后输出为指数分布), ρ_k 表示 k 时刻的信噪比,

传统雷达信号检测通常采用奈曼皮尔逊(Neyman-Pearson, NP)准则^[7]确定检测门限, 门限在波门内是固定的值, 表示为

$$\left. \begin{aligned} a_k^l &\geq \frac{1 + \rho_k}{\rho_k} \ln[(1 + \rho_k)\eta] = \gamma_{\text{NP}} \\ &< \\ H_0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

NP准则的不足之处在于忽略了跟踪器输出的反馈信息, $k-1$ 时刻跟踪器反馈的信息为两种假设下目标预测量测的概率密度函数, 表示为

$$\left. \begin{aligned} p_{H_1}(\mathbf{z}_k^l) &= \mathcal{N}(\mathbf{z}_k^l; \mathbf{z}_{k|k-1}, \mathbf{S}_{k|k-1}) \\ p_{H_0}(\mathbf{z}_k^l) &= 1/V_k \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中, $\mathcal{N}(\mathbf{z}_k^l; \mathbf{z}_{k|k-1}, \mathbf{S}_{k|k-1})$ 表示以量测状态预测值 $\mathbf{z}_{k|k-1}$ 为均值, 预测协方差 $\mathbf{S}_{k|k-1}$ 为协方差矩阵的2维高斯联合概率密度函数在 \mathbf{z}_k^l 处的值。其中 \mathbf{z}_k^l 表

示第 k 时刻第 l 个分辨单元的距离和多普勒量测向量, $\mathbf{S}_{k|k-1} = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T$, 其行列式的值决定了波门的大小^[19], $\mathbf{P}_{k|k-1}$ 为 k 时刻状态预测协方差矩阵, \mathbf{H}_k 表示 k 时刻观测量对目标状态求偏导的雅可比矩阵

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_k &= \frac{\partial h(\mathbf{x}_k)}{\partial \mathbf{x}_k} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial r(\mathbf{x}_k)}{\partial x_k} & \frac{\partial r(\mathbf{x}_k)}{\partial \dot{x}_k} & \frac{\partial r(\mathbf{x}_k)}{\partial y_k} & \frac{\partial r(\mathbf{x}_k)}{\partial \dot{y}_k} \\ \frac{\partial f_B(\mathbf{x}_k)}{\partial x_k} & \frac{\partial f_B(\mathbf{x}_k)}{\partial \dot{x}_k} & \frac{\partial f_B(\mathbf{x}_k)}{\partial y_k} & \frac{\partial f_B(\mathbf{x}_k)}{\partial \dot{y}_k} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial r(\mathbf{x}_k)}{\partial \dot{x}_k} &= 0 \\ \frac{\partial r(\mathbf{x}_k)}{\partial y_k} &= \frac{\dot{x}_k(x_k - y_T)}{R_T} + \frac{\dot{x}_k(x_k - y_R)}{R_R} \\ \frac{\partial r(\mathbf{x}_k)}{\partial y_k} &= \frac{\dot{x}_k(x_k - y_T)}{R_T} + \frac{\dot{x}_k(x_k - y_R)}{R_R} \\ \frac{\partial r(\mathbf{x}_k)}{\partial \dot{y}_k} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

以及

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f_B(\mathbf{x}_k)}{\partial x_k} &= \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\dot{x}_k}{R_T} - \frac{(x_k - x_T)}{R_T^2} \frac{dR_T}{dt} + \frac{\dot{x}_k}{R_R} - \frac{(x_k - x_R)}{R_R^2} \frac{dR_R}{dt} \right) \\ \frac{\partial f_B(\mathbf{x}_k)}{\partial \dot{x}_k} &= \frac{1}{\lambda} \left(\frac{(x_k - x_T)}{R_T} + \frac{(x_k - x_R)}{R_R} \right) \\ \frac{\partial f_B(\mathbf{x}_k)}{\partial y_k} &= \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\dot{y}_k}{R_T} - \frac{(y_k - y_T)}{R_T^2} \frac{dR_T}{dt} + \frac{\dot{y}_k}{R_R} - \frac{(y_k - y_R)}{R_R^2} \frac{dR_R}{dt} \right) \\ \frac{\partial f_B(\mathbf{x}_k)}{\partial \dot{y}_k} &= \frac{1}{\lambda} \left(\frac{(y_k - y_T)}{R_T} + \frac{(y_k - y_R)}{R_R} \right) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

这里结合跟踪器反馈的先验信息式(12), 采用贝叶斯最小错误准则^[20]设置2维联合波门的检测门限, 同时为了保证虚警概率恒定, 引入恒虚警参数 η_{BD} 。以第 l 个分辨单元为例, 门限 $\gamma_{k,\text{BD}}^l$ 为

$$\begin{aligned} \frac{p(a_k(l) | H_1)}{p(a_k(l) | H_0)} &\underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \frac{p_{H_0}(\mathbf{z}_k^l)}{p_{H_1}(\mathbf{z}_k^l)} \eta_{\text{BD}} \\ &\Downarrow \\ a_k^l &\underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \frac{1 + \rho_k}{\rho_k} \ln \left[\frac{(1 + \rho_k) \bar{\eta}_{\text{BD}}}{\mathcal{N}(\mathbf{z}_k^l; \mathbf{z}_{k|k-1}, \mathbf{S}_{k|k-1})} \right] = \gamma_{k,\text{BD}}^l \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $\bar{\eta}_{\text{BD}} = \eta_{\text{BD}}/V_k$, 式(16)表明各分辨单元的门限大小与其距预测中心单元的远近相关, 越近则门限越低, 反之, 则门限越高。

3.2 平均虚警概率和平均检测概率

由式(16)可知, 跟踪波门内门限值随位置变化, 各分辨单元的检测概率和虚警概率不同, 因此需要引入波门内平均检测概率和虚警概率。

(1)平均检测概率的计算

$$P_D^{\text{av}} = \iint_{V_k} P_D(\mathbf{z}_k^l) p_{H_1}(\mathbf{z}_k^l) d\mathbf{z}_{1,k}^l d\mathbf{z}_{2,k}^l$$

$$\stackrel{\zeta = \frac{1+\rho_k}{\rho_k}}{=} \iint_{V_k} \exp\left(-\frac{1}{\rho_k} \ln\left[\frac{(1+\rho_k)\bar{\eta}_{\text{BD}}}{\mathcal{N}(\mathbf{z}_k^l; \mathbf{z}_{k|k-1}, \mathbf{S}_{k|k-1})}\right]\right) \cdot \mathcal{N}(\mathbf{z}_k^l; \mathbf{z}_{k|k-1}, \mathbf{S}_{k|k-1}) d\mathbf{z}_k^l$$

$$= [(1+\rho_k)\bar{\eta}_{\text{BD}}]^{-\frac{1}{\rho_k}} \left(\frac{1}{2\pi\sqrt{|\mathbf{S}_{k|k-1}|}}\right)^{\zeta-1} \cdot \frac{1}{\zeta} \quad (17)$$

其中, $P_D(\mathbf{z}_k^l)$ 表示第 l 个分辨单元的检测概率。由式(17)可以看出检测概率与恒虚警参数, 回波信噪比, 预测协方差等变量相关; 当恒虚警参数越大, 信噪比越高且预测协方差越小时, 检测概率越大。

(2)平均虚警概率的计算

$$P_{\text{FA}}^{\text{av}} = \iint_{V_k} P_{\text{FA}}(\mathbf{z}_k^l) p_{H_0}(\mathbf{z}_k^l) d\mathbf{z}_{1,k}^l d\mathbf{z}_{2,k}^l$$

$$\stackrel{\zeta = \frac{1+\rho_k}{\rho_k}}{=} \iint_{V_k} \exp\left(-\frac{1+\rho_k}{\rho_k} \ln\left[\frac{(1+\rho_k)\bar{\eta}_{\text{BD}}}{\mathcal{N}(\mathbf{z}_k^l; \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}, \mathbf{S}_{k|k-1})}\right]\right) \cdot \frac{1}{V_k} d\mathbf{z}_k^l$$

$$= \frac{1}{V_k} [(1+\rho_k)\bar{\eta}_{\text{BD}}]^{-\zeta} \left(\frac{1}{2\pi\sqrt{|\mathbf{S}_{k|k-1}|}}\right)^{\zeta-1} \cdot \frac{1}{\zeta} \quad (18)$$

其中, $P_{\text{FA}}(\mathbf{z}_k^l)$ 表示第 l 个分辨单元的虚警概率。式(18)表明, 在波门平均虚警概率 $P_{\text{FA}}^{\text{av}}$ 已知的条件下, 可以获取 $\bar{\eta}_{\text{BD}}$, 进而求取检测门限和平均检测概率。

3.3 航迹终结准则

虽然降低门限可提升系统的检测性能, 但门限过低会带来较多虚警, 当目标突然消失时, 航迹不能及时终结。本节引入航迹终结准则, 通过随跟踪波门大小动态变化的平均虚警概率控制门限整体的高低以保证在航迹正确终结概率恒定的条件下, 提升目标的检测性能。航迹终结准则如下: 如果跟踪波门在连续 M 个采样时刻内没有有效观测, 那么将该目标航迹删除。由此建立起航迹正确终结概率 P_{F} 和帧虚警概率 P_{Z} 的关系式^[8,9]

$$P_{\text{F}} = (1 - P_{\text{Z}})^M \quad (19)$$

根据帧虚警概率 P_{Z} 可以获取2维跟踪波门内平均虚警概率 $P_{\text{FA}}^{\text{av}}$, 其中 N 表示分辨单元总个数。

$$P_{\text{Z}} = 1 - (1 - P_{\text{FA}}^{\text{av}})^N \quad (20)$$

当航迹终结概率已知时, 通过式(19)和式(20)可得平均虚警概率 $P_{\text{FA}}^{\text{av}}$, 进而获取波门内的检测门限。

3.4 多元信息辅助数据关联

传统PDA算法仅使用了目标的运动状态信息对波门内有效量测进行数据关联, 关联概率表达式为

$$\beta_k(i) = \begin{cases} c \frac{(1-P_D)\lambda}{P_D} \sqrt{|2\pi\mathbf{S}_{k|k-1}|}, i=0 \\ c e^{-1(1/2)\mathbf{v}_k^T(\theta)\mathbf{S}_{k|k-1}^{-1}\mathbf{v}_k(\theta)}, 1 \leq i \leq m_k \end{cases} \quad (21)$$

其中, $\beta_k(i)$ 当 $i=0$ 时表示 k 时刻没有量测来源于目标的概率, $i \neq 0$ 表示第 i 个量测来源于目标概率, c 是使得 $\sum_{i=0}^{m_k} \beta_k(i) = 1$ 的常数。由式(21)可知PDA算法在数据关联中, 舍弃了量测点迹的幅度信息, 造成回波信息的损失。针对此, 本节在数据关联过程中引入幅度信息辅助, 研究了一种多元信息辅助的双基地检测跟踪一体化算法, 以提高数据关联的正确性, 从而提升系统性能。该算法的跟踪滤波器与PDA算法基本相同, 差异在于增加了目标位置先验信息与回波幅度同时辅助跟踪过程, 关联概率发生了改变, 接下来推导多元信息辅助情况下的数据关联概率。

首先贝叶斯检测框架下过门限虚假点迹的数量仍服从泊松分布^[5], 此时波门内虚警密度需要由平均虚警概率求解, 同时式(21)中检测概率需要用平均检测概率代替, 对关联概率做出修正为

$$\beta_k(i) = \begin{cases} c 2\pi \sqrt{|\mathbf{S}_{k,k-1}|} e^{-\eta} \left[e^{-\eta} - \frac{\rho}{1+\rho} \right], i=0 \\ c, i=1, 2, \dots, m_k \end{cases} \quad (22)$$

其中 η 表示为

$$\eta = \frac{1}{\rho_k} \ln \left(2\pi \sqrt{|\mathbf{S}_{k,k-1}|} (1+\rho_k) \right) \bar{\eta}_{\text{BD}} \quad (23)$$

此外由于幅度信息的引入, 需要计算波门内每个有效量测的幅度似然比 $l_k^a(i)$, 表示为

$$l_k^a(i) = \frac{P_{\text{FA}}(i) p(a_k^l | H_1)}{P_D(i) p(a_k^l | H_0)}$$

$$= e^{-1/2\mathbf{v}_i^T \mathbf{S}_{k|k-1}^{-1} \mathbf{v}_i + (\rho_k/(\rho_k+1))\eta} \cdot \frac{1}{\rho_k + 1} e^{(\rho_k/(\rho_k+1))a_k(i)} \quad (24)$$

其中, $P_{\text{FA}}(i)$ 和 $P_D(i)$ 分别表示量测 i 所在单元的虚警概率和检测概率, $a_k(i)$ 表示 k 时刻第 i 个有效量测的幅度大小, 根据 $l_k^a(i)$ 对式(22)中数据关联概率加权, 最终获得多元信息辅助的数据关联概率

$$\beta_k(i) = \begin{cases} c(1 + \rho_k) \lambda \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_k + 1}} \left[\left(\frac{1 + \rho_k}{\rho_k} \right) - e^{-\eta} \right], & i = 0 \\ c\mathcal{N}(z_k^i; z_{k|k-1}, S_{k|k-1}) e^{(\rho_k/(\rho_k+1))\alpha_k(i)}, & i = 1, 2, \dots, m_k \end{cases} \quad (25)$$

图2为本文所提算法的流程图，其中 $\hat{X}(k|k)$ 和 $\hat{X}(k|k-1)$ 分别表示 k 时刻目标状态值和预测值， $P(k|k)$ 和 $P(k|k-1)$ 分别表示 k 时刻目标的状态协方差和预测协方差， $K(k)$ 表示卡尔曼矩阵，用来修正时刻目标的预测值。

4 仿真实验与结果分析

假设目标在发射雷达和接收雷达所在的直角坐标系内做匀速直线运动，场景如图3所示。目标的初始位置在(2, 2) km处，速度为(70, 70) m/s，发射雷达位于(0, 0) km，接收雷达位于(10, 0) km，假设共有 $M = 20$ 帧数据，雷达发射信号的有效带宽为5 MHz；信号波长为1 m；采样间隔为1 s；相关波门系数为8；过程噪声的功率为0.1；蒙特卡罗次数为200次；初始信噪比设定为12 dB。

为了验证本文提出算法性能，主要对比以下4种算法：

- (1)算法1：贝叶斯准则下的检测跟踪一体化算法，虚警概率设为 10^{-4} ；
- (2)算法2：在算法1基础上引入幅度信息辅助，虚警概率设为 10^{-4} ；
- (3)算法3：航迹终结准则下的贝叶斯检测跟踪

一体化算法，设航迹正确终结概率为90%，采用的航迹终结准则为：如果跟踪波门在连续3个采样时刻内没有有效观测，那么将该目标航迹删除；

(4)算法4：在算法3基础上引入幅度信息辅助。

图4给出了4种算法的检测概率对比图，结果显示引入幅度信息辅助的算法4和算法2，其检测概率大于未引入的算法1和算法3，这是由于幅度信息的引入提升了量测与航迹的正确关联概率，从而使得预测较为准确，且预测协方差变小能够提高目标的检测性能。同时随着先验信息的积累，检测性能提升效果也逐渐明显。而航迹终结准则通过合理降低检测门限提升了目标的检测性能；由于采用的航迹终结准则为：如果跟踪波门在连续3个采样时刻内没有有效观测，那么将该目标航迹删除，故算法1和算法3在前两帧的检测概率相同。

图5以某时刻为例，给出了算法1和算法3在不同分辨单元的检测门限示意图，以进一步地说明航迹终结准则对波门平均检测概率的改善。由于波门边缘距离预测中心较远，因此该区域的门限值很高，无论是虚警还是目标信号一般都不太可能超过门限，为了使图形直观，将其固定为一个较大的值，图中红色部分代表目标信号，由结果可知采用航迹终结准则相比于波门恒虚警准则降低了波门内检测门限，从而提高了目标的检测概率。

为了衡量本文所提算法的跟踪性能，定义目标距离状态的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为指标，表示为

$$RMSE_k = \sqrt{\frac{1}{N_{TM}} \sum_{j=1}^{N_{TM}} \left[(x_k - \hat{x}_k^j)^2 + (y_k - \hat{y}_k^j)^2 \right]} \quad (26)$$

其中， $(\hat{x}_k^j, \hat{y}_k^j)$ 表示第 j 次仿真实验目标所在位置的

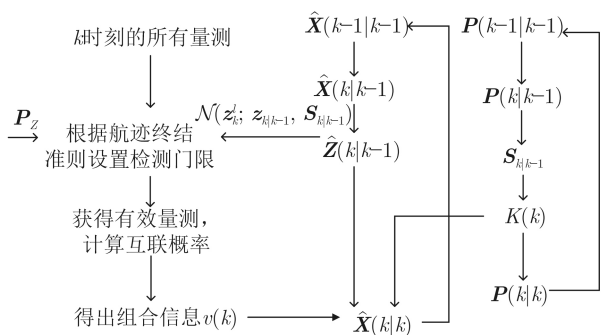


图2 算法流程图

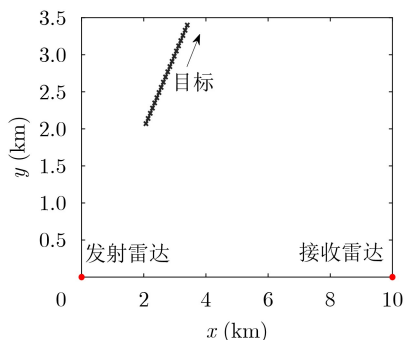


图3 雷达与目标的空间位置关系

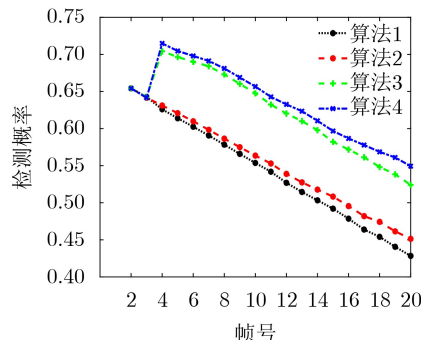


图4 检测概率对比图

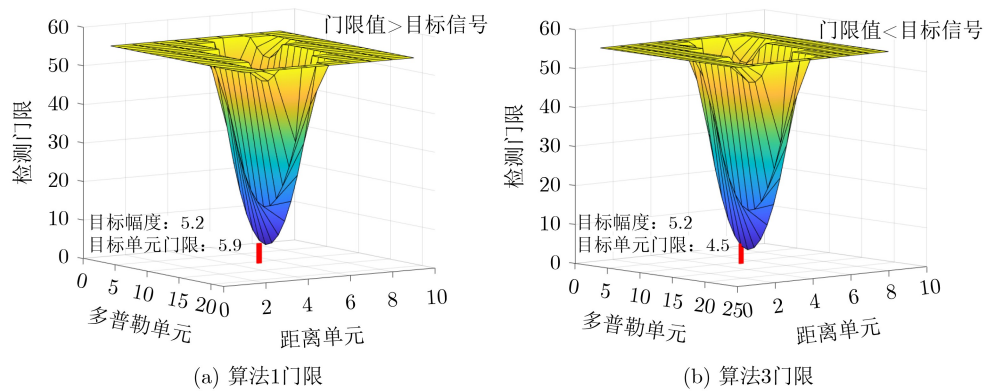


图5 检测门限

估计值， N_{TM} 表示未发散航迹的个数。本文将第 j 次蒙特卡罗实验的航迹发散条件定义为

$$\sum_{k=1}^M \sqrt{(x_k^j - x_k)^2 + (y_k^j - x_k)^2} > \sum_{k=1}^M \text{Tr} \left[(\mathbf{H}_k^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{H}_k)^{-1} \right] \quad (27)$$

式(27)表示的物理意义为：当目标跟踪的估计误差大于量测提供的平均定位精度时，该航迹发散。

图6给出了4种算法的RMSE对比图，可以看出随着探测过程的进行，目标的跟踪精度明显变好，并趋于稳定，同时由于信噪比逐渐下降，导致量测误差变大，因此在探测后期，跟踪精度稍有上升。4种算法在第10~20帧RMSE平均值分别为27.58, 22.10, 22.60, 19.04。算法2的跟踪性能优于算法1，验证了引入多元信息辅助可以改善系统的跟踪性能；算法3的跟踪性能优于算法1，验证了航迹终结准则能提升目标的检测概率，进一步改善系统对目标的跟踪性能；算法4跟踪精度最好，其相对于算法1跟踪性能约提升了31%。验证了多元信息辅助与航迹终结准则的融合能大幅度提升目标的跟踪性能。

5 结束语

本文针对双基地雷达提出了一种基于多元信息

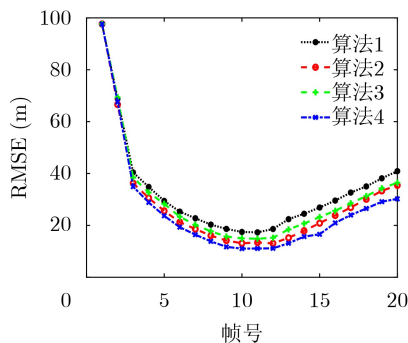


图6 RMSE对比图

辅助的检测跟踪一体化算法。首先在双基探测背景下根据目标的跟踪信息建立预测波门，依据航迹正确终结概率计算波门平均虚警概率，并结合雷达在跟踪阶段获取的目标位置先验信息辅助计算波门内的门限；之后利用多元信息辅助的概率数据互联算法对波门内有效量测进行数据关联，进而滤波估计更新目标航迹，最终完成检测跟踪一体化过程。实验表明，本文算法能够有效地提高目标的检测跟踪性能。

参考文献

- [1] 王亚莉, 贾宏进. 双基地雷达性能分析及作战应用研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(9): 77-80,89. doi: 10.3969/j.issn.1672-9730.2019.09.018.
WANG Yali and JIA Hongjin. Research on performance analysis and combat application of bistatic radars[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, 39(9): 77-80,89. doi: 10.3969/j.issn.1672-9730.2019.09.018.
- [2] CHEN Gang and WANG Jun. Target detection method in passive bistatic radar[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2020, 31(3): 510-519. doi: 10.23919/JSEE.2020.000021.
- [3] GOKCE M and KUZUOGLU M. Unscented Kalman filter-aided Gaussian sum filter[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(5): 589-599. doi: 10.1049/iet-rsn.2014.0088.
- [4] WILLETT P, NIU R, and BAR-SHALOM Y. Integration of Bayes detection with target tracking[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(1): 17-29. doi: 10.1109/78.890334.
- [5] ZHENG Le, ZENG Tao, LIU Quanhua, et al. Optimization and analysis of PDAF with Bayesian detection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(4): 1986-1995. doi: 10.1109/TAES.2016.150176.
- [6] 严俊坤, 刘红亮, 戴奉周, 等. 一种具有恒虚警性质的检测跟踪联合处理算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(11): 2666-2671. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01925.

- YAN Junkun, LIU Hongliang, DAI Fengzhou, *et al.* Joint detection and tracking processing algorithm with constant false alarm rate property[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(11): 2666–2671. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01925](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01925).
- [7] SUN Hao, LI Ming, ZUO Lei, *et al.* Joint threshold optimization and power allocation of cognitive radar network for target tracking in clutter[J]. *Signal Processing*, 2020, 172: 107566. doi: [10.1016/j.sigpro.2020.107566](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2020.107566).
- [8] GUAN Yongsheng and WANG Yingping. Joint detection and tracking scheme for target tracking in moving platform[C]. 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20), Florence, Italy, 2020: 1–4. doi: [10.1109/RadarConf2043947.2020.9266495](https://doi.org/10.1109/RadarConf2043947.2020.9266495).
- [9] 刘红亮, 周生华, 刘宏伟, 等. 一种航迹恒虚警的目标检测跟踪一体化算法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(5): 1072–1078. doi: [10.11999/JEIT150638](https://doi.org/10.11999/JEIT150638).
- LIU Hongliang, ZHOU Shenghua, LIU Hongwei, *et al.* An integrated target detection and tracking algorithm with constant track false alarm rate[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(5): 1072–1078. doi: [10.11999/JEIT150638](https://doi.org/10.11999/JEIT150638).
- [10] YAN Junkun, PU Wenqiang, ZHOU Shenghua, *et al.* Collaborative detection and power allocation framework for target tracking in multiple radar system[J]. *Information Fusion*, 2020, 55: 173–183. doi: [10.1016/j.inffus.2019.08.010](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.08.010).
- [11] 刘红亮, 陈超, 岳凯. 基于跟踪信息的多帧联合检测方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(8): 2124–2128. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2021.08.13](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2021.08.13).
- LIU Hongliang, CHEN Chao, and YUE Kai. Multi-frame joint detection method based on tracking information[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(8): 2124–2128. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2021.08.13](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2021.08.13).
- [12] 王峰, 邢雷, 梁彦, 等. 知识辅助的贝叶斯检测联合跟踪框架与方法[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2019, 14(4): 381–386. doi: [10.1109/7.210086](https://doi.org/10.1109/7.210086).
- LERRO D and BAR-SHALOM Y. Interacting multiple model tracking with target amplitude feature[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29(2): 494–509. doi: [10.1109/7.210086](https://doi.org/10.1109/7.210086).
- [13] 吴丽丝. 基于知识的目标跟踪理论与应用研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2019: 45–50.
- WU Lisi. Research on the theory and application of target tracking based on knowledge[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2019: 45–50.
- [14] 刘君伟. 岸/船双基地地波雷达目标跟踪方法研究[D]. [硕士学位论文], 内蒙古大学, 2021: 8–21.
- LIU Junwei. Research on target tracking method for coast/ship bistatic high frequency surface wave radar[D]. [Master dissertation], Inner Mongolia University, 2021: 8–21.
- [15] 程丰, 湛兰, 卢一帆. 基于双基地雷达探测的跟踪优化建模仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2015, 32(6): 13–17. doi: [10.3969/j.issn.1006-9348.2015.06.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2015.06.004).
- CHENG Feng, ZHAN Lan, and LU Yifan. Modeling and simulation of track optimization based on bistatic radars detection[J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(6): 13–17. doi: [10.3969/j.issn.1006-9348.2015.06.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2015.06.004).
- [16] 王峰, 邢雷, 梁彦, 等. 知识辅助的贝叶斯检测联合跟踪框架与方法[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2019, 14(4): 381–386. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2019.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2019.04.009).
- WANG Feng, XING Lei, LIANG Yan, *et al.* A knowledge-aided framework and method of Bayesian joint detecting and tracking[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2019, 14(4): 381–386. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2019.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2019.04.009).
- [17] ASLAN M S and SARANLI A. Threshold optimization for tracking a nonmaneuvering target[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(4): 2844–2859. doi: [10.1109/TAES.2011.6034668](https://doi.org/10.1109/TAES.2011.6034668).
- [18] YAN Junkun, LIU Hongwei, PU Wenqiang, *et al.* Joint threshold adjustment and power allocation for cognitive target tracking in asynchronous radar network[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(12): 3094–3106. doi: [10.1109/TSP.2017.2679693](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2679693).
- [19] YAN Junkun, LIU Hongwei, JIU Bo, *et al.* Joint detection and tracking processing algorithm for target tracking in multiple radar system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(11): 6534–6541. doi: [10.1109/JSEN.2015.2461435](https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2461435).
- [20] 陈林. 多基地雷达检测跟踪联合处理方法研究[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2018: 29–56.
- CHEN Lin. Study on joint detection and tracking methods for multistatic radar system[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2018: 29–56.
- 严俊坤: 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为单站雷达智能信号处理、网络化雷达协同探测等.
- 王颖萍: 女, 硕士生, 研究方向为信号与信息处理.
- 吕进东: 男, 硕士, 研究方向为信号与信息处理.
- 邓晓波: 男, 博士, 研究员, 研究方向为雷达系统、综合监视系统、信号与信息处理等.
- 刘宏伟: 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为雷达目标分类与识别、认知网络、网络化协同探测等.