

一种航迹恒虚警的目标检测跟踪一体化算法

刘红亮* 周生华 刘宏伟 严俊坤

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

(西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心 西安 710071)

摘要: 对于传统雷达系统, 目标检测和跟踪通常被看作是两个独立的过程。然而, 在跟踪阶段, 可以获得目标位置信息(跟踪信息), 将该信息反馈至目标检测器将有助于提升检测性能。为此, 该文提出一种航迹恒虚警的目标检测跟踪一体化算法。首先根据目标跟踪信息和目标运动模型, 建立预测波门; 然后按照给定的航迹虚警概率, 计算帧虚警概率, 即预测波门内至少出现一个虚警的概率; 最终根据帧虚警概率调整预测波门内的检测门限, 完成目标检测过程。仿真实验表明, 该算法可以大大提高目标检测概率, 推远目标跟踪距离, 同时也可以保证目标突然消失时航迹能够以较高的概率结束。

关键词: 目标检测; 目标跟踪; 跟踪信息; 航迹恒虚警

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)05-1072-07

DOI: 10.11999/JEIT150638

An Integrated Target Detection and Tracking Algorithm with Constant Track False Alarm Rate

LIU Hongliang ZHOU Shenghua LIU Hongwei YAN Junkun

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

(Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding at Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: For traditional radar systems, target detection and target tracking are usually conducted separately. However, at the tracking stage, the target location information (tracking information) can be obtained, which can be fed back to the target detector to improve detection performance. Therefore, in this paper, an integrated detection and tracking algorithm with constant track false alarm rate is proposed. Firstly, a predicted gate is established according to the tracking information and target dynamic model. Then according to a prescribed track false alarm rate, the frame false alarm rate, i.e., the probability that there exists at least one false alarm in the predicted region, is calculated. Finally, detection thresholds in the predicted region are adjusted according to the frame false alarm rate, and target detection process is accomplished. Simulation results indicate that the proposed algorithm can significantly improve target detection probability and extend the tracking distance, and meanwhile it can guarantee that the target track can be terminated with a high probability when the target disappears suddenly.

Key words: Target detection; Target tracking; Tracking information; Constant track false alarm rate

1 引言

目标检测^[1]和目标跟踪^[2]是雷达系统的两个重要组成部分。目标检测的任务主要是对雷达接收到

的回波信号进行处理, 最终对目标的有无做出二元判决。一旦被检测到存在目标, 其位置信息将送至目标跟踪器进行跟踪滤波处理, 以获得更高精度的目标运动参数估计(通常包括目标位置, 速度等)。在传统的信号处理框架下^[3], 信息是单向传递的, 即首先进行检测, 而后将检测结果送至雷达跟踪器。因此, 目标检测性能直接影响着目标跟踪性能, 如果目标回波信噪比较低, 其较差的检测性能可能会导致雷达连续多次扫描均不存在与目标航迹关联的量测, 误导跟踪系统过早地宣布目标航迹结束。检测前跟踪(TBD)算法^[4,5]可以有效提高微弱目标的探

收稿日期: 2015-06-01; 改回日期: 2016-01-29; 网络出版: 2016-03-29

*通信作者: 刘红亮 hllixidian@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(61401329, 61271291, 61201285), 国家杰出青年科学基金(61525105), 中国博士后科学基金(2015M580817)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61401329, 61271291, 61201285), The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (61525105), The Postdoctoral Science Foundation of China (2015M580817)

测性能，它将雷达多次扫描得到的回波数据进行联合处理，对可能来自同一个目标的回波能量进行非相干积累，从而提高目标回波信噪比，获得较高的探测性能，然而 TBD 算法的计算量通常较大，不利于工程实现。

当目标航迹起始^[2]之后，我们可以获得目标的跟踪信息，将该信息反馈至目标检测器将有助于提高目标检测性能。基于跟踪信息，我们可以预测目标下一时刻可能出现的区域(预测波门)，一种直接的方法是降低预测区域内的检测门限。然而，过低的检测门限将会造成过多的虚警，一旦目标突然消失，目标航迹将不能迅速结束，甚至以虚假航迹的方式继续存在，造成雷达功率资源^[6,7]的浪费。本文的出发点在于，如何利用跟踪信息提高目标检测性能，同时保证当目标突然消失时航迹能够迅速地结束。

利用目标跟踪信息的核心在于如何调整预测波门内的检测门限，目前已有许多文献围绕概率数据互连滤波器^[8,9]讨论如何利用目标跟踪信息提高目标检测性能。文献[10]首次提出了利用跟踪信息优化检测门限的问题，并针对概率数据互联滤波器，通过优化滤波器的状态估计协方差矩阵求解出最优检测门限。在文献[10]的基础上，文献[11]和文献[12]提出了不同的方法以获得了滤波器的状态估计协方差矩阵的递推形式。文献[13]将上述协方差矩阵递推方法看作是跟踪滤波器的一种非仿真性质的性能预测(NSPP)，并且在 Neyman-Pearson(NP)准则下给出了最优检测门限的闭式解。文献[14]和文献[15]分别针对机动目标和非机动目标研究了检测门限优化问题。不同于上述检测门限优化策略，文献[16]在概率数据互联滤波器的基础上，通过利用滤波器反馈的跟踪信息，在贝叶斯准则^[1]下提出了一种贝叶斯检测器。文献[17]在文献[16]中贝叶斯检测器的基础上提出了一种跟踪波门内平均虚警概率恒定的检测器。

虽然上述检测门限调整方法可以达到降低检测门限的效果，但是它们所面临的共同的问题是：一旦目标突然消失，比如目标飞离雷达监视区域，此时过低的检测门限将会造成过多的虚警，从而导致目标航迹不能够及时结束，造成雷达资源的浪费。针对上述问题，本文首次引入了航迹虚警概率的概念，它指的是在跟踪阶段目标突然消失时，航迹撤销逻辑不能正确结束目标航迹的概率。在此基础上，本文提出了一种航迹恒虚警的目标检测跟踪一体化算法。传统检测器的恒虚警指的是，雷达针对单个分辨单元进行检测时产生虚警的概率保持恒定，是点迹层面的恒虚警，而航迹恒虚警概念可理解为航迹层面的恒虚警。算法的基本思想是，根据目标跟

踪信息，在航迹虚警概率恒定的条件下降低预测波门内的检测门限，从而提高目标探测性能。具体而言，首先根据目标跟踪信息建立预测波门；然后根据航迹虚警概率计算预测波门内出现虚警的概率(帧虚警概率)；根据帧虚警概率，计算预测波门内的检测门限并完成目标检测过程。与 TBD 算法不同，本文所提算法在传统检测跟踪处理框架下，针对雷达单次扫描得到的回波数据，通过利用目标跟踪信息，降低预测区域内的检测门限，从而提高目标的探测性能。此外，本文所提算法可以直接计算出预测区域内的虚警概率，然后根据所用检测算法便可得到预测区域内的检测门限，因此本文所提算法实现起来更为简便，具有较高的工程可实现性。仿真试验表明，算法可以大大提高目标检测性能，扩展目标跟踪距离。与此同时，当目标突然消失时，目标航迹也能以较高的概率结束，避免了虚假航迹的延续。

2 问题描述

2.1 雷达目标检测模型

雷达目标检测模型可以表示为如式(1)的二元假设判决问题^[1]：

$$\lambda \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \eta \quad (1)$$

其中， λ 表示检测统计量， H_1 表示目标存在假设， H_0 表示目标不存在假设， η 表示检测门限。根据式(1)可以得到虚警概率的表达式：

$$P_f = \int_{\eta}^{+\infty} p(\lambda | H_0) d\lambda \quad (2)$$

其中， $p(\lambda | H_0)$ 表示假设 H_0 条件下检测统计量 λ 的概率密度函数。实际中，雷达目标检测过程通常针对不同的分辨单元进行，此处我们将每个检测单元的虚警概率称为单元虚警概率。

2.2 雷达目标跟踪模型

假设目标的运动模型^[2]为

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}_{k|k-1}(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{v}_{k|k-1} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^{n_x \times 1}$ 表示第 k 时刻目标的状态向量，通常包含目标的位置、速度等信息， $\mathbf{f}_{k|k-1}(\cdot)$ 表示第 $k-1$ 时刻至第 k 时刻的目标状态转移函数， \mathbf{x}_{k-1} 表示第 $k-1$ 时刻目标的状态向量， $\mathbf{v}_{k|k-1}$ 表示第 $k-1$ 时刻至第 k 时刻的过程噪声。

假设目标的观测模型^[2]为

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k \quad (4)$$

其中， $\mathbf{z}_k \in \mathbb{R}^{n_z \times 1}$ 表示第 k 时刻目标的量测数据，通常包含目标的距离、角度等信息， $\mathbf{h}_k(\cdot)$ 表示第 k 时刻的目标量测函数， \mathbf{w}_k 表示第 k 时刻目标的量测噪

声, 并假设过程噪声与观测噪声相互独立。

当雷达站完成航迹起始之后, 根据式(3)和式(4), 存在许多跟踪算法^[2]可以提供目标的状态估计(跟踪信息)。传统的雷达信号处理框架下, 雷达目标检测器的虚警概率一直是按照搜索期间的要求设定的, 通常都比较低, 典型取值为 10^{-6} 。一旦系统已经完成航迹起始, 我们可以确定目标的存在, 将跟踪信息反馈至目标检测器将有利于提高目标探测性能。根据当前时刻的目标状态信息以及目标运动模型可以预测下一时刻目标可能出现的区域, 此时目标可能出现的区域已经由搜索期间的全空域缩小为目标预测波门, 如果雷达检测器仍采用搜索期间设定的虚警概率将会显得过于苛刻, 我们可以适当调整预测波门内的检测门限, 同时兼顾航迹虚警概率, 保证目标突然消失时航迹能够迅速结束。我们将上述探测框架称之为检测跟踪一体化处理框架, 具体工作流程如图1所示。

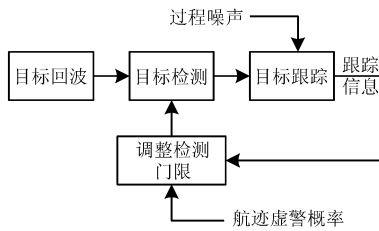


图1 检测跟踪一体化处理框架

3 算法描述

根据目标跟踪信息, 可以预测目标下一时刻出现的位置区域, 即预测波门。设第 $k-1$ 时刻目标状态估计值和估计协方差矩阵分别为 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$ 和 $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$, 则根据第 $k-1$ 时刻的目标状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$, 可以计算第 k 时刻的目标状态预测值:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{f}_{k|k-1}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}) \quad (5)$$

根据第 $k-1$ 时刻的目标状态估计协方差矩阵 $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$, 计算第 k 时刻的目标状态预测协方差矩阵:

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k|k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_{k|k-1}^T + \mathbf{Q}_{k|k-1} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{F}_{k|k-1}$ 表示目标状态转移函数 $\mathbf{f}_{k|k-1}(\cdot)$ 的雅可比矩阵, $\mathbf{Q}_{k|k-1}$ 表示第 $k-1$ 时刻至第 k 时刻的过程噪声协方差矩阵。

将目标状态预测信息转换至量测空间, 其对应的量测预测值为

$$\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} = \mathbf{h}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (7)$$

量测预测协方差矩阵为

$$\mathbf{D}_{k|k-1} = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k \quad (8)$$

其中, \mathbf{H}_k 表示第 k 时刻目标量测函数 $\mathbf{h}_k(\cdot)$ 的雅可比

矩阵, \mathbf{R}_k 表示第 k 时刻量测协方差矩阵。

通常量测数据是在检测结果的基础上经过参数估计得到的, 因此检测空间和量测空间是一一对应的, 例如距离和方位角构成的极坐标空间。令 \mathbf{y}_k 表示目标在量测空间可能出现的位置, 则根据目标量测预测值 $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$ 和相应的预测协方差矩阵 $\mathbf{D}_{k|k-1}$, 目标在第 k 时刻的预测波门可以表示为

$$|\mathbf{y}_k^j - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}^j| \leq g \sqrt{\mathbf{D}_{k|k-1}^{jj}}, \quad j = 1, 2, \dots, n_z \quad (9)$$

其中, \mathbf{y}_k^j 表示 \mathbf{y}_k 中第 j 个元素, $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}^j$ 表示 $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$ 中第 j 个元素, $\mathbf{D}_{k|k-1}^{jj}$ 表示 $\mathbf{D}_{k|k-1}$ 中第 j 行第 j 列的元素, g 表示预测波门系数, 用于保证目标能够以较高的概率落入预测波门。式(9)可以变形为 $(\mathbf{y}_k^j - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}^j)^2 / \mathbf{D}_{k|k-1}^{jj} \leq g^2$, 如果 \mathbf{y}_k^j 取为目标真实位置, 则 $(\mathbf{y}_k^j - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}^j)^2 / \mathbf{D}_{k|k-1}^{jj}$ 为自由度为1的卡方分布, 因此目标落入预测波门的概率可以表示为 $P_g = [\Pr(\chi_1^2 \leq g^2)]^{n_z}$, 其中 χ_1^2 表示自由度为1的卡方分布随机变量, $\Pr(\chi_1^2 \leq g^2)$ 表示 χ_1^2 小于等于 g^2 的概率。给定波门概率 P_g 便可确定预测波门系数 g 。

由于目标检测是针对不同的分辨单元进行的, 即检测空间是离散化的, 这将使得有些分辨单元不完全落入预测波门内, 此时定义预测波门内各个分辨单元的有效体积因子 β_i 为

$$\beta_i = V_i / V_c, \quad i = 1, 2, \dots, N_k \quad (10)$$

其中, V_i 表示第 k 时刻预测波门内第 i 个分辨单元与预测波门相交的体积, V_c 表示雷达分辨单元的体积, N_k 表示第 k 时刻预测波门内分辨单元的个数。对于完全落入预测波门内部的分辨单元, 有效体积因子为1。

为提高目标检测性能, 最直接的方式是降低预测波门内的检测门限。然而, 过低的检测门限将会带来过多的虚警, 一方面会造成目标量测和虚假量测难以区分, 另一方面会造成目标突然消失时航迹仍不能准确结束, 而是以虚假航迹继续存在。基于上述考虑, 我们在航迹虚警概率恒定的条件下调整预测波门内的单元虚警概率。不妨假设如下工程上常用的航迹撤销准则: 若连续 M 帧的预测波门内均不存在量测数据, 则删除该目标航迹。根据航迹虚警概率, 我们可以建立帧虚警概率 P_Z 和航迹虚警概率 P_F 的关系:

$$P_F = 1 - (1 - P_Z)^M \quad (11)$$

式(11)的物理含义为: 假设目标突然消失, 则经过连续 M 帧的跟踪过程之后航迹仍然存在的概率为 P_F 。

根据帧虚警概率，预测波门内的单元虚警概率可以按照式(12)计算得到

$$P_Z = 1 - \prod_{i=1}^{N_k} (1 - \beta_i P_{f,k}) \quad (12)$$

其中， $P_{f,k}$ 表示第 k 时刻预测波门内的单元虚警概率。 $\beta_i P_{f,k}$ 物理意义为第 k 时刻预测波门内第 i 个分辨单元出现虚警，且该虚警对应的虚假量测落入预测波门内的概率，该物理意义基于如下假设：虚假量测在分辨单元内服从均匀分布。

根据式(12)，我们可以给出单元虚警概率 $P_{f,k}$ 的近似解，即

$$P_{f,k} \approx P_Z / \sum_{i=1}^{N_k} \beta_i = P_Z V_c / \sum_{i=1}^{N_k} V_i = P_Z V_c / V_p \quad (13)$$

其中， V_p 表示目标预测波门的体积(即预测波门大小)。可以看出，预测波门体积越大，单元虚警概率越低，检测门限越高；相反预测波门体积越小，单元虚警概率越高，检测门限越低。目标跟踪过程中，预测波门的体积是处于变化状态的，所以单元虚警概率也是处于变化状态的。当目标的测量精度较差，观测不确定度较大时，目标跟踪性能较差。通过预测波门建立过程可以看出，较差的跟踪性能将意味着较差的预测性能(预测协方差变大)，也就是说目标预测波门体积变大，使得单元虚警概率变低、检测门限升高。

根据单元虚警概率，便可结合系统所用的目标检测算法计算检测门限，进而完成目标检测过程。由于在目标检测阶段充分利用了目标跟踪信息，与传统检测算法相比，该算法可以大大降低预测波门内的检测门限，提高目标检测性能和航迹连续性，推远目标跟踪距离。另外，该算法立足于航迹虚警概率调整检测门限，能够在降低检测门限的同时保证当目标突然消失时航迹能够迅速结束。值得注意的是，当我们获得更高精度的目标跟踪信息时，预测波门将会进一步缩小(预测波门内分辨单元个数进一步减少)，根据式(13)可以看出，我们可以得到更低的检测门限，最终获得更好的检测性能。

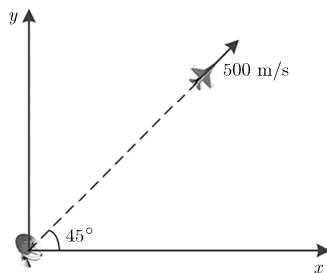


图2 目标运动场景示意图

从算法实现的过程来看，该算法具有较高的通用性，即并不局限于某种检测算法或者某种跟踪算法，而是在传统的检测跟踪框架上，将目标跟踪信息反馈至目标检测器，而后在航迹虚警概率恒定的条件下设计检测门限调整策略，进而完成目标检测过程，因此算法具有很高的普适性和工程应用价值。

4 仿真实验与性能分析

为验证所提算法的性能，不失一般性，考虑一2D雷达位于坐标原点，并且具有如下工作参数：载频 $f_c = 1$ GHz，带宽 $B = 1$ MHz，波束宽度为 θ_3 dB = 2°，雷达扫描周期为 $T = 10$ s，预测波门系数 $g = 4$ (对应于目标能以 $P_g = 99.99\%$ 概率落入预测波门内)。设目标相对于雷达的初始距离为100 km，初始方位角为45°，并且以500 m/s的速度远离雷达站匀速飞行，如图2所示。目标初始时刻的信噪比为30 dB，飞行过程中信噪比变化如图3所示。

不妨设目标RCS服从Swelling I类起伏模型^[1]，且雷达接收信号的背景噪声服从零均值的复高斯分布。为简化起见，令检测统计量为 $\lambda = |x|^2 / \sigma_n^2$ ，其中 σ_n^2 表示背景噪声功率。则单元虚警概率和检测门限的关系式为

$$P_f = \int_{\eta}^{+\infty} p(\lambda | H_0) d\lambda = \int_{\eta}^{+\infty} e^{-\lambda} d\lambda = e^{-\eta} \quad (14)$$

航迹撤销准则为：若连续3帧的预测波门内均没有量测数据，则撤销该航迹。目标跟踪算法采用扩展卡尔曼滤波算法^[2]。传统检测跟踪算法对应的虚警概率为 10^{-6} ，经计算其对应的检测门限约为13.82；本文算法航迹虚警概率为 $P_f = 0.1$ 。根据所设定的航迹虚警概率，可以计算出帧虚警概率为0.0345。帧虚警概率体现的是预测波门内出现虚警的概率，因此根据上述计算的帧虚警概率可以得出：从统计意义上，雷达100次扫描期间大约有3次扫描的预测波门内出现虚警，该量级在目标跟踪阶段通常是可以接受的。

仿真实验中，目标状态向量包含目标的位置信息和速度信息，即

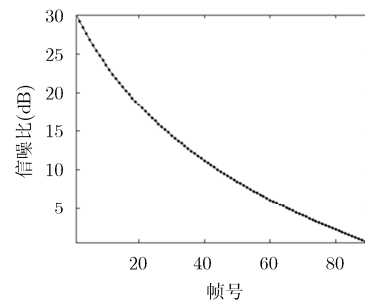


图3 目标信噪比随帧号变化

$$\mathbf{x}_k = [x_k \quad \dot{x}_k \quad y_k \quad \dot{y}_k]^T \quad (15)$$

其中, x_k 表示目标位置的横坐标, y_k 表示目标位置的纵坐标, \dot{x}_k 表示目标速度的横坐标, \dot{y}_k 表示目标速度的纵坐标。

考虑以下匀速运动模型^[2]:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}_{k|k-1}(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{v}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k|k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{v}_{k|k-1} \quad (16)$$

其中, 状态转移矩阵 $\mathbf{F}_{k|k-1}$ 为

$$\mathbf{F}_{k|k-1} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

过程噪声 $\mathbf{v}_{k|k-1}$ 的协方差矩阵为

$$\mathbf{Q}_{k|k-1} = \sigma_p^2 \begin{bmatrix} T^3/3 & T^2/2 & 0 & 0 \\ T^2/2 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T^3/3 & T^2/2 \\ 0 & 0 & T^2/2 & T \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中, σ_p 表示过程噪声标准差, 仿真实验中取为 $\sigma_p = 0.1$ 。

雷达观测方程为

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_k - x_r)^2 + (y_k - y_r)^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{y_k - y_r}{x_k - x_r}\right) \end{bmatrix} + \mathbf{w}_k \quad (19)$$

其中, x_r 和 y_r 分别表示某个雷达的横坐标和纵坐标, $\tan^{-1}(\cdot)$ 表示反正切函数。

目标跟踪过程中检测门限的变化如图4所示。

由图4可以看出, 本文算法由于利用了跟踪信息, 可在预测波门内得到比传统检测算法更低的检测门限, 因此具有更高的检测性能。通过预测波门建立过程可以看出, 前一时刻的跟踪性能直接影响着当前时刻的预测性能, 并且跟踪性能越差, 预测性能也就越差, 具体体现在式(6)预测协方差的计算过程。在跟踪起始阶段, 目标观测信息较少, 跟踪滤波器随着目标量测的增多(帧号的增加)处于收敛

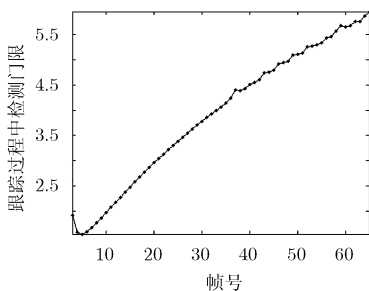


图4 本文算法预测波门内检测门限随帧号的变化

过程, 即跟踪误差逐渐降低, 因此预测性能逐渐变好(预测协方差变小), 使得预测波门体积变小, 从而单元虚警概率升高, 检测门限呈现出降低的趋势。当跟踪滤波器趋于收敛后, 由于目标远离雷达站飞行, 信噪比随距离衰减, 距离测量精度和角度测量精度变差, 造成目标观测不确定度变大, 导致跟踪性能下降, 因此预测性能逐渐变差(预测协方差变大), 使得预测波门体积变大, 最终体现为单元虚警概率随帧号降低, 检测门限随帧号呈现出升高的趋势。

为分析跟踪过程中所提算法与传统检测跟踪算法的检测性能, 我们定义跟踪过程中的检测概率: 在目标航迹尚未撤销的前提下, 目标被检测到的概率。目标跟踪过程中的检测概率如图5所示。

由图5可以看出, 本文所提算法与传统检测跟踪算法相比, 检测性能有了很大提升。当所需目标检测概率为0.50时, 传统检测算法所需的信噪比为14.11 dB, 而本文算法所需的信噪比仅为9.39 dB。因此, 目标跟踪信息反馈至目标检测器之后, 信噪比需求降低了4.72 dB。从雷达发射功率的角度出发, 利用跟踪信息可以降低66.67%的发射功率, 大大节省了雷达功率资源。

为分析目标跟踪距离的性能提升, 定义跟踪维持概率: 给定目标距离, 目标跟踪器可以将跟踪过程维持至该距离的概率。本文所提算法与传统检测跟踪算法的跟踪维持概率如图6所示。

由图6可以看出, 本文算法与传统检测跟踪算法相比, 可以获得更远的跟踪距离。当跟踪维持概率为0.50的条件下, 传统检测跟踪算法的跟踪距离为287.10 km, 而本文所提算法的跟踪距离为368.10 km, 跟踪距离推远了28.21%。

为验证检测门限调整准则的有效性, 不失一般性, 假设目标在第10帧突然消失, 基于5000次蒙特卡洛试验分析目标航迹在后续帧存在的概率, 如图7所示。

根据航迹撤销准则和航迹虚警概率可知, 目标航迹在第12帧仍然存在的概率理论上为 $P_f = 0.1$, 图7中第12帧航迹存在的概率为0.098, 验证了检测门限调整准则的有效性。此外, 在第16帧之前, 目标航迹基本已经结束, 说明了目标突然消失时, 航迹能够迅速地结束, 避免了虚假航迹的延续。

本文所提算法中一个非常重要的参数就是航迹虚警概率, 雷达中航迹虚警概率的设定是一个工程性的问题, 需要结合多方面因素综合考虑。通过式(11)和式(13)可以看出, 航迹虚警概率越高, 预测波门内的单元虚警概率越高, 目标检测性能也就越高。

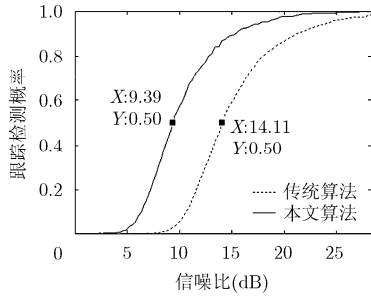


图5 跟踪过程中的检测概率对比图

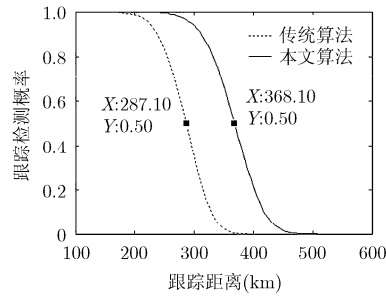


图6 跟踪维持概率对比图

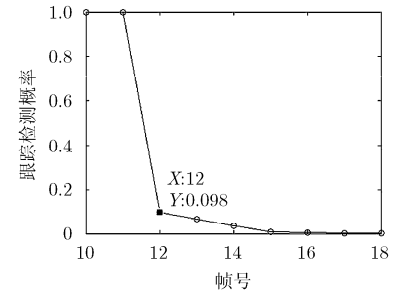


图7 航迹存在概率

但是较高的航迹虚警概率会使得, 当目标突然消失时, 航迹结束所需延迟的帧数也就越多, 甚至可能会造成跟踪系统过饱和。对于该参数的典型值, 本文建议其量级取为 0.1, 该数值意味着目标突然消失时, 航迹能够以 90% 的概率被正确结束, 然而典型值的选取仍然需要经过实际雷达跟踪系统的进一步试验验证。

5 结束语

本文提出了一种航迹恒虚警的目标检测跟踪一体化算法。算法首先根据目标跟踪信息和目标运动模型建立目标预测波门, 然后在航迹虚警概率恒定的条件下降低预测波门内的检测门限, 最终完成目标检测过程。仿真试验表明, 与传统检测跟踪算法相比, 本文算法可以大大提高目标检测性能, 扩展目标跟踪距离。与此同时, 当目标突然消失时, 目标航迹能够迅速结束, 避免了虚假航迹的延续。另外, 本文算法并不局限于某种检测算法或者跟踪算法, 而是在通用的检测跟踪处理框架下设计检测门限调整策略, 因此具有较高的普适性和工程应用价值。在下一步工作研究中, 我们将本文算法进一步扩展到机动目标情况。

参考文献

- [1] VANTREES H L. Detection, Estimation, and Modulation Theory-Part I[M]. New York: John Wiley and Sons, 1968, Chapter 2.
- [2] CHALLA S, MORELANDE M R, MUSIKI D, *et al.* Fundamentals of Object Tracking[M]. Cambridge: University Press, 2011, Chapter 4.
- [3] RICHARDS M A. Fundamentals of Radar Signal Processing[M]. New York: McGraw Hill, 2005, Chapter 1.
- [4] 于洪波, 王国宏, 曹倩, 等. 一种高脉冲重复频率雷达微弱目标检测跟踪方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(5): 1097-1103. doi: 10.11999/JEIT140924.
- [5] YU Hongbo, WANG Guohong, CAO Qian, *et al.* A novel approach for detecting and tracking weak targets in high-PRF radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(5): 1097-1103. doi: 10.11999/JEIT140924.
- [6] 占荣辉, 刘盛启, 欧建平, 等. 基于序贯蒙特卡罗概率假设密度滤波的多目标检测前跟踪改进算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(11): 2593-2599. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.02029.
- [7] ZHAN Ronghui, LIU Shengqi, OU Jianping, *et al.* Improved multitarget track before detect algorithm using the sequential monte carlo probability hypothesis density filter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(11): 2593-2599. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.02029.
- [8] 严俊坤, 戴奉周, 秦童, 等. 一种针对目标三维跟踪的多基地雷达系统功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 901-907. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00883.
- [9] YAN Junkun, DAI Fengzhou, QIN Tong, *et al.* A power allocation approach for 3D target tracking in multistatic radar systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 901-907. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00883.
- [10] YAN Junkun, LIU Hongwei, JIU Bo, *et al.* Simultaneous multibeam resource allocation scheme for multiple target tracking[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(12): 3110-3122. doi: 10.1109/TSP.2015.2417504.
- [11] RAHMATHULLAH A S, SVENSSON L, SVENSSON D, *et al.* Smoothed probabilistic data association filter[C]. 2013 16th International Conference on Information Fusion, Istanbul, Turkey, 2013: 1296-1303.
- [12] JIANG X, HARISHAN K, THARMARASA R, *et al.* Integrated track initialization and maintenance in heavy clutter using probabilistic data association[J]. *Signal Processing*, 2014, 91(1): 241-250. doi:10.1016/j.sigpro.2013.06.026.
- [13] FORTMANN T, BAR-SHALOM Y, SCHEFFÉ M, *et al.* Detection thresholds of tracking in clutter—a connection between estimation and signal processing[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1985, 30(3): 221-229. doi: 10.1109/TAC.1985.1103935.
- [14] LI X R and BAR-SHALOM Y. Detection threshold selection for tracking performance optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 742-749.

- doi: 10.1109/TAC.1985.1103935.
- [12] GELFAND S B, FORTMANN T E, and BAR-SHALOM Y. Adaptive detection threshold optimization for tracking in clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(2): 514-523. doi: 10.1109/7.489496.
- [13] ASLAN M S, SARANL A, and BAYKAL B. Tracker-aware adaptive detection: an efficient closed-form solution for the Neyman-Pearson case[J]. *Digital Signal Processing*, 2010, 20(5): 1468-1481. doi: 10.1016/j.dsp.2010.01.008.
- [14] 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.
- [15] ASLAN M S and SARANLI A. A tracker-aware detector threshold optimization formulation for tracking maneuvering targets in clutter[J]. *Signal Processing*, 2011, 91(9): 2213-2221. doi: 10.1016/j.sigpro.2011.04.004.
- [16] 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.
- [17] 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.
- 刘红亮: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为目标检测、目标跟踪与定位、协同探测.
- 周生华: 男, 1982年生, 博士, 副教授, 研究方向为 MIMO 雷达、协同探测.
- 刘宏伟: 男, 1971年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达系统、雷达信号处理、雷达自动目标识别等.
- 严俊坤: 男, 1987年生, 博士后, 研究方向为目标检测、目标跟踪、多站资源分配.