

文章编号: 2095-4980(2022)04-0340-06

一种跟踪信息辅助的认知目标检测方法

刘红亮, 张思思, 赵庆媛, 岳 凯

(北京无线电测量研究所, 北京 100854)

摘 要: 近年来认知雷达技术取得了快速发展, 如何利用已获取的感知信息提高雷达探测性能成为研究热点。针对跟踪阶段的认知目标检测问题, 提出一种跟踪信息辅助的认知目标检测方法, 旨在利用跟踪信息提高目标检测性能和跟踪性能。对于处于跟踪阶段的目标, 目标真实性已被充分证实, 此时可以将跟踪信息传递至检测模块, 以期获得探测性能提升。本文认知检测方法的基本思路是, 提取当前时刻跟踪信息中的目标运动特征, 构建下一时刻的预测波门, 并利用目标在波门内的预测概率分布特征, 在贝叶斯准则和航迹恒虚警的共同约束下调整波门内检测门限, 最终完成认知目标检测。仿真实验表明, 所提认知目标检测方法可以有效改善目标检测跟踪性能。

关键词: 雷达; 认知检测; 跟踪信息; 航迹恒虚警

中图分类号: TN953

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020236

Cognitive target detection method based on tracking information

LIU Hongliang, ZHANG Sisi, ZHAO Qingyuan, YUE Kai

(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: In recent years, cognitive radar techniques have been developed quickly. How to improve radar detection performance basing on the obtained sensing information has become hot topic. A cognitive target detection method during tracking stage is presented based on tracking information, in order to improve target detection and tracking performance. For the target during tracking stage, the target existence has been proved, therefore the tracking information can be sent to target detector to expect an improved detection performance. As to the proposed cognitive detection method, firstly, target motion characteristics are extracted from tracking information, and a predicted region is established for the next instant; secondly, detection thresholds in the predicted region are adjusted by using target prediction probability information, under the Bayesian criterion and constant false track rate; finally, cognitive target detection is accomplished. Numerical results indicate that the cognitive target detection method can significantly improve target detection and tracking performance.

Keywords: radar; cognitive detection; tracking information; constant false track rate

目标检测和目标跟踪是雷达系统中两个基本的处理模块^[1], 目标检测通过将回波信号预处理形成的检测统计量进行二元判决, 给出责任空域内所有检测单元中目标存在性的初步判决结果, 并给出参数估计结果形成点迹; 目标跟踪基于目标检测提供的点迹信息, 按照航迹起始准则决定是否建立真实航迹, 并进一步完成建航之后的数据关联和航迹滤波环节。传统雷达系统的信息处理通常分为信号处理分系统和数据处理分系统, 目标检测为信号处理分系统的子功能, 目标跟踪为数据处理分系统的子功能。在信息处理方式上, 传统雷达系统按照先信号处理后数据处理的顺序, 而不存在信号处理和数据处理的信息交互和相互辅助。在上述雷达系统架构下, 对于某个正处于跟踪阶段的目标, 如果信噪比较低, 较低的检测概率极易造成连续多次观测无法检测到目标点迹, 最终造成航迹跟踪精确度的下降, 甚至断航。近些年, 认知雷达技术取得了飞速发展, 包括认知目标跟踪^[2-3]、认知波形优化^[4]、认知资源分配^[5]、认知参数估计^[6]等技术。不同于传统雷达系统, 认知雷达更加侧重于充分利用历史获得的目标和环境感知结果, 并做出自适应的调整策略, 以期获得雷达系统综合性能的提升。从雷达

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-06-29

信息处理的角度来看,目标跟踪可以看作是对目标历史观测累积信息的统计和估计的过程,将该信息反馈至目标检测器指导目标检测算法,可以看作是自适应决策过程,这样的认知检测模型对信息的利用更加精细,有助于提高检测跟踪性能。需要指出的是,在雷达搜索期间通常不具备任何目标有无的先验信息,为了控制整体的虚假点迹数量和虚假航迹数量,一般采用较高的目标检测门限;然而在跟踪阶段已经具备了一定的目标信息,若仍然采用搜索期间较高的检测门限将会显得过于严格,此时可以针对性地设定相对宽松的检测策略,以提高当前跟踪目标的检测性能。考虑到跟踪信息反映了当前时刻目标的物理特性,包括一阶位置信息、二阶速度信息等,可以基于上述运动信息预测目标将来可能出现的空间区域,即预测波门,而波门内的检测则可归为认知目标检测。目前已有许多文献讨论如何解决预测波门内的检测问题,一部分研究工作是从最小化目标跟踪误差的角度来设计波门内的最优检测门限。文献[7]最早提出了以跟踪精确度为代价函数调整波门内检测门限的方案,并基于概率数据互联算法^[8]给出了最优检测门限的求解方法。进一步,文献[9]和文献[10]利用跟踪滤波器在进行状态估计协方差矩阵更新时的递推特点,给出了更高效的检测门限优化方法。文献[11]将跟踪误差建模为一种跟踪性能预测,进一步基于尼曼皮尔逊准则给出最优门限的数学表达式。文献[12-13]针对机动和非机动两种典型的跟踪场景,分别给出了最优门限求解方法。与上述门限优化的研究思路不同,文献[14]利用跟踪信息对下一时刻的预测概率密度函数设计了一种贝叶斯检测器。基于文献[14],文献[15]提出了一种波门内具有恒虚警特性的贝叶斯检测算法。虽然上述思路可以有效降低检测门限并提高检测性能,但都存在潜在的问题:若目标突然消失,检测门限将会面临失控的情况;若门限较低,则必然会引发虚假点迹和虚假航迹的增多,引发错误空情。为此文献[16]提出了一种航迹恒虚警的目标检测策略,不仅可提高检测性能,也可保证目标消失时航迹可以迅速结束。需要指出的是,文献[16]只是利用了预测波门体积信息,实际上目标出现在预测波门不同位置的概率服从一定概率分布,因此本文在文献[16]的基础上进一步利用预测分布信息,针对预测波门内不同的检测单元给出更加合理的检测门限。仿真实验表明,在航迹恒虚警和贝叶斯准则的共同约束下,利用预测分布信息之后可以获得更好的检测性能,以及更高的跟踪维持性能。

1 问题描述

雷达目标检测为二元判决问题,可以通过下式描述,

$$\begin{cases} \zeta \geq T, \text{ 判为 } H_1 \text{ 假设} \\ \zeta < T, \text{ 判为 } H_0 \text{ 假设} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ζ 表示雷达回波预处理后形成的检测统计量; T 表示恒虚警检测门限; H_1 表示目标存在的假设; H_0 表示目标不存在的假设。常见的CA-CFAR(单元平均恒虚警)检测方法对应的检测统计量体现为:

$$\zeta = |y|^2 / \left(\frac{1}{N_c} \sum_{m=1}^{N_c} |r_m|^2 \right) \quad (2)$$

式中: y 表示当前检测单元预处理(脉冲压缩、杂波抑制、脉冲积累等)后的回波数据; r_m 表示第 m 参考单元预处理后的回波信号; N_c 表示参考单元个数。当某个目标处于跟踪阶段时,雷达系统已经可以较高的概率确定目标的真实存在,此时在目标检测环节利用该先验信息必将有利于提高目标的检测概率。

2 认知目标检测方法

目标跟踪阶段,在每一个搜索周期都可以获得目标状态估计值以及相应的协方差矩阵,分别记为 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$ 和 $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$,基于上述信息并结合目标运动方程,可以获得目标状态预测值 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 以及相应的预测协方差矩阵 $\mathbf{P}_{k|k-1}$ 。

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k|k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k|k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_{k|k-1}^T + \mathbf{Q}_{k|k-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{F}_{k|k-1}$ 表示第 $k-1$ 时刻至第 k 时刻的状态转移矩阵; $\mathbf{Q}_{k|k-1}$ 表示过程噪声协方差矩阵。

通常雷达目标状态建模在直角坐标系中,而雷达观测信息则建模在极坐标系中,因此需要将状态预测信息变换到雷达观测的极坐标空间,以更加方便地描述预测区域。将 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 及 $\mathbf{P}_{k|k-1}$ 转换至雷达测量坐标系中,

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} = \mathbf{h}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \\ \mathbf{D}_{k|k-1} = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T \end{cases} \quad (4)$$

式中： \mathbf{H}_k 表示第 k 时刻观测函数 $\mathbf{h}_k(\cdot)$ 的雅可比矩阵。

综合上述信息，预测波门的约束条件为：

$$|\mathbf{y}_k^j - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}^j| \leq g \sqrt{\mathbf{D}_{k|k-1}^{jj}}, j=1, 2, \dots, n_z \quad (5)$$

式中： \mathbf{y}_k^j 表示向量 \mathbf{y}_k 中第 j 个元素； $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}^j$ 表示向量 $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$ 中第 j 个元素； $\mathbf{D}_{k|k-1}^{jj}$ 表示矩阵 $\mathbf{D}_{k|k-1}$ 中第 j 行第 j 列的元素； g 表示波门大小； n_z 表示雷达观测维数。

另外，目标在预测波门内不同位置出现的概率为：

$$P_{c,k,i} = \int_{\Delta_i} \mathcal{N}(\mathbf{y}_k; \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}, \mathbf{D}_{k|k-1}) d\mathbf{y}_k, i=1, 2, \dots, N_k \quad (6)$$

式中： Δ_i 表示波门内第 i 个检测单元对应的积分范围； N_k 表示预测波门内总的待检测单元个数； $\mathcal{N}(\mathbf{y}_k; \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}, \hat{\mathbf{S}}_{k|k-1})$ 表示预测概率密度函数；通常为均值和方差分别为 $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$ 和 $\mathbf{D}_{k|k-1}$ 的高斯概率分布函数。

基于文献[16]，针对预测波门内各个检测单元定义有效体积因子 $\beta_i = V_i/V_c$ ，其中， V_i 表示 k 时刻预测波门内第 i 个待检测单元与预测波门的交集体积， V_c 表示单个雷达检测单元所占据的体积。

采用以下航迹删除准则：若连续 M 个搜索周期均不存在量测数据与当前航迹满足关联条件，则将该航迹删除。进一步假设目标信号能量变为0，则经过 M 个搜索周期之后目标航迹仍然存在的概率为航迹虚警概率。基于上述假设文献[16]成功建立了帧虚警概率 P_z 和航迹虚警概率 P_f 的数学关系：

$$1 - (1 - P_z)^M = P_f \quad (7)$$

进一步，建立预测波门内各个检测单元虚警概率 $P_{f,k,i}$ 和帧虚警概率 P_z 的数学关系：

$$1 - \prod_{i=1}^{N_k} (1 - \beta_i P_{f,k,i}) = P_z \quad (8)$$

对于文献[16]的检测策略，波门内采用共同的虚警概率(以下称为均匀方法)，此时可采用近似公式计算，

$$P_{f,k} \approx P_z / \sum_{i=1}^{N_k} \beta_i \quad (9)$$

与文献[16]不同，可以充分利用目标的预测概率分布信息，在贝叶斯意义下，对波门内每个检测单元针对性地进行设计，最终体现为预测波门内具有空间变化特性的非均匀检测门限，具体形式如下：

$$\frac{p(\xi_{k,i}|H_1)}{p(\xi_{k,i}|H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \frac{1 - P_{c,k,i}}{P_{c,k,i}} T_k, i=1, 2, \dots, N_k \quad (10)$$

式中： $\xi_{k,i}$ 表示第 k 时刻第 i 个检测单元的检测统计量； $p(\xi_{k,i}|H_1)$ 表示在 H_1 假设下检测统计量 $\xi_{k,i}$ 的概率统计分布； $p(\xi_{k,i}|H_0)$ 表示 H_0 假设下检测统计量 $\xi_{k,i}$ 的概率统计分布； T_k 为公共因子，用于保证式(8)条件的成立。分析上式可以看出，对于靠近预测波门中心的空间位置，说明目标以较高概率出现，对应上式右端检测门限相对较低；相反，对于偏离预测波门中心的空间位置，则说明目标出现的概率较低，此时上式右端检测门限较高，最终呈现出空间非均匀的检测门限。

与文献[16]相比，本文认知检测方法不仅利用了预测波门空间区域大小特征，对检测单元不完全落入预测波门的情况进行了精细化设计，而且充分考虑了每个检测单元的目标预测分布特性，信息利用率更高，因此从统计意义上讲，非均匀方法将会获得更高的探测性能。从整个检测跟踪处理流程来看，本文所提的认知检测方法也可从广义上认为是一种检测前跟踪方法。传统检测前跟踪方法^[17]的核心在于利用目标运动规律提取满足帧间关联条件的连续多帧数据，通过多帧信号的积累提高检测性能，由于需要针对全空域回波信号的处理，因此需要一定的计算资源和存储资源开销。本文所提方法与传统检测前跟踪方法不同的是，旨在利用跟踪信息优化单帧的目标检测性能，因此只涉及到预测波门内的检测门限优化，计算效率高，存储需求低。

3 仿真实验与性能分析

实验参数：考虑一部两坐标雷达，工作频点为 1 GHz，发射带宽为 1 MHz 的线性调频信号，方位分辨力为 2°，雷达搜索数据率为 10 s，预测波门大小取为 4；目标初始位置为距离 100 km、方位 25°，以 100 m/s 的恒定速度沿雷达径向背站飞行。另外目标的散射截面积为第一类起伏模型，航迹删除准则为：若连续 3 次搜索期间均不存在与目标航迹相关联的点迹数据，则直接删除该航迹。航迹滤波采用扩展卡尔曼滤波实现，传统雷达信息处理方式下虚警概率为 10^{-6} ；本文认知检测方法对应的航迹虚警概率为 0.1。

首先分析信噪比固定条件下的目标检测情况，假设飞行过程中目标信噪比保持 13 dB 不变，经过脉压和积累后的回波信号如图 1 所示。分析文献[16]和本文认知检测方法在目标真实出现的位置对应的检测门限情况，如图 2 所示，其中均匀方法指的是文献[16]的方法。通过图 2 可以看出，两种方法都可以获得检测门限的降低，也就意味着可以获得更高的目标检测概率，如图 3 所示。传统检测方法未利用任何信息，目标检测概率仅约为 52%，然而采用认知处理策略后，经过门限自适应调整可将目标检测概率提高至 80% 左右。大多数情况下本文认知检测方法都可以获得更高的检测概率，但对于个别观测，本文认知检测方法的检测概率将会低于文献[16]方法，主要是因为目标真实位置与预测中心存在一定程度的偏离，造成目标真实位置处的预测概率 $P_{c,k,i}$ 降低，当预测概率较低时，检测门限将会升高，如图 2 中第 17 帧的门限升高现象，最终造成了图 3 中非均匀方法检测概率的下降。采用多次仿真实验分析平均检测概率，具体情况如图 4 所示，从统计意义上看，本文认知检测方法可以获得比文献[16]方法更高的检测性能。

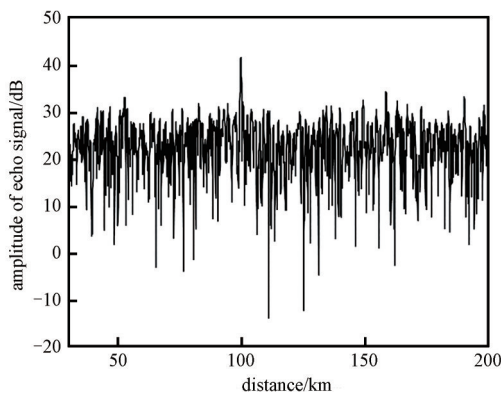


Fig.1 Echo signal after pulse compression and accumulation
图 1 经过脉压和积累后的回波信号

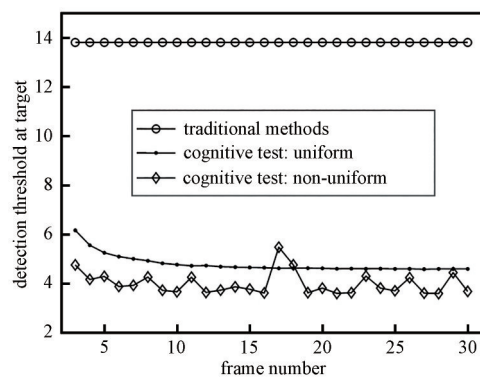


Fig.2 Comparison of detection threshold after adjustment
图 2 检测门限调整结果对比图

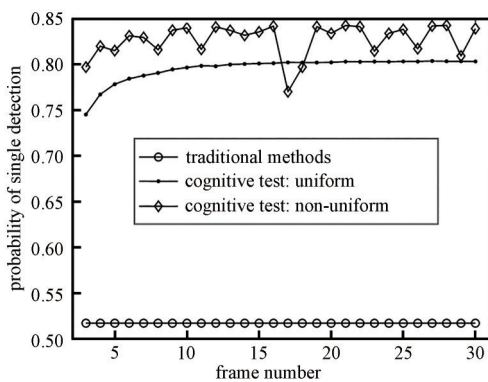


Fig.3 Comparison of probability of single detection
图 3 单次检测概率对比图

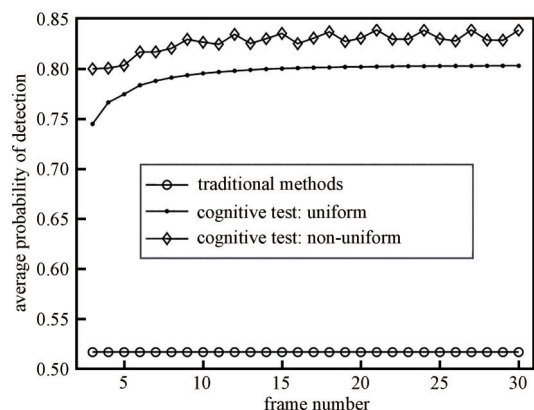


Fig.4 Comparison of average probability of detection
图 4 平均检测概率对比图

为进一步分析跟踪性能改善，此处定义稳定跟踪概率，物理含义是目标航迹能够稳定跟踪到某个信噪比或者某个距离时的平均概率。为便于分析，考虑目标从 60 km 位置沿雷达径向远离雷达站匀速飞行，飞行速度为 300 m/s，信噪比按照距离四次方衰减，其余检测跟踪参数与本节的初始设置相同，分析航迹维持概率相对于信噪比和目标距离的变化情况，分别如图 5 和图 6 所示。

观察图 5，若稳定跟踪概率要求为 0.5，传统方法的信噪比要求约为 13.83 dB，文献[16]的信噪比需求约为

7.61 dB, 本文认知检测方法的信噪比需求仅为 6.34 dB。因此, 经过认知目标检测之后, 文献[16]方法可将信噪比需求降低 6.22 dB, 使用本文认知检测方法可将信噪比需求降低 7.49 dB, 可以获得比文献[16]更好的稳定跟踪性能。通过图 6 可以进一步看出, 当稳定跟踪概率要求为 0.5 时, 传统方法对应的稳定跟踪距离仅为 134 km, 文献[16]可将稳定跟踪距离沿拓至 188.4 km, 本文认知检测方法可将有效跟踪距离沿拓至 200 km。

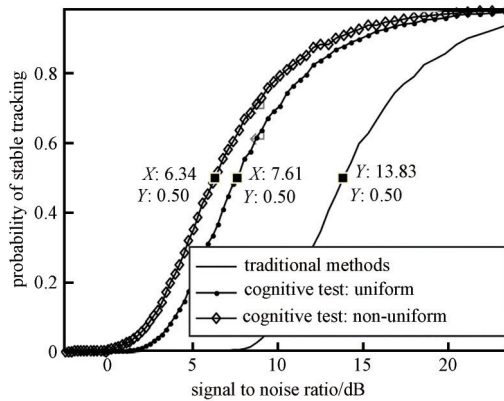


Fig.5 Probability of stable tracking versus target signal to noise ratio

图 5 稳定跟踪概率随目标信噪比的变化情况

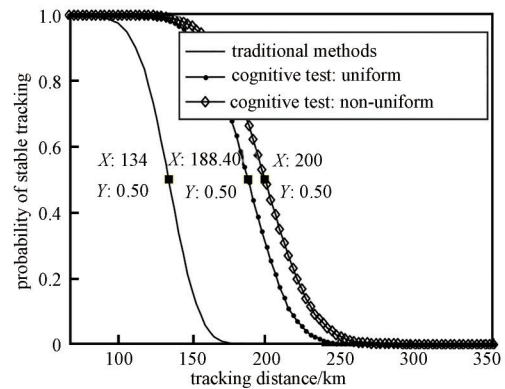


Fig.6 Probability of stable tracking versus target distance

图 6 稳定跟踪概率随目标距离的变化情况

4 结论

本文提出了一种跟踪信息辅助的认知目标检测方法, 其核心思想是: 利用跟踪阶段获得的目标运动特征信息形成预测波门, 然后在贝叶斯准则和航迹虚警概率恒定的共同约束下自适应调整预测波门内的目标检测策略, 达到降低检测门限进而提升检测跟踪性能的效果。在认知目标检测过程中, 不仅利用了预测波门体积信息, 还充分利用目标出现在波门内每个位置的概率信息, 并通过仿真实验, 分析验证了本文方法的探测性能。

参考文献:

- [1] BARTON D K. Radar system analysis and modeling[M]. Artech House, 2004.
- [2] 王树亮, 毕大平, 刘宝, 等. 认知结构模型机动目标跟踪算法[J]. 宇航学报, 2019, 40(1): 69-76. (WANG Shuliang, BI Daping, LIU Bao, et al. Cognitive structure model maneuvering target tracking algorithm[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(1): 69-76.)
- [3] GUI R, WANG W Q, PAN Y, et al. Cognitive target tracking via angle-range-Doppler estimation with transmit subaperturing FDA radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2018, 12(1): 76-89.
- [4] 崔国龙, 余显祥, 杨婧, 等. 认知雷达波形优化设计方法综述[J]. 雷达学报, 2019, 8(5): 537-557. (CUI Guolong, YU Xianxiang, YANG Jing, et al. An overview of waveform optimization methods for cognitive radar[J]. Journal of Radars, 2019, 8(5): 537-557.)
- [5] YAN J, PU W, ZHOU S, et al. Collaborative detection and power allocation framework for target tracking in multiple radar system[J]. Information Fusion, 2020, 55: 173-183.
- [6] ELBIR A M, MISHRA K V, ELDAR Y C. Cognitive radar antenna selection via deep learning[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 13(6): 871-880.
- [7] FORTMANN T, BAR-SHALOM Y, SCHEFFE 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.
- [8] SCHUSTER M, REUTER J, WANIELIK G. Probabilistic data association for tracking extended targets under clutter using random matrices[C]//18th International Conference on Information Fusion. Washington DC: IEEE, 2015: 961-968.
- [9] LI X R, BAR-SHALOM Y. Detection threshold selection for tracking performance optimization[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3): 742-749.
- [10] GELFAND S B, FORTMANN T E, BAR-SHALOM Y. Adaptive detection threshold optimization for tracking in clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(2): 514-523.
- [11] ASLAN M S, SARANLA, 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.
- [12] ASLAN M S, SARANLI A. Threshold optimization for tracking a nonmaneuvering target[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 7(4): 2844-2859.

- [13] ASLAN M S, SARANLI A. A tracker-aware detector threshold optimization formulation for tracking maneuvering targets in clutter[J]. Signal Processing, 2011;91(9):2213–2221.
- [14] WILLETT P, NIU R, BAR-SHALOM Y. Integration of Bayes detection with target tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001,49(1):17–29.
- [15] 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. (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.)
- [16] 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. (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.)
- [17] 朱洁丽,汤俊. 检测前跟踪算法性能评估指标体系[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(5):671–677. (ZHU Jieli, TANG Jun. Performance evaluation metrics for Track-Before-Detect algorithms[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(5):671–677.)

作者简介：

刘红亮(1989–)，男，河北省唐山市人，博士，高级工程师，主要研究方向为雷达信号处理、数据处理、雷达组网技术。email:hllixidian@gmail.com.

赵庆媛(1986–)，女，河南省商丘市人，博士，工程师，主要研究方向为雷达总体、人工智能技术。

张思思(1990–)，女，陕西省宝鸡市人，硕士，工程师，主要研究方向为雷达总体技术、雷达信号处理、人工智能技术。

岳凯(1987–)，男，河北省迁安市人，博士，高级工程师，主要研究方向为雷达总体、人工智能技术。