

文章编号: 2095-4980(2014)05-0671-07

检测前跟踪算法性能评估指标体系

朱洁丽, 汤 俊

(清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 针对传统性能评估指标难以有效评估检测前跟踪(TBD)算法性能的问题, 构建了 TBD 算法性能评估通用流程, 并从单帧检测和虚警、航迹检测和虚警及计算资源 3 个方面, 建立了一套基于单目标模型的性能评估指标体系。在此基础上, 比较了 Hough 变换和递归贝叶斯滤波 2 种典型 TBD 算法的性能, 仿真结果验证了该指标体系的有效性。

关键词: 性能评估; 检测前跟踪; 指标体系; 航迹

中图分类号: TN957

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201405.0671

Performance evaluation metrics for Track-Before-Detect algorithms

ZHU Jie-li, TANG Jun

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A performance evaluation process is proposed to deal with the problem that the traditional performance metrics being hard to evaluate the Track-Before-Detect(TBD) algorithms effectively. Some performance evaluation metrics based on single target are proposed, from three aspects including single frame detection and false alarm, track detection and false alarm, and computing resources. On that basis, the performances of Hough transform and recursive Bayesian filtering are compared in simulation, which verifies the validity of the performance evaluation metrics.

Key words: performance evaluation; Track-Before-Detect; metric system; track

现代战争中, 巡航导弹、无人机和隐身飞机等微弱目标经常利用复杂背景作掩护进行突防, 对我防空雷达网构成严重威胁。传统雷达系统采用先检测后跟踪(Detect-Before-Track, DBT)的级联处理方式^[1], 未充分利用帧间信息和目标与环境信息, 因此难以实现对微弱目标的有效检测和跟踪。检测前跟踪(TBD)技术首先跟踪目标运动轨迹, 然后沿着轨迹进行数据帧间的能量积累和目标检测, 能充分利用微弱的有用信息, 因此TBD算法已成为目前解决复杂背景下弱目标检测跟踪问题的重要技术手段^[1]。

随着TBD算法的不断发展, 针对算法的性能评估工作显得愈发重要, 合理的性能评估指标不但可用于评估算法性能, 界定其适用范围, 支撑改进或发展新算法, 还可用于算法性能比较, 为系统的设计和优化提供参考, 对推动复杂背景下弱目标检测跟踪技术的发展具有极其重要的意义。传统雷达系统将检测和跟踪环节分开, 多采用检测概率、虚警概率和均方根误差(Root-Mean-Square-Error, RMSE)等性能指标来分别评估2个环节的性能, 但对于TBD这种联合检测跟踪技术而言, 单独从检测或跟踪出发难以全面评估算法性能^[2]。如何系统合理地评估TBD算法的目标检测和跟踪性能, 正成为一个越来越重要的课题。

近年来, 国内外学者针对TBD算法性能评估已开展了相关研究^[3-8]。文献[3-4]从跟踪精确度的角度使用目标位置RMSE定量分析和比较了多种TBD算法的性能, 但未对算法性能进行全面有效的评价。文献[5]提出包括全局检测概率和虚假航迹数在内的6个性能指标, 基于单目标检测跟踪模型比较了4种TBD算法的性能。文献[6]在文献[5]基础上从全局ROC(Receiver Operating Characteristic)、单帧ROC、单帧检测灵敏度等角度评估和比较了3种TBD算法的单目标检测跟踪性能, 主要考虑了点迹检测, 未从航迹的角度考虑算法性能。文献[7]也在文献[5]基础上, 从目标有效检测和航迹有效检测2个方面提出性能评估指标, 通过有效检测的概念对检测跟踪性能进行联合评价, 但文中对有效航迹的界定并不明确, 也没有考虑航迹的连续性和航迹虚警特性。文献[8]基于文献[7]提

收稿日期: 2014-03-19; 修回日期: 2014-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61171120); 清华大学自主科研基金资助项目(20131089362); 国家部委重点基金资助项目(9140A07020212 JW0101)

出了出现检测延迟时间、平均检测概率和消失检测延迟时间,主要从检测角度评估算法性能,忽略了TBD算法检测和跟踪一体化的特点。

单目标模型是研究复杂多目标模型的基础,目前常用的TBD算法如动态规划、粒子滤波等大多基于单目标模型展开研究,单目标下的性能指标还可以拓展至多目标情况,因此对多目标性能评估指标的研究具有重要的参考价值。本文基于单目标模型开展了如下TBD算法性能评估研究工作:

1) 构建TBD算法性能评估通用流程。通过引入航迹提取环节,建立有目标和无目标场景下指标的统一计算模型,利用仿真数据和目标真实航迹信息获得评估指标,其中评估指标计算与具体算法无关,为算法性能比较提供了有效的途径。

2) 构建TBD算法性能评估指标体系。结合已有指标,充分考虑点迹的精确度,从单帧检测和虚警、航迹检测和虚警及计算资源等方面出发,定义了稳定检测跟踪概率和航迹虚警概率等新的性能评估指标,建立一套基于单目标模型的相对完备的性能评估指标体系。

3) 基于指标体系进行TBD算法仿真。利用所建立的指标体系评估和比较了Hough变换和递推贝叶斯滤波2种典型TBD算法的检测跟踪性能,验证了性能评估指标的有效性。

1 性能评估流程

1.1 航迹提取

文献[3-8]对目标航迹的检测、虚警通常没有考虑或考虑不够全面、合理。为了判断目标航迹是否存在,并统一有目标场景与无目标场景下的指标计算,本文在性能评估过程中引入航迹提取。航迹提取是根据航迹起始和结束判断准则从目标估计状态序列中提取航迹信息,并将航迹外的点迹判决为目标不存在状态,本文采用连续多帧相关联和连续多帧不相关联分别对航迹起始和结束进行判定:

1) 若连续 p_0 帧的量测满足关联条件,则判定航迹起始,其中连续 p_0 帧的第一帧为航迹起始帧。

2) 航迹起始之后,连续 q_0 帧的量测不满足关联条件,则判定航迹结束,连续 q_0 帧的前一帧为航迹结束帧。航迹结束与航迹起始一一对应。

其中 p_0, q_0 根据需求设定。每次航迹起始到该次航迹结束称之为一条航迹,第一条航迹编号为1,之后编号依次递增。

1.2 评估流程

为有效评估和比较TBD算法性能,本文构建了如图1所示的性能评估流程,主要包括数据源、TBD系统、航迹提取和指标计算4个部分。

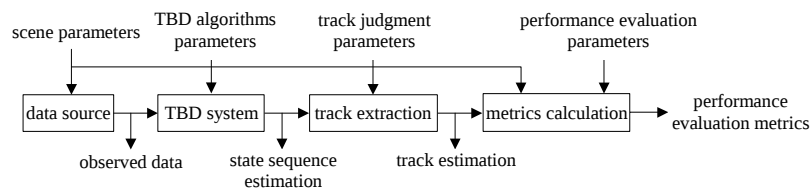


Fig.1 Performance evaluation process

图 1 性能评估流程

1) 数据源: 为便于性能分析并简化计算,本文采用时间维和距离维构成的二维复数据作为TBD系统的数据源,时间维以帧为单位,总帧数为 N ,帧周期为 T ,距离维以距离单元为单位,观测范围为 $[1, L]$ 。数据源仿真场景分为有目标场景和无目标场景2类,其中无目标场景下为纯杂波和噪声数据,有目标场景下为目标回波数据与背景杂波和噪声数据的叠加。

2) TBD处理: TBD系统对输入数据进行处理,输出目标估计状态序列 $\{\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_N\}$,即目标估计点迹序列,其中 $1 \leq \bar{r}_n \leq L+1 (n=1, 2, \dots, N)$, $\bar{r}_n = L+1$ 表示当前帧不存在目标。由于TBD系统与后续指标计算相互独立,因此评估指标计算与系统采用的具体算法无关。

3) 航迹提取: 航迹提取中的关联条件可根据目标运动模型进行设定,针对匀速直线运动目标,关联条件可以设定为 $v_{\min} \leq \bar{r}_n - \bar{r}_{n-1} \leq v_{\max}$,其中 $v_{\max}$ 和 $v_{\min}$ 表示目标速度的上限和下限,单位为距离单元/帧。

4) 指标计算: 指标计算主要是根据目标真实状态序列和目标估计航迹判断航迹为有效、丢失或虚假,计算各性能指标值,用以评估和比较算法的检测跟踪性能。

2 性能评估指标体系

传统的指标体系通常只根据航迹中点迹的数量和连续程度判断航迹有无,未充分考虑点迹的精确度,也就无

法评估航迹质量。为了定量计算不同航迹的精确度,本文提出有效航迹的概念,其判定准则如下:

1) 航迹提取后,若连续 p 帧为精确检测帧,则判定有效航迹起始。

2) 有效航迹起始之后,若连续 q 帧不为精确检测帧,则判定有效航迹结束。有效航迹结束与有效航迹起始一一对应。

其中:精确检测帧为该帧检测到目标,且估计位置在真实目标位置精确度范围 $[-d, d]$ 内, d 可根据需求设定。每次有效航迹起始到该次有效航迹结束称之为一条有效航迹,第一条有效航迹编号为1,之后编号依次递增。

图2是本文提出的性能评估指标体系,该体系由单帧检测和虚警、航迹检测和虚警及计算资源3部分组成。

航迹检测部分主要从稳定检测跟踪概率、有效航迹的跟踪精确度、响应速度和连续性4个方面定义了性能指标,航迹虚警部分考虑虚假航迹出现的概率和虚假航迹的严重程度,该体系中的指标相互独立而又互为补充,可用于综合度量TBD算法的性能,下面对各指标进行定义和说明。

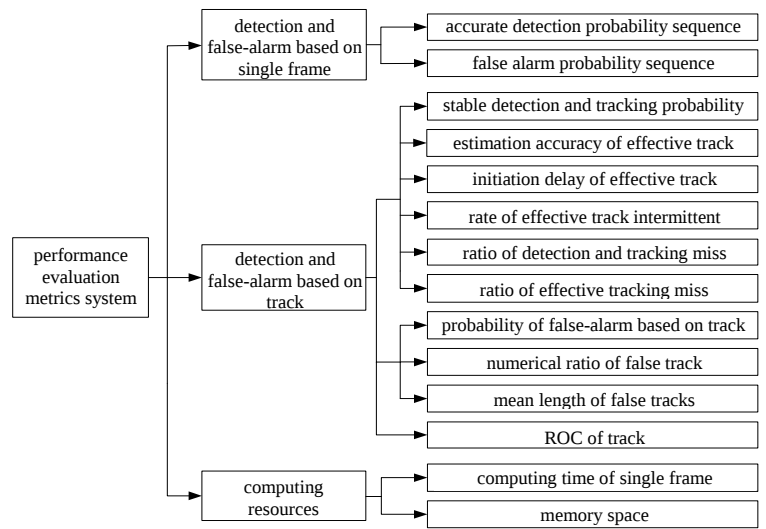


Fig.2 Performance evaluation metrics system

图2 性能评估指标体系

2.1 单帧检测和虚警

1) 精确检测概率序列/ $P_{ad,n}$

有目标时 N 帧的单帧精确检测概率构成的序列。其中单帧精确检测概率为多次蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)仿真中该帧为精确检测帧的概率。精确检测概率序列曲线的上升沿越陡,形成有效航迹的速度越快;精确检测概率序列曲线趋于稳定后的上下浮动越小,算法的稳健性越强。

2) 虚警概率序列/ $P_{f,n}$

无目标时 N 帧的单帧虚警概率构成的序列。描述每帧出现虚警的可能性,间接反映出出现航迹虚警的可能性。

2.2 航迹检测和虚警

2.2.1 有效航迹

1) 稳定检测跟踪概率/ P_{DT}

MC实验中,若有目标时有效航迹的点迹数在总点迹数中的比例超过预定比例 R_{DT} ,则称该次实验对目标实现了稳定检测跟踪,将实现稳定检测跟踪的实验次数在总实验次数中的比例称为稳定检测跟踪概率。同传统的单帧检测概率相比,该指标不再单纯考虑点迹,而是基于有效航迹的角度考虑算法对目标实现稳定检测和跟踪的概率,对检测跟踪性能进行联合评估。目标在若干帧的单帧精确检测概率都很高,并不意味着稳定检测跟踪概率也一定会很高,特别当有效航迹的点迹数在目标总点迹数中的比例总是无法达到要求的预定比例时,稳定检测跟踪概率也会很低。在以往文献中均未考虑此指标。

2) 有效航迹估计精确度/TRMSE(Root Mean Squared Error of Track)

定义有目标时有效航迹的点迹与目标真实点迹间的均方根误差为有效航迹估计精确度,其中非精确检测帧的估计误差均设定为常数 c ,一般 $c \geq d$ 。该指标描述了对目标实现有效检测跟踪时点迹的估计精确度,相比于文献[3-4]中采用的目标位置RMSE,本文提出的指标能减弱有效航迹中非精确检测帧对精确度估计的影响。

3) 有效航迹起始时延/ T_{ild}

有目标时从真实目标出现到首次航迹起始的帧时延称为有效航迹起始时延,数值上等于2个帧号的差值。该指标反映了形成首次有效航迹的速度,与文献[7]中航迹最早有效检测时间的作用相似,一般而言,批处理算法的有效航迹起始时延总是大于迭代处理算法。

4) 有效航迹断续率/RTI(Rate of Track Intermittent)

有目标时单位时间内有效航迹断续的平均次数称为有效航迹断续率。该指标反映了在总的时间内有效航迹是

否发生断续和断续的程度,体现了单位时间内有效航迹的连续性。

5) 检测跟踪漏点率/RDTM(Ratio of Detect and Tracking Miss)

有目标时非有效航迹的点迹数在总点迹数中的比例称为检测跟踪漏点率。该指标数值越大,有效航迹的点迹总数越少,算法实现有效检测和跟踪的性能越差。

6) 有效航迹漏点率/RTM(Ratio of Track Miss)

有目标时有效航迹中非精确检测的点迹数在有效航迹总点迹数中所占的比例。有效航迹漏点率描述了目标稳定检测和跟踪阶段检测和跟踪的稳定程度,有效航迹漏点率越接近0,稳定检测跟踪阶段的检测跟踪连续性越好。

2.2.2 虚假航迹

1) 航迹虚警概率/ P_{TF}

无目标时出现至少一次航迹起始的实验的次数在总的MC实验次数中所占的比例。以往文献中均未考虑此指标,相对于文献[6]中定义的错误报告,航迹虚警概率不是从点迹虚假的角度而是从航迹虚假的角度进行定义,具有更严格的限定条件,能够描述无目标情况下出现虚假航迹的可能性。

2) 虚假航迹数率/ NR_{TF}

无目标时平均每次MC实验出现的虚假航迹数。虚假航迹数率描述了无目标时虚假航迹出现的频率,其值越大,表明算法越易输出虚假航迹。

3) 虚假航迹平均长度/ L_{TF}

无目标时所有MC实验中出现的虚假航迹的长度的平均值。虚假航迹平均长度从另一角度反映了无目标场景下算法的航迹虚警特性,虚假航迹长度越长,该航迹越易被当作目标航迹处理。文献[5]曾提出虚假航迹数和虚假航迹长度2个指标,但是并未对虚假航迹做出具体的定义。

2.2.3 航迹ROC曲线/TROC(Receiver Operating Characteristic curve based on Track)

固定信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR),稳定检测跟踪概率与航迹虚警概率形成的接收机性能(ROC)曲线。传统单帧ROC曲线描述了单帧检测和虚警性能,文献[6]中全局ROC也是基于单帧检测和虚警计算检测实验概率和虚警实验概率而形成的ROC曲线,航迹ROC曲线则从航迹的角度出发,描述了算法的稳定检测跟踪性能与航迹虚警特性。

2.3 计算资源

1) 单帧运算时间/ T_C

平均每帧数据运算所需要的时间,用绝对数值或者相对比例表示。运算时间这类性能指标作为传统常用指标之一,具有重要的意义。文献[5]就采用所有MC实验算法处理所需要的总时间作为性能指标,该指标与单帧运算时间的作用相同,用于评估算法的运算效率。

2) 存储空间/ N_{MEM}

每次MC实验中数据处理需要占用存储空间,该指标和观测范围、处理帧数、算法及其参数设置等有关,一般以数值量级形式显示和比较。实际系统中,若存储空间有限,应优先考虑占用存储空间较小的算法。

3 仿真实验

3.1 场景设置

本文采用时间维和距离维构成的二维仿真数据模拟雷达回波,目标运动模型采用准径向匀速直线运动,满足

$$\mathbf{r}_n = \mathbf{F}\mathbf{r}_{n-1} + \mathbf{w}_n \quad (1)$$

式中: $\mathbf{r}_n$ 由当前帧目标所在距离单元、速度和强度构成:

$\mathbf{r}_n = [r_n, \dot{r}_n, I_n]^T$; $\mathbf{F} = [1, 1, 1]^T$; $\mathbf{w}_n = [w_{1,n}, w_{2,n}, w_{3,n}]^T$ 为过程噪声;
 $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_N]$ 为点迹矢量。确定了目标真实航迹,则第 n 帧第 l 个距离单元的回波数据为:

$$z_n^l = \begin{cases} h_n^l(\mathbf{r}_n) + \omega_n^l, & \text{有目标} \\ \omega_n^l, & \text{无目标} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $h_n^l(\mathbf{r}_n)$ 为目标对距离单元 l 的信号强度贡献; ω_n^l 为距离单元 l 的观测噪声。

表 1 场景参数

Tabel1 Scene parameters

item	value	item	value
N	100	r_0	10 range cell
L	120	v_0	1 range cell/frame
T	0.01	σ_r	0.1
N_0	0 dB	σ_v	0.001
R_{SN}	3 dB	M_1	1 000
—	—	M_2	40 000

假设观测噪声满足复高斯分布，强度为 N_0 ，目标初始时刻所在距离单元为 r_0 ，初始速度为 v_0 ，过程噪声 $w_{1,n} \sim N(0, \sigma_r^2)$ ， $w_{2,n} \sim N(0, \sigma_v^2)$ ， $w_{3,n} = 0$ ，有目标场景和无目标场景仿真次数分别为 M_1 和 M_2 ，具体参数设置见表1。

3.2 算法选择与设置

现有的TBD算法按照对多帧数据的处理方式可分为批处理和迭代处理2类，其中批处理算法以Hough变换为典型代表^[9]，迭代处理算法以递推贝叶斯滤波为典型代表^[4]。Hough变换通过将图像空间中的直线变换为参数空间中的峰值来实现有效的直线轨迹检测，适用于低维数据处理和直线轨迹、径向非机动目标检测。作为批处理算法，Hough变换需要保留所有待处理的数据，在最后时刻才能得到目标是否存在的信息，SNR较低时可能出现搜索直线与目标轨迹完全失配的情况^[9-10]。递推贝叶斯滤波利用后验概率密度进行检测和状态估计，能充分积累能量，对复杂背景下弱目标能实现较好的检测和跟踪，递推贝叶斯滤波无需存储过去的的数据，通过每帧判决输出目标估计点迹，实现边检测边跟踪^[4,11]。

本文仿真时选取Hough变换和递推贝叶斯滤波算法进行性能评估和比较。由于算法参数的设置会影响其检测跟踪性能，可通过对不同参数下算法性能指标的研究来指导参数设置，本文仅对2种算法的性能进行评估和比较，不重点研究算法的参数设置问题，所以算法参数的设置以2种算法在无目标场景下的航迹虚警概率相等为基准，文中航迹虚警概率设置为0.000 3。

3.3 性能指标计算与分析

根据图1所示的性能评估流程对2种算法分别进行测试，其中航迹判定参数和性能评估参数依据表2进行设置，Hough变换和贝叶斯滤波的性能评估指标计算结果如表3和图3~图5所示。

基于上述性能指标计算结果，分析如下：

1) 图3反映了2种算法处理方式的差异：受SNR的影响，贝叶斯滤波算法在初始时段的单帧精确检测概率很小，随着数据迭代处理的进行，不断实现能量的积累，单帧精确检测概率逐渐增大，最后趋于平稳；Hough变换于数据批处理后判决输出直线点迹，但由于目标运动存在过程噪声，其真实航迹并非理想直线，所以在一定的检测精确度下，单帧精确检测概率变化具有一定的随机性但相对平稳。

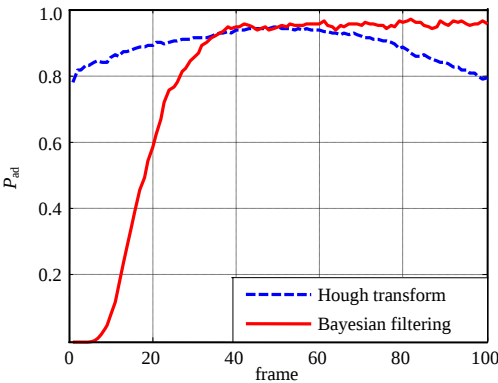


Fig.3 Accurate detection probability sequence
图3 精确检测概率序列

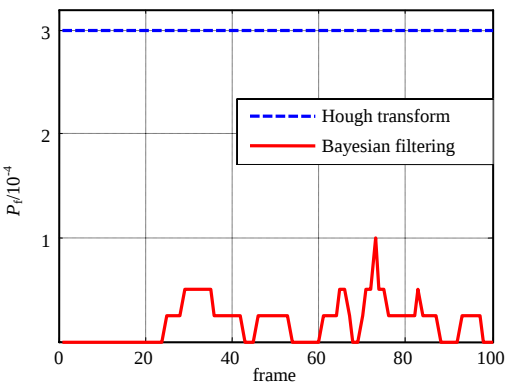


Fig.4 False alarm probability sequence
图4 虚警概率序列

2) 图4中Hough变换的单帧虚警概率为一恒定值，该值与其 P_{TF} 相同，这与Hough变换的直线输出形式相符。贝叶斯滤波则通过每帧判决输出目标估计点迹，所以每一帧的单帧虚警概率不同，虽然其单帧虚警概率一直小于Hough变换，但在不同的时刻出现了虚假航迹，所以具有同Hough变换一样的 P_{TF} 。

3) 贝叶斯滤波的 P_{DT} 大于Hough变换，且其TRMSE更小，说明此种背景和参数下贝叶斯滤波更易对目标实现稳定跟踪，且跟踪的精确度更高。

表2 航迹判定和性能评估参数
Tabel2 Track judgment & performance evaluation parameters

item	value	item	value
p_0	3	c	2
q_0	4	p	3
$v_{\min}$	0	q	3
$v_{\max}$	1.2	R_{DT}	0.60
d	1	T	0.01

表3 性能评估指标统计
Tabel3 Statistics of performance evaluation metrics

metrics	Hough transform	Bayesian filtering	unit
P_{DT}	0.937	0.982	%
T_{td}	100	18.694	frame
TRMSE	0.420 4	0.397 1	range cell
RTI	0.172	0.31	times/second
RDTM	0.107	0.202	%
RTM	0.005 7	0.026	%
NR_{TF}	3×10^{-4}	3×10^{-4}	%
L_{TF}	100	6.083	frame
T_C	0.53	12.8	ms
	1	24	—
N_{MEM}	$O(NL)$	$O(L)$	—

4) 批处理方式使得Hough变换不能快速地输出检测跟踪结果, T_{td} 等于批处理帧数, 比贝叶斯滤波形成有效航迹的响应速度要慢很多。

5) Hough变换于最后一帧判决输出一条直线点迹, 直线输出形式使Hough变换的输出结果具有很强的连续性, 主要表现为RTI, RDTM和RTM都比较小。虽然贝叶斯滤波的检测跟踪结果的连续性要差于Hough变换, 但其RTI, RDTM和RTM均不是很大, 其有效航迹也具有较好的连续性。

6) 贝叶斯滤波和Hough变换的 NR_{TF} 的大小均和 P_{TF} 相等, 说明2种算法每次发生航迹虚警时仅输出了一条虚假航迹, 但是Hough变换的 L_{TF} 远大于贝叶斯的, 所以Hough输出的虚假航迹更容易被判定为目标航迹。

7) 图5所示的TROC曲线表明在相同航迹虚警概率的前提下, 贝叶斯滤波的稳定检测跟踪概率均大于Hough变换的。其中, Hough变换的稳定检测跟踪概率和航迹虚警概率均没有达到最大值1, 这是由预处理过程、精确检测帧的精确度范围 d 和稳定检测跟踪比例 R_{DT} 共同导致的。

8) Hough变换的批处理方式使得其需要比贝叶斯滤波更大的存储空间, 二者的存储空间需求分别为 $O(NL)$ 和 $O(L)$, 但是Hough变换的单帧运算时间少于贝叶斯滤波, 其运算效率相对更高。

综上所述, 在本节所讨论的背景和参数下, 2种算法都能够在保证较低的航迹虚警概率前提下获得较高的稳定检测跟踪概率, 但递推贝叶斯滤波形成有效航迹的响应速度更快, 且稳定检测跟踪性能更好, 因此应优先采用递推贝叶斯滤波算法对此类目标进行检测跟踪处理。通过对2种典型TBD算法的比较可以看出, 本文所建立的指标体系可以对不同类型TBD算法的性能进行综合评估, 并能充分反映算法的特点。

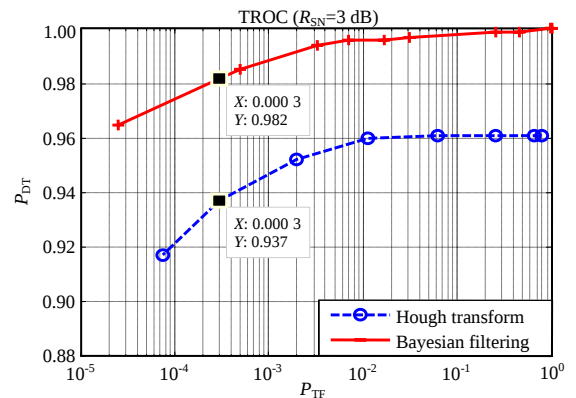


Fig.5 ROC curve of track
图 5 TROC 曲线

4 结论

针对TBD算法性能评估和比较问题, 本文构建了性能评估通用流程, 从单帧检测和虚警、航迹检测和虚警及计算资源等角度出发, 建立了一套基于单目标模型的完备的性能评估指标体系。对Hough变换和递推贝叶斯滤波2种经典算法的检测跟踪性能仿真结果证明了所述性能指标的合理性和有效性。本文工作对于TBD算法参数设置和多目标模型下的TBD算法性能评估研究具有重要的指导和借鉴意义。

参考文献:

- [1] 张长城, 杨德贵, 王宏强. 红外图像中弱小目标检测前跟踪算法研究综述[J]. 激光与红外, 2007, 37(2): 104-107. (ZHANG Chang-cheng, YANG De-gui, WANG Hong-qiang. Algorithm surveys for dim targets track-before-detect in infrared image[J]. Laser and Infrared, 2007, 37(2): 104-107.)
- [2] 吴顺君, 梅晓春. 雷达信号处理与数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. (WU Shun-jun, MEI Xiao-chun. Radar signal processing and data processing technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.)
- [3] Bruno M G S. Bayesian methods for multiaspect target tracking in image sequences[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(7): 1848-1861.
- [4] Rutten M G, Ristic B, Gordon N J. A comparison of particle filters for recursive track-before-detect[C]// 2005 8th International Conference on Information Fusion. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2005(1): 25-28.
- [5] Davey S J, Rutten M G, Cheung B. A comparison of detection performance for several Track-Before-Detect algorithms[C]// 2008 11th International Conference on Information Fusion. Cologne: IEEE, 2008: 1-8.
- [6] Davey S J, Rutten M G, Cheung B. Using phase to improve Track Before Detect[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(1): 832-849.
- [7] 刘彬. 微弱目标检测前跟踪算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010. (LIU Bin. Researches on Track-Before-Detect algorithms for weak targets[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.)
- [8] 苏金洲. 基于粒子滤波的检测前跟踪算法研究及在 GPU 平台上的实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013. (SU Jin-zhou. Researches on particle filter Track-Before-Detect and implementation on GPU[D]. Chengdu, China: University of

Electronic Science and Technology of China, 2013.)

- [9] 战立晓,汤子跃,朱振波. 雷达微弱目标检测前跟踪算法综述[J]. 现代雷达, 2013,35(4):45–52. (ZHAN Li-xiao,TANG Zi-yue,ZHU Zhen-bo. An overview on Track-Before-Detect algorithms for radar weak targets[J]. Modern Radar, 2013, 35(4):45–52.)
- [10] 王娟. 雷达微弱目标检测技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012. (WANG Juan. Study on dim moving targets detection technique for radar[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2012.)
- [11] Bruno M G S,Moura J M F. Multiframe detector/tracker: optimal performance[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001,37(3):925–945.

作者简介:



朱洁丽(1989–), 女, 安徽省安庆市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理.email:smile_zjl@163.com.

汤俊(1973–), 男, 南京市人, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为 MIMO 雷达、信息论、阵列信号处理、通用高速实时信号处理系统等.

(上接第 670 页)

- [5] OH Seung Jae,KANG Jin-young,MAENG Inhee,et al. Nanoparticle-enabled terahertz imaging for cancer diagnosis[J]. Optics Express, 2009,17(5):3469–3475.
- [6] WOODWARD R M,WALLACE V P,ARNONE D D,et al. Terahertz pulsed imaging of skin cancer in the time and frequency domain[J]. Journal of Biological Physics, 2003,29:257–261.
- [7] BEARD M C,TURNER G M,SCHMUTTENMAER C A. Terahertz spectroscopy[J]. The Journal of Chemical Physics B, 2002, 106(29):7146–7159.
- [8] NAKAJIMA Sachiko,HOSHINA Hiromichi,YAMASHITA Masatsugu,et al. Terahertz imaging diagnostics of cancer tissues with a chemometrics technique[J]. Applied Physics Letters, 2007,90:041102.
- [9] 曹丙花,侯迪波,颜志刚,等. 基于太赫兹时域光谱技术的农药残留检测方法[J]. 红外与毫米波学报, 2008,27(6):429–432. (CAO Bing-hua,HOU Di-bo,YAN Zhi-gang,et al. Method for detection of pesticide residue based on terahertz time domain spectroscopy[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008,27(6):429–432.)

作者简介:



刘乔(1973–), 男, 四川省泸州市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹光谱成像技术及其在武器物理和生物医学中的应用.email:crystal_palace@163.com.

陈志强(1988–), 男, 新疆维吾尔自治区和静县人, 硕士, 主要从事太赫兹医学领域应用研究.

雷江波(1989–), 男, 西安市人, 助理工程师, 主要从事结构设计及工艺研究.

孟坤(1984–), 男, 山东省青岛市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事太赫兹技术及其在生物医学中的应用研究.

朱礼国(1983–), 男, 四川省绵竹县人, 博士, 副研究员, 主要从事太赫兹技术、快光电技术及其在武器物理和生物医学中的应用研究.

李泽仁(1961–), 男, 四川省三台县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事快光电测试技术及其在武器物理中的应用研究.

吴军(1962–), 男, 重庆市人, 硕士, 研究员, 博士生导师, 主要从事移植免疫和烧伤创面修复研究.