远距离支援干扰下的目标跟踪技术

徐海全 王国宏 关成斌

(海军航空工程学院 信息融合技术研究所, 烟台 264001)

摘 要: 针对远距离支援干扰下雷达较难检测到干扰机掩护区域内的目标,其他区域内目标航迹不稳定的问题,提出了噪声干扰下的 PF-TBD(Particle Filter based Track Before Detect)算法和门限自适应的 MHT(Multiple Hypothesis Tracking)算法,并将这两种算法进行整合,使其能够根据雷达探测区域受干扰的程度选取相应的算法. 研究了不同雷达探测区域内目标的航迹管理. 仿真表明,此方法充分整合了两种算法的优点,提高了 20% 以上的雷达探测区域范围,兼顾了算法的时效性,同时该方法对干扰是否存在具有较强的适应性,对远距离支援干扰或其他压制干扰下目标跟踪具有一定的理论参考意义和实际应用价值.

关 键 词: 远距离支援干扰; 基于粒子滤波的检测前跟踪; 多假设跟踪; 区域划分

中图分类号: TN 957.54

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)11-1353-06

Tracking technique in the presence of standoff jamming

Xu Haiquan Wang Guohong Guan Chengbin

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In the presence of standoff jamming (SOJ), radar has low probability of target detection, which brings up the trackloss and decreases the track lifetime. Aimed at these problems, a combined target tracking approach was presented. The approach has two components: particle filter based track before detect (PF-TBD) and adaptive detection threshold selection in multiple hypothesis tracking (MHT). Track management in different region was also considered. Simulation results indicate that the approach presented takes fully advantage of TBD, meanwhile the time efficiency spent in target tracking in the whole surveillance region is considered, and it has expanded 20% of the surveillance region of radar. The resulting advantage suggests that this approach is of important reference significance for the theory and realization of tracking system in the presence of SOJ or other jamming.

Key words: standoff jamming; particle filter based track before detect; multiple hypothesis tracking; surveillance region partitioning

远距离支援干扰(SOJ, Standoff Jamming)是电子对抗中常用的一种干扰样式[1],干扰能量主要从雷达的副瓣进入,造成了目标的检测概率下降,航迹寿命短,雷达在干扰机掩护区域内较难检测到目标. 现有抗 SOJ 干扰研究主要包括:干扰下雷达探测范围的研究[2];用信号处理方法对干扰信号进行抑制的研究,如频域对消[3];压制干扰下雷达的资源配置管理研究[4-6];雷达网对干扰机跟踪研究[7-8];本文作者之一也进行了干扰源定位及定位优化研究[9-10]. 上述研究大都是针对干扰机定位跟踪与干扰效能的评估,而据本文作者了解在干扰机掩护区域(即雷达被压制区域)内如何进行目标跟踪,尚未见到相关报道. 由于干扰机掩护的目标具有较高的威胁性,因此研究如

收稿日期: 2010-06-30; **网络出版时间**: 2011-11-23 15:05; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111123.1505.003

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111123.1505.003.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61002006);"泰山学者"建设工程专项经费资助项目

作者简介: 徐海全(1979 -),男,江苏如皋人,博士生,xhq5277@163.com.

何检测和跟踪干扰机掩护区域内目标具有重要的价值.

在干扰机掩护区域内,目标回波幅度远低于干扰功率,采用传统的检测后跟踪(DBT, Detect Before Track)方法较难对此区域内的目标进行有效的检测和跟踪,而基于粒子滤波的检测前跟踪(PF-TBD, Particle Filter based Track Before Detect)算法能够检测低于检测门限的回波,具有适用于非高斯、非线性的状态模型和测量模型,也适用于检测和跟踪非匀速运动的目标[11]. 鉴于此,为了兼顾干扰掩护区域内目标的检测同时又保证整体系统的时效性,本文将 TBD 与 DBT 这两种方法进行了有机的结合,提出了一种新的跟踪方法.

1 算法原理

根据干扰下雷达在目标检测和跟踪方面的特点,可采用图 1 的算法. 首先对干扰机进行定位以及干扰功率的估计,计算目标的干信比(JSR, Jamming to Signal Ratio),利用干信比对雷达探测区域进行划分,分为干扰较强和干扰较弱区域,对干扰较强的区域采用噪声干扰下的 PF-TBD 算法,而对于干扰较弱的区域采用门限自适应的多假设跟踪(MHT, Multiple Hypothesis Tracking)方法. 最后对不同区域内目标进行航迹管理.

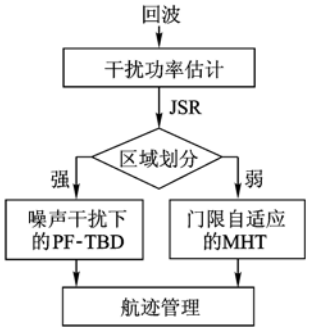


图 1 算法流程

1.1 区域划分

参考文献[4]的方法,通过对干扰机的定位、干扰机功率估计,以重点关注的一类目标为准,以雷达最小分辨单元为单位,在得到雷达的(i,j)单元的干信比 J/S 后,设雷达压制系数 K_{J},做一等干信比曲线,从而可将雷达探测区域划分成干扰较弱区域:$J/S^{(i,j)} \leqslant K_{\mathrm{J}}$ 和干扰较强区域:$J/S^{(i,j)} > K_{\mathrm{J}}$,$K_{\mathrm{J}} = \left(\frac{J}{S}\right)_{\min, P_{\mathrm{D}}=0.1}$.

利用此方法得到的雷达探测区域的划分与实际雷达环形显示器上形成的干扰扇形面在边界与面积上是不同的.

1.2 噪声干扰下 PF-TBD 算法

在对雷达探测区域进行划分后,针对 SOJ 干扰的特点,推导了噪声干扰下 PF-TBD 算法.

当没有目标时,量测只包括接收机热噪声和干扰噪声;当目标存在时,量测由目标、热噪声、干扰噪声共同产生:

$$\boldsymbol{Z}_k = \begin{cases} h(\boldsymbol{X}_k) + W_{\mathrm{J}} + W_{\mathrm{R}} & E_k = 1 \\ W_{\mathrm{J}} + W_{\mathrm{R}} & E_k = 0 \end{cases} \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{X}_k$ 为 k 时刻系统状态向量:$\boldsymbol{X}_k = [x_k, \dot{x}_k, y_k, \dot{y}_k]^{\mathrm{T}}$ 分别是目标的 X 方向位置、X 方向速度、Y 方向位置、Y 方向速度.

设干扰噪声 $W_{\mathrm{J}} \sim N(0, \sigma_{\mathrm{J}}^2)$,接收机内部热噪声 $W_{\mathrm{R}} \sim N(0, \sigma_{\mathrm{R}}^2)$,且 $\sigma_{\mathrm{J}} \gg \sigma_{\mathrm{R}}$.

在压制干扰下,噪声已经不单纯由接收机热噪声引起,而是由干扰噪声与热噪声共同作用. 利用正态分布的可加性,这里令 $W_{C,k} = W_{\mathrm{J}} + W_{\mathrm{R}}$,则 $W_{C,k} \sim N(0, \sigma_{\mathrm{J}}^2 + \sigma_{\mathrm{R}}^2)$,式(1)可以写成

$$\boldsymbol{Z}_k = \begin{cases} h(\boldsymbol{X}_k) + W_{C,k} & E_k = 1 \\ W_{C,k} & E_k = 0 \end{cases} \tag{2}$$

在 k 时刻,经过 I, Q 双通道后,设雷达量测 $\boldsymbol{Z}_k = \{z_k^{ijl}\}$,目标的复幅度 $z_k^{ijl} = |z_{A,k}^{ijl}|^2$,$\boldsymbol{W}_{C,k} = \{n_{C,k}\}$. 则

$$z_{A,k}^{ijl} = A_k h_{A,k}^{ijl}(\boldsymbol{X}_k) + n_{C,k}^{ij} \tag{3}$$

A_k, n_k'分别为复幅度和复高斯白噪声,

$$A_k = \tilde{A}_k \mathrm{e}^{\mathrm{i}\varphi_k} \quad \varphi_k \in [0, 2\pi]$$

$$n_{C,k}^{ij} = n_{C,Ik}^{i,j} + \mathrm{i} n_{C,Qk}^{i,j}$$

其中,$n_{C,Ik}, n_{C,Qk}$ 为独立的高斯白噪声,均服从 $N(0, \sigma_{\mathrm{J}}^2 + \sigma_{\mathrm{R}}^2)$.

距离,多普勒,方位分辨单元(i,j,l)回波形式可以描述为

$$h_{A,k}^{ijl}(\boldsymbol{X}_k) = \exp\left[-\frac{(r_i - r_k)^2}{2R} L_r - \frac{(d_j - d_k)^2}{2D} L_d - \frac{(b_i - b_k)^2}{2B} L_b \right] \tag{4}$$

其中,$i = 1, 2, \cdots, N_r$;$j = 1, 2, \cdots, N_d$;$l = 1, 2, \cdots, N_b$;R, D, B 表示距离-多普勒-方位单元的各个元素的大小;L_r, L_d, L_b 表示各单元元素的衰减常数;$r_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2}$,$d_k = \frac{x_k \dot{x}_k + y_k \dot{y}_k}{r_k}$,$b_k = \arctan\left(\frac{y_k}{x_k}\right)$.

建立了量测模型后,干扰环境下的 PF-TBD 算法其似然函数、状态似然比、粒子权重与普通的 PF-TBD 算法相同,普通的 PF-TBD 算法可参考文献[11],这里不再进行阐述.

1.3 门限自适应的 MHT 算法

假设 k 时刻,第 l 个分辨单元接收机虚警概率[4]为

$$P_{F,k}^{l} = \exp\left(-\frac{10^{(\rho_{\mathrm{th},k}^{l}/10)}}{\gamma_0(\Sigma_k^{l})^2+1}\right) \tag{5}$$

$\rho_{\mathrm{th},k}^{l}$为归一化检测门限.

设虚警概率期望值 $\bar{P}_{\mathrm{fa}}$,假设一个因子 ε,则检测门限

$$\rho_{\mathrm{th},k}^{l} = \begin{cases} 10\lg(-(\hat{\gamma}_k(\Sigma_k^{l})^2+1)\ln(\varepsilon\bar{P}_{\mathrm{fa}})) & \hat{\gamma}_k > 0 \\ 10\lg(-\ln\bar{P}_{\mathrm{fa}}) & \hat{\gamma}_k = 0 \end{cases} \tag{6}$$

检测概率:

$$P_{D,k}^{l} = \begin{cases} (\varepsilon\bar{P}_{\mathrm{fa}})^{\frac{\gamma_0(\Sigma_k^{l})^2+1}{\gamma_0(\Sigma_k^{l})^2+1+\overline{(S/N)}}} & \hat{\gamma}_k > 0 \\ (\bar{P}_{\mathrm{fa}})^{\frac{1}{1+\overline{(S/N)}}} & \hat{\gamma}_k = 0 \end{cases} \tag{7}$$

其中,$\overline{(S/N)}$是目标的平均信噪比.

在干扰条件下,对 $\bar{P}_{\mathrm{fa}}$乘以一个因子,改善由于 $\hat{\gamma}_k$ 变大造成的检测门限提高对检测概率的影响,同时也减小了雷达网的盲区系数(雷达受干扰后可探测面积的减少量与未受干扰时的面积比). 当然其不可避免的给后续的 MHT 算法带来虚警增高的问题. 因子 ε 的选择必须兼顾两个方面:在干扰情况下目标的检测概率不能太低,同时不能使虚警率太高,从而使雷达数据处理饱和;在 MHT 算法里设置不同的航迹后验概率门限,对低于此门限的航迹进行删除,对于包含较大因子 ε 量测组成的航迹采用较大的门限. MHT 算法详细过程可参考文献[12].

1.4　航迹管理

这里的航迹管理与传统的雷达航迹管理基本相同,其不同之处在于目标经过不同的干扰区域时航迹如何起始、维持与撤销. 这里根据目标所处区域变化分为两种:第 1 种是目标从干扰较强区域进入干扰较弱区域;第 2 种相反即目标从干扰较弱区域进入干扰较强区域. 设 k 时刻目标的位置估计 $\hat{\boldsymbol{X}}_{k|k}^{m,n}$,$m=1,2,\cdots,m_k$,其中 m 为目标的序号,n 为目标所属区域序号,$n=1,2$. 1 表示属于干扰较弱区域,2 表示干扰较强区域.

对于第 1 种区域变化,如果量测 $\boldsymbol{z}_{k+1}$满足[13]

$$[\boldsymbol{z}_{k+1}+\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1|k}^{m,1}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_{k+1}^{-1}[\boldsymbol{z}_{k+1}-\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1|k}^{m,1}] \leqslant \gamma_{\mathrm{G}} \tag{8}$$

则为侯选回波,以此量测为航迹的更新值. 其中,参数 γ_{G} 由 χ^2 分布表获得;$\boldsymbol{\Sigma}_{k+1} = \frac{1}{9}T^2V_{\max}^2\boldsymbol{I} + \boldsymbol{R}_{k+1}$,$T$ 为采样周期,$V_{\max}$为目标最大速度,$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵,$\boldsymbol{R}_{k+1}$为 $k+1$ 时刻量测噪声协方差.

对于第 2 种区域变化,由于前一个时刻已经探测到目标的位置信息,所以可以采用一种改变粒子初始分布范围的方法,即在如下区域内均匀产生粒子:

$$[\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1|k}^{m,2}(i) - K_{\mathrm{G}}\sqrt{\boldsymbol{S}_{k+1}(i,i)}, \hat{\boldsymbol{X}}_{k+1|k}^{m,2}(i) + K_{\mathrm{G}}\sqrt{S_{k+1}(i,i)}] \quad i=1,2,\cdots,n_z \tag{9}$$

其中,$\boldsymbol{z}_{k+1}(i)$,$\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1|k}^{m,2}(i)$分别表示对应向量的第 i 个分量;K_{G}为波门常数,在实际应用中往往取较大的 K_{G}值($K_{\mathrm{G}} \geqslant 3.5$);$n_z$ 是量测维数. 如果检测到目标,则以此进行航迹更新. 此种粒子初始化分布方法由于利用了上一时刻的信息,能够有效地减小干扰较强区域内 TBD 方法的计算时间.

2　实验仿真

2.1　仿真 1:干扰下算法跟踪性能

仿真条件:设二维雷达位于坐标原点,$\bar{P}_{\mathrm{fa}} = 10^{-4}$. 雷达与干扰机参数取值见表 1. 设重点关注的一类目标截面积为 2 m^2,设其为 Swerling I 型起伏目标.

表 1　干扰机与雷达参数

参数	取值	参数	取值
P_t/kW	300	λ/cm	2
G/dB	40	P_j/kW	40
σ_0/m^2	2	B_j/MHz	50
τ/μs	50	G_j/dB	30
L/dB	1.5	L_j/dB	0.5
ΔR/m	100	$\Delta\theta$/(°)	0.5
T_0/K	290	F_n	2

干扰机与目标运动轨迹如图 2 所示(图中的等干信比曲线是某个时刻干扰机位于(180 km, 180 km)时给出的).

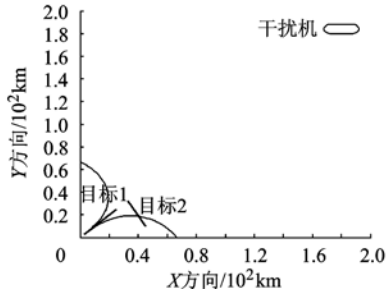


图 2　目标通过不同的干扰区域运动轨迹

两目标均为匀速直线运动,目标 1 从干扰较强区域进入干扰较弱区域,目标 2 从干扰较弱区域进入干扰较强区域. 两目标初始状态分别为

$$\boldsymbol{X}_1(0) = [25\,000, -220, 25\,000, -220]^{\mathrm{T}}$$

$\boldsymbol{X}_2(0) = [45\,000, -120, 10\,000, 220]^{\mathrm{T}}$

在干扰较强区域,粒子滤波参数设置为:粒子初始位置(x_0, y_0)在各空间内均匀分布,粒子初始速度$(\dot{x}, \dot{y})$在$[-340, -100] \times [-0.02, 0.02]$ m/s 内均匀分布,粒子初始回波功率服从均匀分布,粒子数 $N = 4\,000$,粒子初始存在概率 $\mu_0 = 0.05$,粒子的存在状态转移矩阵 $\boldsymbol{\Pi} = \begin{bmatrix} 0.95 & 0.05 \\ 0.05 & 0.95 \end{bmatrix}$.

在干扰较弱区域,当因子 $\varepsilon > 10$ 时 MHT 的航迹后验概率门限设为 0.01,其他情况设为 0.000 5.

蒙特卡洛次数为 20,仿真步长为 100,采样周期 T 为 1 s.

仿真结果:图 3 是某个时刻下探测区域的划分,两条区域划分曲线分别是 -8 dB 等干信比曲线和 0 dB 等干信比曲线. 经过大量仿真实验,PF-TBD 算法对于干信比在 0 dB 以下的目标检测和跟踪效果相对较好且计算时间较短,鉴于此特点本文仿真中着重研究了干信比在 0 dB 以下的区域,当然 PF-TBD 算法理论上还可以检测和跟踪干信比更高的目标. 图 4 和图 5 给出了目标 1 和目标 2 的跟踪轨迹,图 6 和图 7 是目标 1 和目标 2 的跟踪精度,图 8 和图 9 是干扰较强区域下目标 1 和目标 2 的检测概率. 图 10 是干扰较弱区域内采用门限自适应的 MHT 算法时,选用不同因子 ε 时目标的检测概率与虚警强度.

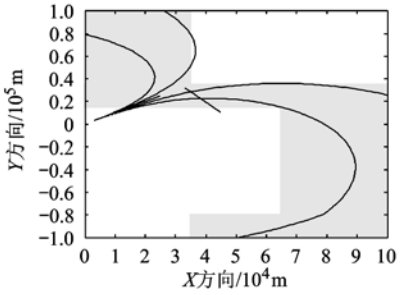
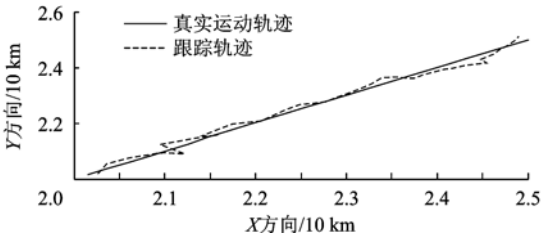


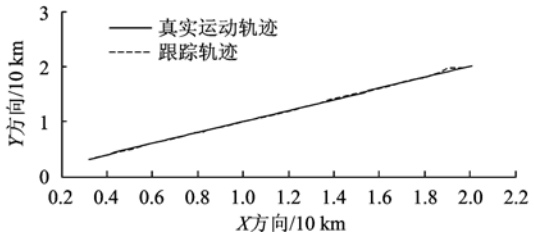
图 3 利用分辨单元划分雷达干扰区域示意图

仿真分析:从图 6 和图 7 可见,在干扰较强区域内采用 PF-TBD 算法的目标精度略差于干扰较弱区域,但仍可以较连续地跟踪目标,而采用常规方法在此区域内则不能进行有效的目标跟踪. 通过比较这两个图可知,由于目标 2 的干信比较高,其跟踪精度略差于目标 1. 在干扰较弱区域时,采用门限自适应的 MHT 方法能够较连续地跟踪目标.

从图 8 和图 9 中可见,在干扰较强区域,DBT 方法其检测概率是很低的,而采用基于 PF-TBD

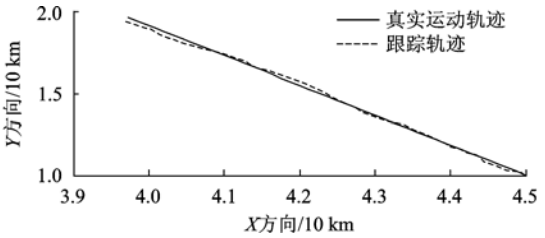


a 干扰较强区域内目标 1 跟踪轨迹

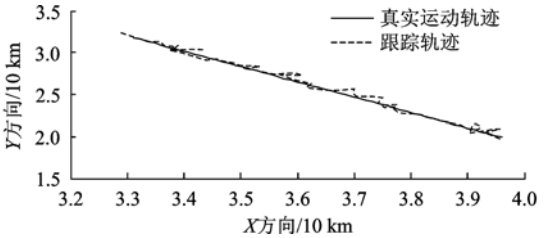


b 干扰较弱区域内目标 1 跟踪轨迹

图 4 目标 1 的真实运动轨迹和滤波轨迹



a 干扰较弱区域内目标 2 跟踪轨迹



b 干扰较强区域内目标 2 跟踪轨迹

图 5 目标 2 的真实运动轨迹和滤波轨迹

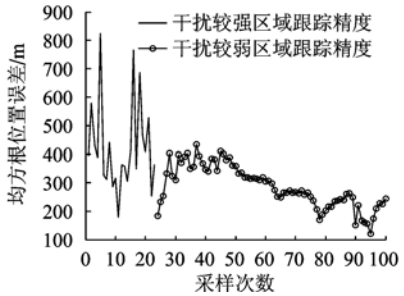


图 6 目标 1 的跟踪精度

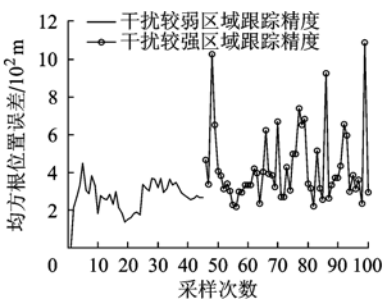


图 7 目标 2 的跟踪精度

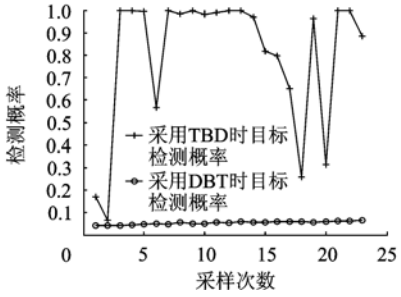


图 8　干扰较强区域下目标 1 的检测概率

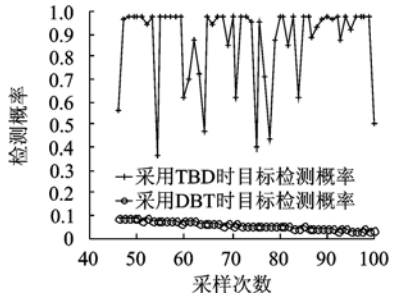
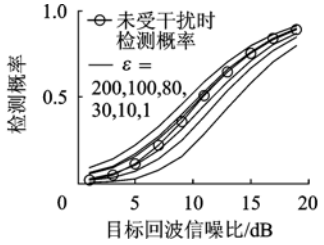
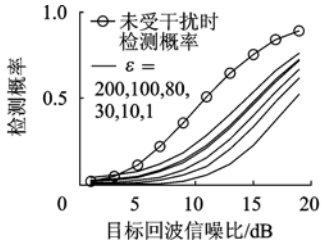


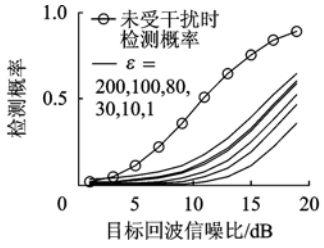
图 9　干扰较强区域下目标 2 的检测概率



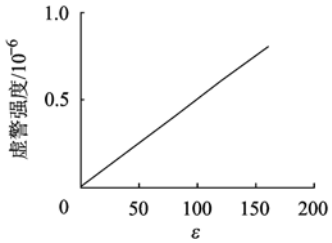
a　$\gamma=1$



b　$\gamma=2$



c　$\gamma=3$



d　虚警强度与因子 ε 关系

图 10　不同干扰能量级别下目标检测概率以及不同虚警强度与因子 ε 关系

方法则可以较好地检测目标. 同时通过比较这两个图可知,因为目标 1 的干信比低于目标 2,所以采用 TBD 算法时,目标 2 的检测概率起伏较大.

从图 10a 可以看出当 ε 增加,其检测概率是增加的,当因子选择较大时如 80,检测概率和未受干扰时相近. 比较 $\varepsilon=10$ 和 $\varepsilon=1$ 的曲线,可知检测概率改善较明显. 在 $80>\varepsilon>30$,检测概率改善效果不明显,且从图 10d 可以看出虚警强度却是随着因子 ε 成线性增加的,因此权衡考虑,将因子选为 30. 通过比较图 10a ~ 图 10c 可以看出随着 γ 的增大,目标的检测概率是不断降低的,但通过增加因子,检测概率还是得到了一定的改善的,但是虚警也是较高的.

2.2　仿真 2:算法的探测区域与计算时间

仿真条件:仿真条件同上.

仿真结果:表 2 是不同的等干信比曲线所包围的区域占整个雷达未受干扰探测区域的比例,以及平均检测概率(采用蒙特卡洛仿真 30 次,能够检测出目标的次数占蒙特卡洛仿真次数的百分比)关系.

表 2　不同等干信比曲线时探测区域与检测性能

算　法	MHT	TBD(粒子数 4000)			
JSR/dB	-8	-5	-3	0	5
探测区域/%	69.13	78.91	82.70	85.61	88.26
平均检测概率	0.96	0.75	0.45	0.31	0.12

表 3 是在不同情形时利用如下两种方法进行仿真所需时间的对比. 方法 1 即雷达探测范围内全部采用 PF-TBD 算法(粒子数 4000);方法 2 即本文方法. 情形 1:目标采样 100 次,都位于干扰较强区域. 情形 2:目标采样 100 次,都位于干扰较弱区域. 情形 3:目标采样 100 次,前 50 次在干扰较强区域,后 50 次在干扰较弱区域. 三种情形下目标均为匀速直线运动,初始状态分别如下:

$$\boldsymbol{X}_1(0)=[35\,000,300,20\,000,0]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{X}_2(0)=[35\,000,300,0,0]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{X}_3(0)=[50\,000,300,18\,000,0]^{\mathrm{T}}$$

表 3　两种方法计算时间比(设方法 2 耗时为 1)

方法	1	2
情形 1	1.00	1
情形 2	257.50	1
情形 3	1.99	1

仿真分析:通过表 2 可见,采用 PF-TBD 方法明显地提高了干扰下雷达的有效探测区域,当采用 TBD 方法检测干信比小于 0 dB 区域内目标时可以提高 16.48% 的探测区域,当采用 TBD 方法检测干信比小于 5 dB 时可以提高 19.13% 的探测

区域.

从表3 可以看出,TBD 计算时间是较长的,如果在全区域内使用 TBD 其计算量较大. 表 3 中只对单个目标进行了对比,当目标增加时,方法 1 的计算量将成倍增加,表中只给出了几种特例,但已经足够说明划分探测区域的必要性.

3 结束语

本文提出了一种整合 PF-TBD 和门限自适应的 MHT 算法来处理干扰下目标检测和跟踪,经仿真验证此方法实现了干扰机掩护区域内目标跟踪,有效地扩大了雷达的探测区域,提高了目标航迹的稳定性,同时又兼顾了系统的计算量,能自适应地处理干扰或非干扰情况下目标的检测和跟踪. 当然在研究过程中,本文对一些条件进行了简化处理,如何将其与实际雷达进一步结合,将是下一步研究的重点.

参考文献 (References)

[1] Schleher D C. Electronic warfare in the information age[M]. Boston London: Artech House, 1999: 139

[2] 申绪涧,王国玉,汪连栋,等. 电子干扰飞机对抗警戒雷达组网系统的效果评估[J]. 系统仿真学报,2008,20(4):997 - 1000
Shen Xujian, Wang Guoyu, Wang Liandong, et al. Effect evaluation for electronic jamming aircraft against netted surveillance radars[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(4): 997 - 1000 (in Chinese)

[3] 杜东平,唐斌. 基于频域对消的噪声调幅干扰抑制算法[J]. 电子与信息学报,2007,29(3):557 - 559
Du Dongping, Tang Bin. A high performance algorithm of noise amplitude modulation interference suppression based on frequency domain cancellation[J]. Journal of Electronics &Informaiton Technology, 2007, 29(3): 557 - 559 (in Chinese)

[4] Kirubarajan T, Bar-Shalom Y, Blair W D, et al. IMMPDAF for radar management and tracking benchmark with ECM[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(4): 1115 - 1132

[5] Blair W D, Watson G A, Kirubarajan T, et al. Benchmark for radar allocation and tracking in ECM[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(4): 1097 - 1114

[6] 王国宏,钟晓军. 有源压制性干扰情况下的机载多传感器管理[J]. 电光与控制, 2004, 11(3): 1 - 4
Wang Guohong, Zhong Xiaojun. Airborne multi-sensor management in the presence of suppressive active jamming[J]. Electronics Optics & Control, 2004, 11(3): 1 - 4 (in Chinese)

[7] Blanding W, Koch W, Nickel U. Tracking through jamming using negative information[C] // 9th International Conference on Information Fusion. Florence, Italy, Piscalaway, NJ: IEEE Service Center, 2006: 1 - 8

[8] 宋小全,孙仲康. 组网雷达在干扰条件下的跟踪[J]. 现代雷达,1997,19(2):12 - 18
Song Xiaoquan, Sun Zhongkang. Radar network target tracking in a jamming environment[J]. Modern Radar, 1997, 19(2): 12 - 18 (in Chinese)

[9] 白晶,王国宏,王娜,等. 测向交叉定位系统中的最优交会角研究[J]. 航空学报,2009,30(2):298 - 304
Bai Jing, Wang Guohong, Wang Na, et al. Study on optimum cut angles in bearing-only location systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(2): 298 - 304 (in Chinese)

[10] Wang G H, Bai J, He Y, et al. Optimal development of multiple passive sensors in the sense of minimum concentration ellipse [J]. IET Radar Sonar Navig, 2009, 2 (3): 8 - 17

[11] Ristic R, Arulampalam S, Gordon N. Beyond the Kalman filter-particle filters for tracking applications [M]. Boston-London: Artech House, 2004

[12] Blackman S S, Popoli R. Dsigen and analysis of modern tradcking systems[M]. Boston London: Artech House, 1999: 1075

[13] 何友,修建娟,张晶炜,等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006:84
He You, Xiu Jianjuan, Zhang Jingwei. et al. Radar data processing with applications[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006: 84 (in Chinese)

(编 辑:娄 嘉)