

# 压制干扰下雷达网点目标概率多假设跟踪算法

李世忠<sup>1,2</sup>, 王国宏<sup>1</sup>, 白晶<sup>1</sup>, 吴巍<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院信息融合技术研究所, 264001, 山东烟台; 2. 中国人民解放军 91445 部队, 116043, 辽宁大连)

**摘要:** 针对压制干扰下雷达网跟踪中使用概率多假设跟踪(PMHT)算法航迹丢失率高的问题, 提出了一种基于数据压缩的雷达网点目标概率多假设跟踪(DC-PPMHT)算法. 该算法先将各雷达在压制干扰下由于检测概率下降出现目标暂消的量测数据在空间对准后进行串行合并和点迹合成, 并计算数据压缩后各量测点迹的检测概率, 然后把计算得到的压缩点迹和检测概率送入点目标 PMHT 滤波器中进行跟踪. DC-PPMHT 算法在压制干扰下的雷达网跟踪中可以降低航迹丢失率, 提高航迹跟踪的精度. 仿真结果表明, 与 PMHT 算法相比, DC-PPMHT 算法在各雷达采取抗干扰措施前、后的航迹丢失率分别降低了 4.7% 和 1.2%.

**关键词:** 雷达网; 压制干扰; 检测概率; 点目标概率多假设跟踪

**中图分类号:** TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)10-0101-06

## A Tracking Algorithm with Multiple Probabilities Hypothesis for Radar Network Point Target in the Presence of Suppressive Jamming

LI Shizhong<sup>1,2</sup>, WANG Guohong<sup>1</sup>, BAI Jing<sup>1</sup>, WU Wei<sup>1</sup>

(1. Institute of Information Fusion Technology, Naval Aeronautics and Astronautics University, Yantai, Shandong 264001, China;  
2. Unit 91445 of PLA, Dalian, Liaoning 116043, China)

**Abstract:** To solve the high track-loss problem of the probabilistic multiple hypothesis tracking (PMHT) algorithm when it is used in radar network with the presence of suppressive jamming, a tracking algorithm named point target probabilistic multiple hypothesis based on data compression (DC-PPMHT) for radar network is proposed. As a result of signal to interference ratio descending, radar's measurement temporarily vanishes because of low detection probability in the presence of stand off jamming. The tracking algorithm serially merges and compresses the measurement of radar network after coordinate conversion, and then calculates the detection probability of the compressed measurement. In the end, the radar network tracks the target with compressed data and detection probability using the point target probabilistic multiple hypothesis tracking algorithm. When the proposed tracking algorithm is used, the radar network can reduce the track-loss percentage and improve the precision of target tracking in the presence of stand off jamming. Simulation results show that before and after radars taking anti-jamming measures, radar network's track-loss percentage of DC-PPMHT is reduced by 4.7 % and by 1.2 % compared with PMHT.

**Keywords:** radar network; suppressive jamming; detection probability; point target probabilistic multiple hypothesis tracking

压制干扰作为雷达干扰的一种主要手段,严重制约和限制了雷达检测跟踪性能的发挥,对雷达的生存构成了严重威胁,在大功率集中式压制干扰下如何对目标进行检测与跟踪是一个难点. 研究者们在对压制干扰下单部雷达目标检测与跟踪进行研究的文献中,提出了检测门限的自适应选取和波形控制<sup>[1]</sup>、经验模式分解<sup>[2]</sup>、量测预测<sup>[3]</sup>和共形阵列的动态分区<sup>[4]</sup>等方法. 但是,单部雷达很难与大功率集中式压制干扰全面抗衡,因此雷达组网是雷达抗干扰的有效途径.

现有的干扰条件下利用雷达网对目标进行跟踪的算法主要有分布式干扰下雷达网基于数据压缩的多假设跟踪(MHT)算法<sup>[5]</sup>和压制干扰下扩展的伪线性滤波与联合概率数据关联(JPDA)结合的跟踪算法<sup>[6]</sup>,但这2种多目标跟踪方法列举和评估量测和航迹之间所有可能的分配方法,计算量随着目标数量和量测数量的乘积而增长,难以满足实时跟踪的要求. 概率多假设跟踪(PMHT)算法<sup>[7-12]</sup>是一种可以满足计算要求的杂波环境中的多目标跟踪算法,这种算法去掉了MHT算法中点目标的限制,计算量随着目标数量、量测数量线性增长,但PMHT算法采用的参数模型认为量测都是有效的,这种假设与实际不符,因而该算法容易受杂波和干扰的影响<sup>[10-11]</sup>,尤其是在干扰条件下雷达检测概率降低出现目标暂消时,使用PMHT算法跟踪点目标的航迹丢失率较高. 为此,文献[8]提出了一种基于点目标的单传感器概率多假设跟踪算法(PPMHT),但该算法针对的是单传感器目标跟踪,无法直接应用于干扰条件下雷达网的目标跟踪.

本文通过计算雷达网在压制干扰下的目标检测概率,在单传感器PPMHT算法的基础上提出了一种压制干扰下基于数据压缩的雷达网点目标概率多假设跟踪(DC-PPMHT)算法,能够有效降低压制干扰下雷达网跟踪中的航迹丢失率,提高跟踪精度.

## 1 基于数据压缩的雷达网点目标概率多假设跟踪算法

本文针对概率多假设跟踪算法容易受杂波和干扰影响而丢失航迹这一不足,通过对组网雷达量测数据进行压缩并计算综合检测概率,在文献[8]PPMHT算法的基础上提出了组网雷达在压制干扰下基于数据压缩的点目标概率多假设跟踪算法——DC-PPMHT算法,算法的流程如图1所示. 对于各

雷达在压制干扰下由于检测概率下降出现目标暂消现象的量测数据,采用集中式融合方法,在空间对准后进行串行合并和点迹合成,并计算数据压缩后各量测点迹的检测概率,然后把计算得到的点迹数据和检测概率送入PPMHT滤波器中进行跟踪.

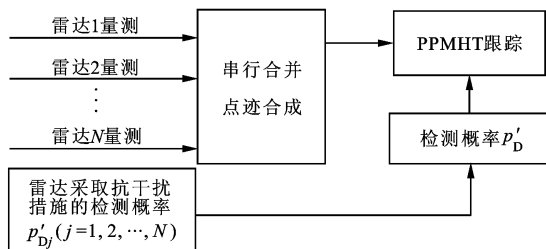


图1 压制干扰下基于数据压缩的雷达网点目标概率多假设跟踪算法框图

### 1.1 雷达网串行合并和点迹合成

针对组网各雷达对目标观测不同步和有时会出现目标暂消的情况,在某雷达单独观测时,采用单雷达PPMHT滤波方法;在多雷达重叠观测区,按照各雷达量测的时间顺序,先到的量测点先进行滤波,当多部雷达的观测数据在时间上重合时,则采用误差协方差加权的方法进行数据压缩. 本文中压制干扰下组网雷达量测串行合并与点迹合成原理如图2所示.

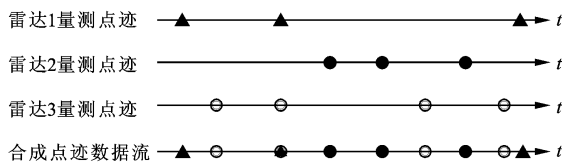


图2 压制干扰下组网雷达量测串行合并与点迹合成示意图

当组网雷达量测点迹在时间上没有重合时采用串行合并的方法,根据组网雷达量测点的时间顺序,串行合并后在 $t_i$ 时刻的量测 $\mathbf{Z}(t_i)$ 和检测概率 $p'_{D}(t_i)$ 分别为

$$\mathbf{Z}(t_i) = \mathbf{Z}_j(t_i), \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$p'_{D}(t_i) = p'_{Dj}(t_i), \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中: $N$ 表示雷达的数量; $p'_{Dj}(t_i)$ 表示在 $t_i$ 时刻有量测的第 $j$ 部雷达采取抗干扰措施后的检测概率.

当组网雷达量测点迹在时间上重合时采用点迹合成的方法,即经过坐标变换和采用最近邻域法进行点迹-点迹互联后,假设组网雷达在 $t_i$ 时刻对同一目标的测量向量共有 $M$ 个,即 $\mathbf{Z}_1(t_i), \mathbf{Z}_2(t_i), \dots, \mathbf{Z}_M(t_i)$ ,相对应的测量误差协方差分别为 $\mathbf{R}_1(t_i), \mathbf{R}_2(t_i), \dots, \mathbf{R}_M(t_i)$ ,通过加权的方式得到其融合的

## 位置数据和协方差数据

$$\mathbf{Z}(t_i) = \mathbf{R}(t_i) \sum_{j=1}^M \mathbf{R}_j^{-1}(t_i) \mathbf{Z}_j(t_i) \quad (3)$$

$$\mathbf{R}(t_i) = \left[ \sum_{j=1}^M \mathbf{R}_j^{-1}(t_i) \right]^{-1} \quad (4)$$

点迹合成后的检测概率为

$$p'_D(t_i) = 1 - (1 - p'_{D1}(t_i)) \cdot (1 - p'_{D2}(t_i)) \cdots (1 - p'_{DM}(t_i)) \quad (5)$$

从式(3)、(4)可以看出:点迹合成的结果是各雷达的量测按精度加权,本质上是数据求精。

## 1.2 压制干扰下雷达采取抗干扰措施

检测概率  $p'_{Dj}$  的求解模型

压制干扰下雷达的检测概率由雷达接收机输出端(常为中放输出端)的信干比决定,信干比取决于从目标反射回来的回波信号功率、干扰信号功率和噪声功率。假设雷达与目标之间的距离为  $R_t$ , 雷达天线主瓣增益为  $G_0$ , 目标与干扰机之间的夹角为  $\theta_j$ , 雷达与干扰机之间的距离为  $R_j$ , 雷达、压制干扰机和目标之间的空间关系如图 3 所示。

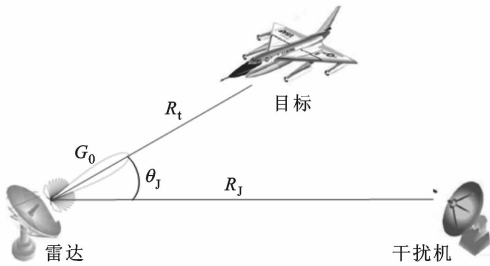


图 3 雷达、压制干扰机和目标之间的空间关系

雷达接收机输出端的信干比为

$$R_{SJ} = \frac{P_{rs}}{P_{rj} + N_0} \quad (6)$$

式中:  $P_{rs}$  和  $P_{rj}$  分别为雷达收到的目标回波信号功率和干扰信号功率;  $N_0$  为噪声功率。

$$P_{rs} = \frac{P_t G_0^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_t^4} \quad (7)$$

$$P_{rj} = \frac{P_j G_j G_t(\theta_j) \lambda^2 \gamma_j}{(4\pi)^2 R_j^2} \quad (8)$$

式中:  $P_t$  为雷达发射的峰值功率;  $\lambda$  为波长;  $\sigma$  为雷达反射截面(RCS);  $P_j$  为干扰发射功率;  $G_j$  为干扰发射天线增益;  $G_t(\theta_j)$  为雷达天线在干扰方向的增益;  $\gamma_j$  为干扰信号与雷达信号的极化失配损失系数。

以目标起伏服从 Swerling II 型分布为例进行分析, 截面积概率密度函数为

$$p(\sigma) = \frac{1}{\bar{\sigma}} \exp(-\sigma/\bar{\sigma}) \quad (9)$$

式中:  $\bar{\sigma}$  为目标起伏全过程雷达反射截面积的平均值。

检测概率求解公式<sup>[13]</sup>为

$$p_{Dj} = 1 - \Gamma_1\left(\frac{V_T}{1 + R_{SJ}}, n_p\right); \quad n_p \leq 50 \quad (10)$$

式中:  $p_D$  表示检测概率;  $V_T$  表示检测门限;  $R_{SJ}$  表示信干比;  $\Gamma_1(x, N) = \int_0^x \frac{e^{-v} v^{N-1}}{(N-1)!} dv$ ;  $n_p$  表示非相干积累脉冲数; 检测门限  $V_T$  可由下列递推公式得出

$$V_{T,m} = V_{T,m-1} - \frac{G(V_{T,m-1})}{G'(V_{T,m-1})}; \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

其中函数  $G$  和  $G'$  为

$$G(V_{T,m}) = (0.5)^{n_p/n_{fa}} - \Gamma_1(V_T, n_p) \quad (12)$$

$$G'(V_{T,m}) = -\frac{e^{-V_T} V_T^{n_p-1}}{(n_p-1)!} \quad (13)$$

递推的初始值为

$$V_{T,0} = n_p - (n_p)^{1/2} + 2.3(-\log P_{fa})^{1/2} \cdot ((-\log P_{fa})^{1/2} + (n_p)^{1/2} - 1) \quad (14)$$

式中:  $n_p$  为脉冲积累数;  $P_{fa}$  为雷达虚警概率;  $n_{fa}$  为虚警数。

同理, 对于目标起伏模型服从 Swerling I、III、IV、V 型分布的情况, 雷达检测概率的计算可以使用类似的方法推导。

雷达组合抗压制干扰措施中的各种措施可以认为是串联的, 如图 4 所示。

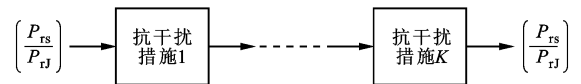


图 4 单部雷达组合抗压制干扰措施框图

因此, 单部雷达采用组合抗压制干扰措施的抗干扰改善因子为

$$F_{AJ} = \prod_{i=1}^K F_{AJi} \quad (15)$$

式中:  $F_{AJi}$  为组合抗干扰措施中第  $i$  个抗干扰措施的抗干扰改善因子。

单部雷达采用  $K$  种抗压制干扰措施后的信干比为

$$R_{SJ} \triangleq \left( \frac{P_{rs}}{P_{rj}} \right)_K = F_{AJ} \left( \frac{P_{rs}}{P_{rj}} \right) \quad (16)$$

把信干比  $R_{SJ}$  代入式(10), 即可计算得到雷达采取抗压制干扰措施后的检测概率  $p'_{Dj}$ 。

## 1.3 基于点目标的概率多假设跟踪算法

基于点目标的概率多假设跟踪算法(PPMHT)

框图如图5所示,PPMHT算法具体的推导过程可参考文献[8].由图5可以看出,PPMHT算法目标轨迹的估计与数据互联概率的计算是分开进行的,状态和协方差的估计是利用数据互联概率 $\beta_{m,k,r}$ 组合得到的.

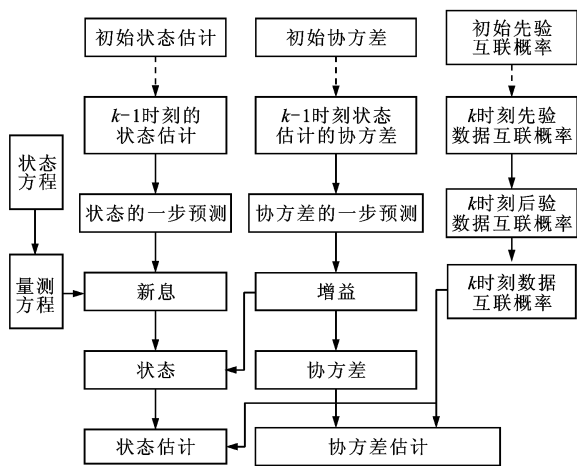


图5 基于点目标的概率多假设跟踪算法框图

PPMHT算法的状态和协方差更新方程分别为

$$\hat{\mathbf{x}}_{m,k|k} = \sum_{r=0}^{n_t} \beta_{m,k,r} \hat{\mathbf{x}}_{m,k|k,r} \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{m,k|k} = \sum_{r=0}^{n_t} \beta_{m,k,r} (\mathbf{P}_{m,k|k,r} + \hat{\mathbf{x}}_{m,k|k,r} \hat{\mathbf{x}}_{m,k|k,r}^T) - \hat{\mathbf{x}}_{m,k|k} \hat{\mathbf{x}}_{m,k|k}^T \quad (18)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_{m,k|k}$ 为 $k$ 时刻航迹 $m$ 的状态估计; $\beta_{m,k,r}$ 为 $k$ 时刻量测 $r$ 与航迹 $m$ 互联的概率; $\hat{\mathbf{x}}_{m,k|k,r}$ 为 $k$ 时刻第 $r$ 个量测得到的状态估计; $\mathbf{P}_{m,k|k}$ 为 $k$ 时刻航迹 $m$ 的协方差估计; $\mathbf{P}_{m,k|k,r}$ 为 $k$ 时刻第 $r$ 个量测得到的协方差估计.其中 $\beta_{m,k,r}$ 计算式如下

$$\beta_{m,k,r} = \beta_{m,k,0} \frac{\omega_{m,k,r}^{(i)}}{1 - \omega_{m,k,r}^{(i)}} \quad (19)$$

式中: $\omega_{m,k,r}$ 为量测 $r$ 与航迹 $m$ 在 $k$ 时刻的后验数据互联概率; $\beta_{m,k,0}$ 是 $k$ 时刻没有一个量测源于目标 $m$ 的概率

$$\beta_{m,k,0} = \left(1 + \sum_{s=1}^{n_t} \frac{\omega_{m,k,s}^{(i)}}{1 - \omega_{m,k,s}^{(i)}}\right)^{-1} \quad (20)$$

在PPMHT算法向前更新过程中,量测 $r$ 与航迹 $m$ 在 $k$ 时刻的后验数据互联概率通过下式来计算:

$$\omega_{m,k,r}^{(i)} = \frac{n_{m,k,r} \pi_{m,k,r}^{(i-1)} / (1 - \pi_{m,k,r}^{(i-1)})}{\rho_{k,r} + \sum_{j=1}^M n_{j,k,r} \pi_{j,k,r}^{(i-1)} / (1 - \pi_{j,k,r}^{(i-1)})} \quad (21)$$

式中: $\pi_{m,k,r}$ 为先验数据互联概率; $n_{m,k,r}$ 为量测 $z_{k,r}$ 与航迹 $m$ 的似然值

$$n_{m,k,r} = N(z_{k,r}; \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{m,k|K}^{(i-1)}, \mathbf{H} \mathbf{P}_{m,k|K}^{(i-1)} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}) \quad (22)$$

假设量测序列是 $Z^{K \times k}$ ,循环中使用的先验数据互联概率为

$$\pi_{m,k,r}^{(i-1)} = p'_D \frac{\omega_{m,k,r}^{(i-1)}}{\sum_{s=1}^{n_t} \omega_{m,k,s}^{(i-1)}} \quad (23)$$

从以上的分析可知,敌方对雷达网施放压制干扰主要影响的是组网雷达的检测概率,把PPMHT算法应用于压制干扰下的雷达网跟踪时,核心和难点在于计算PPMHT算法中使用的雷达网数据压缩后量测的检测概率 $p'_D$ .

## 2 仿真分析

本文假定一种典型的多传感器多目标跟踪环境,将本文DC-PPMHT算法与顺序处理结构的集中式多传感器概率多假设跟踪算法(PMHT)进行仿真比较.以防空组网雷达系统为仿真背景,该组网雷达包含3个雷达分站.雷达分站1的坐标为 $[-20 \text{ km}, -40 \text{ km}, 0 \text{ km}]$ ,雷达分站2的坐标为 $[30 \text{ km}, -40 \text{ km}, 0 \text{ km}]$ ,雷达分站3的坐标为 $[0 \text{ km}, 10 \text{ km}, 0 \text{ km}]$ .在雷达网附近有1部大功率压制干扰机,干扰机的坐标为 $[200 \text{ km}, 150 \text{ km}, 0 \text{ km}]$ .目标为2架交叉运动的飞机,其起始状态分别为 $\mathbf{x}_1 = [-39.5 \text{ km}, 400 \text{ m/s}, 54.5 \text{ km}, -100 \text{ m/s}]^T$ , $\mathbf{x}_2 = [-26.25 \text{ km}, 296 \text{ m/s}, 84.5 \text{ km}, -200 \text{ m/s}]^T$ .

### 2.1 仿真环境

雷达性能参数分别为:发射功率 $P_{r1} = 10 \text{ kW}$ , $P_{r2} = 30 \text{ kW}$ , $P_{r3} = 10 \text{ kW}$ ;脉冲宽度 $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 1 \times 10^{-6} \text{ s}$ ;天线均为 $3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的矩形口径,天线噪声温度 $T_{a1} = T_{a2} = T_{a3} = 1000 \text{ K}$ ;天线效率 $e_1 = e_2 = e_3 = 0.8$ ;雷达接收机增益 $G_{r1} = G_{r2} = G_{r3} = 20 \text{ dB}$ ;虚警概率 $p_{fa1} = p_{fa2} = p_{fa3} = 1 \times 10^{-8}$ ;测距误差 $\sigma_{r1} = 100 \text{ m}$ , $\sigma_{r2} = 200 \text{ m}$ , $\sigma_{r3} = 300 \text{ m}$ ;测角误差 $\sigma_{\theta 1} = 0.005 \text{ rad}$ , $\sigma_{\theta 2} = 0.008 \text{ rad}$ , $\sigma_{\theta 3} = 0.008 \text{ rad}$ ;各雷达采样时间间隔 $T_{r1} = T_{r2} = T_{r3} = 1 \text{ s}$ .大功率压制干扰机的参数为:发射功率 $P_j = 50 \text{ kW}$ ;干扰带宽 $B_j = 100 \text{ kHz}$ ;干扰机在雷达方向上的增益 $G_j = 4 \text{ dB}$ .仿真中采用非参数泊松分布杂波模型,取波门内虚假量测的期望数 $m = 1.8$ .

在滤波过程中,如果 $\epsilon_t > 25$ ,则认为航迹丢失

$$\epsilon_t = (\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_{m,t} - \mathbf{x}_{m,t}^{\text{true}}))^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{m,t} \mathbf{H}^T)^{-1} \cdot (\mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{m,t} - \mathbf{x}_{m,t}^{\text{true}}) \quad (24)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_{m,t}$ 为航迹 $m$ 的状态估计; $\mathbf{x}_{m,t}^{\text{true}}$ 为航迹 $m$ 的真实值; $\epsilon_t$ 服从自由度为2的 $\chi^2$ 分布.

组网各雷达采取抗压制干扰措施,其中雷达1

采取频率跳变(7 个频率点),抗干扰改善因子为  $F_{AJ1}=7$ ;雷达 2 采取频率分集(通道数为 6),抗干扰改善因子为  $F_{AJ1}=6$ ;雷达 3 采取自动增益控制,抗干扰改善因子为  $F_{AJ1}=3.16$ . 整个仿真过程目标运动 500 s,其中,0~100 s 压制干扰机不工作,101~500 s 压制干扰机工作,雷达网在 2 种情况下分别采用 PMHT 和 DC-PPMHT 方法对目标进行跟踪,仿真次数为 30 次.

2.2 仿真结果与分析

仿真结果如图 6~图 9 以及表 1 所示. 为简化表述,这里只给出雷达网对目标 2 的跟踪仿真结果并进行分析.

(1) 由图 6、图 8 可以看出,0~100 s 期间压制干扰机不工作,各部雷达对目标的检测概率保持恒定,101~500 s 期间压制干扰机开机工作,各部雷达由于与干扰机距离不同而受到了不同程度的干扰,表现为干扰条件下由于信干比下降,雷达 1、2、3 对目标的检测概率呈现不同的下降方式. 仿真结果表明,各雷达采取抗干扰措施后,在雷达受干扰区域对目标的检测概率有所提高,其中雷达 1 被有效压制的区域(检测概率  $p_D<0.1$ )由采取抗干扰措施前的 21.6%减小到 0,雷达 2 被有效压制的区域由采取抗干扰措施前的 15%减小到 0.

(2) 由图 7 可以看出,在 0~100 s 期间,雷达网在没有受到压制干扰的情况下,PMHT 和 DC-PPMHT 算法滤波稳定后的均方根位置误差都小于 50 m,在 101~500 s 压制干扰机工作期间及各部雷达检测概率较低的情况下,DC-PPMHT 算法滤波的均方根位置误差明显低于 PMHT 算法,说明本文提出的 DC-PPMHT 算法在干扰条件下有更强的工作能力.

(3) 由图 9 可以看出,压制干扰下各雷达采取抗干扰措施后,在检测概率较高的情况下,PMHT 和 DC-PPMHT 算法滤波稳定后的均方根位置误差相差不大.

(4) 由表 1 可以看出,压制干扰下各雷达采取抗干扰措施前、后,DC-PPMHT 算法的航迹丢失率都低于 PMHT 算法.

表 1 航迹丢失率

| 算法       | $p_{lost}/\%$ |       |
|----------|---------------|-------|
|          | 无干扰措施         | 有干扰措施 |
| PMHT     | 6.0           | 1.8   |
| DC-PPMHT | 1.3           | 0.6   |

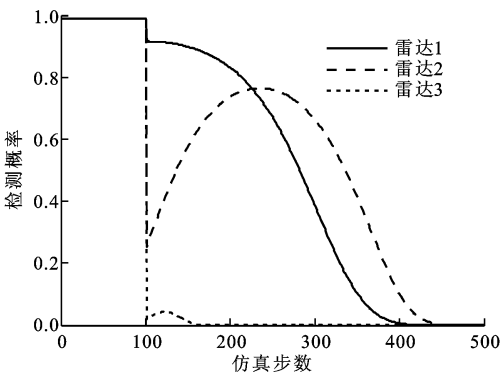


图 6 采取抗干扰措施前 3 部雷达对目标 2 的检测概率

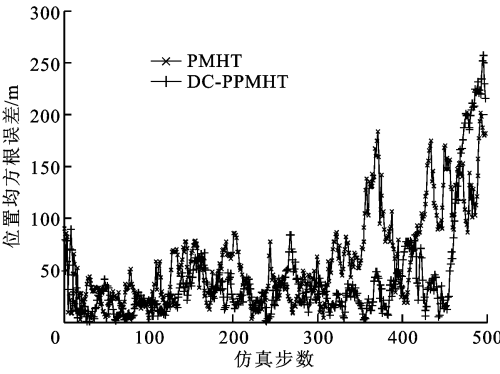


图 7 雷达网采取抗干扰措施前跟踪的位置均方根误差

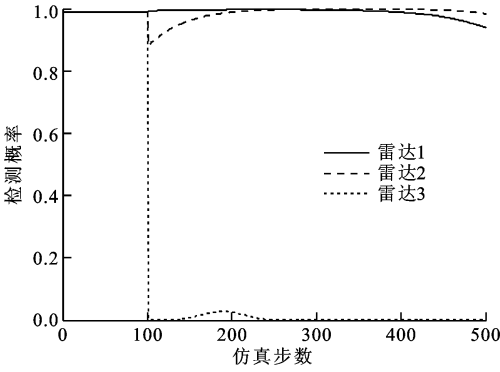


图 8 采取抗干扰措施后 3 部雷达对目标 2 的检测概率

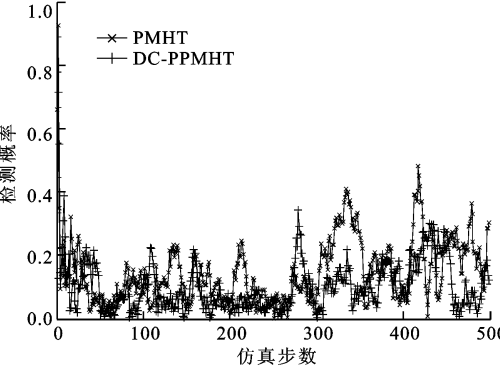


图 9 雷达网采取抗干扰措施后跟踪的位置均方根误差

### 3 结 论

本文提出了一种压制干扰下雷达网基于数据压缩的点目标概率多假设跟踪(DC-PPMHT)算法,分析了雷达采取抗干扰措施前、后雷达网的跟踪性能,并进行了仿真.通过仿真分析可以看出,利用本文提出的压制干扰下的量测模型和雷达网 DC-PPMHT 跟踪技术,可以降低压制干扰下雷达网跟踪目标的航迹丢失率,提高航迹跟踪的精度,对工程实践中提升雷达网在压制干扰下对目标的检测与跟踪性能具有一定的参考价值.本文在仿真过程中只比较了压制干扰条件下雷达网采用 DC-PPMHT 方法与 PM-HT 方法对多目标的跟踪性能,在后续的研究工作中,将进一步比较本文方法与基于随机有限集的跟踪方法对多目标的跟踪性能.

### 参考文献:

- [1] KIRUBARAJAN T, BAR-SHALOM Y, BLAIR W D, et al. IMMPDAF for radar management and tracking bench-mark with ECM [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(4): 1115-1132.
- [2] ELGAMEL S A, SORAGHAN J. Empirical mode decomposition based monopulse processor for enhanced radar tracking in the presence of high-power interference [J]. IET Radar Sonar Navig, 2011, 5(7): 769-779.
- [3] FELDMANN M, NICKEL U, KOCH W. Adaptive air to air target tracking in severe jamming environment [C]// Proceedings of 2011 International Conference on Information Fusion. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-8.
- [4] KAI-BOR Y, TURNER E L. Electronic protection for digital shared aperture array radar [C]// Proceedings of 2010 International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 12-15.
- [5] 徐海全, 王国宏, 关成斌. 压制干扰下雷达网的目标跟踪技术[J]. 兵工学报, 2011, 6(32): 764-769.  
XU Haiquan, WANG Guohong, GUAN Chengbin. Tracking technique for radar network in the presence of distributed jamming [J]. Acta Armamentarii, 2011, 6(32): 764-769.
- [6] SONG Xiaoquan, SUN Zhongkang. Radar network target tracking in a jamming environment [C]// Proceedings of the IEEE Aerospace and Electronics Con-

ference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996: 180-183.

- [7] LONG Teng, ZHENG Le, CHEN Xinliang, et al. Improved probabilistic multi-hypothesis tracker for multiple target tracking with switching attribute states [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 12(59): 5721-5733.
- [8] SONG T L, MÜSICKI D, LEE H H, et al. Point target probabilistic multiple hypothesis tracking [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2011, 6(5): 632-637.
- [9] MÜSICKI D, LA SCALA B. Multi-target tracking in clutter without measurement assignment [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 3(44): 877-896.
- [10] 范炳艺, 李建勋, 刘坦. 面向目标的概率多假设跟踪算法[J]. 航空学报, 2010, 31(12): 2373-2378.  
FAN Bingyi, LI Jianxun, LIU Tan. Target oriented probabilistic multi-hypothesis tracker algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(12): 2373-2378.
- [11] WILLETT P, RUAN Y, STREIT R. PMHT: problems and some solutions [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 4(38): 738-754.
- [12] RUAN Y, WILLETT P. An improved PMHT using an idea from coding [J]. Proceedings of 2001 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 41889-41900.
- [13] MAHAFZA B R. Radar systems analysis and design using MATLAB [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2000.

### [本刊相关文献链接]

杨晓超, 刘宏伟, 王勇, 等. 利用多输入多输出雷达低秩杂波的降维空时自适应算法. 2012, 46(8): 76-81.  
王晓, 韩崇昭. 用于机动目标跟踪的多模型概率假设密度滤波器. 2011, 45(12): 1-5.  
常国宾, 许江宁, 李安, 等. 迭代无味卡尔曼滤波的目标跟踪算法. 2011, 45(12): 70-74.  
闫小喜, 韩崇昭. 应用 Dirichlet 分布的概率假设密度多目标跟踪. 2011, 45(2): 6-10.  
张立峰, 王彤, 吴建新, 等. 机载雷达目标空时参数快速估计方法. 2012, 46(2): 135-140.  
陈士超, 武其松, 吴玉峰, 等. 一种大斜视双基地合成孔径雷达的频率变标成像算法. 2011, 45(10): 82-87.

(编辑 刘杨)