

文章编号: 1001-0920(2013)04-0552-05

近空间双基雷达网航迹起始算法

王粲粲^{1,2}, 冯金富², 车万方¹, 王方年³, 李明忠¹

(1. 复杂航空系统仿真重点实验室, 北京 100076; 2. 空军工程大学
工程学院, 西安 710038; 3. 桂林空军学院, 广西 桂林 541003)

摘要: 针对隐身目标的低可探测性和雷达采样间隔的随机性, 提出一种基于概率网格 Hough 变换和速度特征模糊聚类的近空间双基雷达网航迹起始算法. 首先, 利用概率网格 Hough 变换方法提取目标初步航迹; 然后, 结合目标的时间特性, 利用点迹速度模糊聚类的方法进一步提取目标真实航迹. 实验结果表明, 所提出算法具有较强的鲁棒性和较高的精度, 适用于杂波环境下随机采样的多雷达系统航迹起始.

关键词: 双基雷达网; Hough 变换; 模糊聚类; 航迹起始

中图分类号: TN97

文献标志码: A

Track initiation for near space bistatic radar network

WANG Shen-shen^{1,2}, FENG Jin-fu², CHE Wan-fang¹, WANG Fang-nian³, LI Ming-zhong¹

(1. Key Lab of Complex Aviation System Simulation, Beijing 100076, China; 2. Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 3. Guilin Air Force Academy, Guilin 541003, China. Correspondent: WANG Shen-shen, E-mail: wangshenshen0616@163.com)

Abstract: Stealth target is hard to detect and the radar sampling interval of stealth target is stochastic. Therefore, a track initiation algorithm for near space bistatic radar network based on probabilistic grid Hough transform and velocity fuzzy clustering is proposed. Firstly, the primary tracks are obtained by using the probabilistic grid Hough transform method. Then, velocity fuzzy clustering algorithm is used to obtain the real tracks. Simulation results show that the proposed algorithm is robust, precise and suitable for the track initiation of the randomly sampling multi-radar system.

Key words: bistatic radar network; Hough transform; fuzzy clustering; track initiation

0 引言

隐身飞机综合采用了整体设计、吸收材料和涂覆等技术措施, 使其雷达散射面积大幅度下降, 对防空系统构成了巨大的威胁. 在未来高技术战争中, 隐身飞机必将大量用于战场, 如何有效地抗击隐身飞机已成为现代防空系统作战中最为紧迫的课题之一.

近空间双基雷达网是指建立在近空间平台上的收发分置的雷达探测网络, 由于其具有较高的“四抗”性能和较强的生存能力而受到广泛关注^[1]. 建立近空间双基雷达探测网, 可充分地利用隐身飞机的前向、侧向、上下反射的隐身缺陷(其雷达散射截面随视角的变化可达 20~30 dB^[2]), 通过不同频段的雷达从不同方位照射隐身飞机, 截获的信号由数据处理中心进行数据融合处理, 即使某部雷达受到干扰或不能覆盖某一区域时, 其他雷达也可提供相关信息, 从而

在公共覆盖域内获得比单部雷达更多的目标数据, 大大提高对隐身飞机的捕获概率.

尽管近空间双基雷达网具有较好的反隐身特性, 但其面临的挑战也是严峻的. 原因主要在于: 1) 隐身目标使探测系统获得的信噪比(SNR)变得很小, 很小的 SNR 会降低航迹起始过程的可信度; 2) 隐身目标的低可探测性使雷达网可获得的目标信号非常稀少, 即雷达网获得的数据率较低; 3) 为了检测隐身目标, 雷达需要降低检测门限, 而降低的门限会导致较高的虚警, 产生大量的杂波; 4) 不同的雷达可能具有不同的测量精度和扫描周期, 获得的量测信息为异步采样且精度不一; 5) 各雷达获得的目标数据流的采样间隔是随机且难以预测的.

多目标跟踪是雷达网需要解决的关键问题, 近年来引起了人们的广泛关注^[3-5]. 而航迹起始是多目标

收稿日期: 2011-10-17; 修回日期: 2012-01-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60772162); 国家 863 计划项目(2010AA8090514C).

作者简介: 王粲粲(1984—), 男, 博士生, 从事雷达组网、目标定位跟踪等研究; 冯金富(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事机载武器系统、信息融合等研究.

跟踪的基础, 现有的航迹起始算法主要有序贯处理技术和批处理技术两大类, 众多文献对航迹起始问题进行了研究^[6-10]. 文献[8]提出了一种基于概率网格 Hough 变换的多雷达航迹起始算法, 采用网格的目标存在概率进行 Hough 变换起始目标航迹, 有效解决了多雷达系统精度不一的问题, 但在区分直线飞行的多个目标以及小距离平行飞行的目标时, 仍需进行改进.

为了解决近空间双基雷达网小目标航迹起始问题, 本文在文献[8]的基础上, 研究一种基于概率网格 Hough 变换和速度特征聚类的航迹起始方法. 航迹起始过程分为两个阶段: 第1阶段为基于概率网格 Hough 变换的初步起始, 根据双基雷达的定位精度将量测转换为空间存在目标的概率, 并在参数空间利用这些概率进行积累, 提取出初步航迹; 第2阶段为基于速度特征模糊聚类的航迹起始过程, 经过概率网格 Hough 变换初步起始后的航迹并没有利用点迹的时间特性, 换言之, 经初步起始后的航迹中的点迹只能保证其在空间上位于一条直线, 但不能保证所有点迹都满足时间特性. 在相同时刻, 一个目标产生的测量数据应分布在真实位置附近, 来自相同时间的航迹点构成的航迹是不合理的, 即一条航迹上目标在所有点迹处的“速度”应该是相等的. 速度模糊聚类方法首先将初步航迹中的点迹序列的位置信息差与相应测量的时间差相除, 得到速度信息; 再对速度进行模糊聚类, 得到真实的航迹信息.

1 概率网格 Hough 变换初步起始^[8]

Hough 变换是多传感器航迹起始和低可观测目标检测的一种重要方法, 适用于杂波环境下直线运动目标的航迹起始. Hough 变换起始航迹的质量取决于航迹起始的时间和参数空间间隔, 航迹起始时间越长, 起始航迹的质量越高; 参数间隔越小, 起始航迹的质量越高, 但是容易造成漏警. 参数间隔的选取应根据测量误差而定, 若测量误差较大, 则参数间隔应选取较大值^[7-9].

雷达网系统中, 各雷达的测量精度可能不相同, 选取较大或较小的参数离散间隔都难以平衡处理不同精度的量测数据. 对此, 本文借鉴文献[8]的思想, 将概率网格 Hough 变换方法应用于双基雷达网, 进行航迹的初步起始, 可有效解决多雷达精度不一的问题.

设近空间双基雷达发射站 T 的坐标为 (x_T, y_T) , 接收站 R 的坐标为 (x_R, y_R) , 雷达测量的距离和方位角分别为 $\hat{\rho}$ 和 $\hat{\theta}$, 测距误差 $d\rho$ 和测角误差 $d\theta$ 均服从零均值的高斯分布, 且有

$$d\rho \sim N(0, \sigma_\rho^2), \quad d\theta \sim N(0, \sigma_\theta^2). \quad (1)$$

则根据高斯分布可以得到在空间点 (x, y) 存在目标的概率为

$$p_1(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_\rho\sigma_\theta} \exp \left[-\frac{[\rho(x, y) - \hat{\rho}]^2}{2\sigma_\rho^2} - \frac{[\theta(x, y) - \hat{\theta}]^2}{2\sigma_\theta^2} \right]. \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \rho(x, y) = \sqrt{(x - x_T)^2 + (y - y_T)^2} + \\ \quad \sqrt{(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2}, \\ \theta(x, y) = \arctan [(y - y_R)/(x - x_R)]. \end{cases} \quad (3)$$

对于给定的双基雷达, 可通过式(2)计算其量测对应的目标存在概率分布. 为了方便计算, 可根据高斯分布的特点, 忽略量测点 3σ 区域外的概率. 式(2)为连续函数, 可通过概率网格划分^[11]对其进行离散化, 如图1所示. 图1中: 阴影部分为双基雷达目标存在的概率分布区域; 上下边界为椭圆弧, 对应的距离和分别为 $\hat{\rho} + 3\sigma_\rho$ 和 $\hat{\rho} - 3\sigma_\rho$; 左右边界为直线, 对应的倾角分别为 $\hat{\theta} + 3\sigma_\theta$ 和 $\hat{\theta} - 3\sigma_\theta$. 网格将量测对应的目标模糊区划分为多个方格区域(边界部分除外), 可以得到每个网格中存在目标的概率为

$$p_2(i, j) = \iint_{\Omega} p_1(x, y) dx dy. \quad (4)$$

其中: Ω 为网格 (i, j) 对应的区域, $p_1(x, y)$ 由式(2)计算得到. 进行归一化后可得每个网格的概率为

$$p(i, j) = p_2(i, j) / \sum_{i, j} p_2(i, j). \quad (5)$$

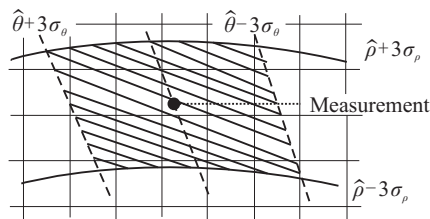


图1 目标存在区域网格

这样, 双基雷达网的每一个量测信息都可转换为包含目标存在概率信息的网格. 将雷达网的量测信息根据其精度转换为目标存在概率信息, 可使高精度的量测和低精度的量测有机结合起来, 既能充分利用高精度的数据, 又能让低精度的数据得到合理的积累^[8].

设双基雷达网一共包含 M 部发射机和 N 部接收机, 第 m 部发射机和第 n 部接收机组成的双基雷达对应的测距和测角误差标准差分别为 $\sigma_{\rho mn}$ 和 $\sigma_{\theta mn}$; 相应的量测有 K_{mn} 个, 对于第 k 个量测, 可由式(5)计算出其对应的目标存在概率分布, 记每个网格的概率为 $p_{mnk}(i, j)$, 则每个量测在平面上的概率分布可表示为一个矩阵 \mathbf{P}_{mnk} . 计算所有量测的概率分布矩阵并求和, 可得

$$\mathbf{P} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_{mn}} \mathbf{P}_{mnk}. \quad (6)$$

矩阵 \mathbf{P} 中每个元素的值表示该网格内存在目标的总概率, 利用这个概率矩阵进行 Hough 变换, 在参数空间中利用对应非零元素的值进行加权计算, 找出参数空间中的峰值, 并通过加权信息将其还原为监视空间中相应的点迹, 这些点迹在监视空间中基本处于一条直线上, 于是便可得到初步航迹信息.

2 速度特征模糊聚类航迹起始

经过概率网格 Hough 变换初步起始后, 所有可能的目标航迹被提取出来, 但这只能保证某条航迹上的点迹在空间上处于一条直线, 并不能保证时间上的一致性. 在航迹起始阶段, 一般认为目标做近似匀速直线运动, 因此一条真实航迹上所有点迹的“速度”应该相差不大, 方向基本相同. 然而, 经过概率网格 Hough 变换初步起始后的航迹并不能保证满足这些特性, 其中可能含有噪声点和虚假点, 也可能包含多条真实航迹, 如果不进行处理, 将对后期的滤波和跟踪造成影响. 为此, 需要进一步从初步航迹中排除虚假点, 提取真实的目标航迹.

2.1 速度相似度量

隐身目标的低可探测性使雷达网内各雷达获得的目标数据流的采样间隔是随机且难以预测的, 因此每个点迹还应包含时戳信息, 即雷达获得点迹的时间. 经过预处理后的点迹情报信息可表述如下:

$$\text{plot} = \{x \text{ 坐标}, y \text{ 坐标}, \text{时戳 } t, \text{定位误差 } \delta\}.$$

其中: x 坐标和 y 坐标可以通过定位方程得到, 结合雷达的测距和测角精度以及雷达位置可得到相应的定位误差 δ , 时戳 t 则由获取点迹的雷达提供.

设经过概率网格 Hough 变换初步起始得到的某条航迹包含的点迹序列为 $\{P_s\}$, $s = 1, 2, \dots, S$, 其中 S 为点迹的个数. 经过概率网格 Hough 变换初步起始后, 序列 $\{P_s\}$ 中的点迹已基本在一条直线上, 要从中提取出可能的目标航迹, 可按点迹速度特征进行模糊聚类^[12].

对点迹序列 $\{P_s\}$ 按照点迹获取时间的先后顺序进行排序, 再对点迹进行两两配对, 计算每一对点迹对应的速度信息. 点迹 P_i 和 P_j ($t_i \leq t_j$) 对应的速度可表示为^[10]

$$\mathbf{v}_{ij} = \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{t_j - t_i} = \left[\frac{x_j - x_i}{t_j - t_i}, \frac{y_j - y_i}{t_j - t_i} \right]^T, \quad t_i \neq t_j. \quad (7)$$

其中: $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i]^T$, $\mathbf{x}_j = [x_j, y_j]^T$ 分别为点迹 P_i 和 P_j 的位置矢量. 式(7)针对的只是 $t_i \neq t_j$ 时的情形, 当 $t_i = t_j$ 时, 说明点迹 P_i 和 P_j 的获取时间相同, 由于测量误差的存在, 点迹 P_i 和 P_j 可能属于同一个目标, 这时需要对点迹间的距离与定位误差进行比较以确定点迹 P_i 和 P_j 的关系.

对于同一个点迹而言, 其两个“速度”的接近程度越高, 构成这两个“速度”的点迹来自同一条航迹的可能性越大. 基于这种思想, 可以采用模糊聚类的方法来实现航迹的起始^[12].

两个“速度”的接近程度可用速度矢量差值来衡量, 该值越小, 表示两个速度的接近程度越大; 反之越小. 这个差值的可靠性又可用点迹间的距离和定位误差来衡量, 点间距离越大, 定位误差越小, 可靠性越高.

设点迹 P_i 对应的两个“速度”分别为 \mathbf{v}_{ij} 和 \mathbf{v}_{ik} , 则其接近程度可表示为

$$d_{ijk} = \begin{cases} \exp \left[-\frac{\|\mathbf{v}_{ij} - \mathbf{v}_{ik}\|^2 (\delta_i \delta_j \delta_k)^\eta}{\|x_i - x_j\|^\eta \cdot \|x_i - x_k\|^\eta} \right], & j \neq k; \\ \exp \left[-\frac{\lambda \|\Delta \mathbf{v}\|^2 (\delta_i \delta_j^2)^\eta}{\|x_i - x_j\|^{2\eta}} \right], & j = k. \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\Delta \mathbf{v}$ 为速度分辨率, λ 为门限系数, η 为加权指数.

式(8)综合考虑了速度差值、点间距离和定位误差 3 方面因素, 较为全面地反映了两对点迹构成的速度的相似程度. 根据以上分析, 结合模糊聚类算法的思想, 定义两个速度的相似性度量为

$$u_{ijk} = \frac{(d_{ijk})^{1/(c-1)}}{\sum_{s=i+1}^S (d_{isk})^{1/(c-1)}}, \quad (9)$$

其中 $c > 1$ 为模糊加权指数.

对于点迹序列 $\{P_s\}$ 中的第 i 个点迹, 可构造如下速度相似度量矩阵^[10]:

$$\mathbf{U}_i = \begin{bmatrix} u_{i(i+1)(i+1)} & u_{i(i+1)(i+2)} & \cdots & u_{i(i+1)S} \\ u_{i(i+2)(i+1)} & u_{i(i+2)(i+2)} & \cdots & u_{i(i+2)S} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{iS(i+1)} & u_{iS(i+2)} & \cdots & u_{iSS} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

2.2 速度聚类航迹起始

在得到速度相似度量矩阵之后, 可根据速度的相似性特征对点迹进行聚类^[12]. 相似度量矩阵对角线上的元素表示区分两个目标速度的门限, 其他元素表示两个速度的相似性度量. 若两个速度的相似性度量超过门限, 则认为构成这两个速度的 3 个点迹来自同一个目标. 速度模糊聚类航迹起始算法如下.

Step 1: 初始化, 给定初始点迹序列 $\{P_s\}$, $s = 1, 2, \dots, S$, 速度分辨率 $\Delta \mathbf{v}$, 门限系数 λ , 加权指数 η 和 c .

Step 2: 对点迹序列 $\{P_s\}$ 按时间排序并进行两两配对, 利用式(7)计算配对点迹 P_i 和 P_j 对应的速度 \mathbf{v}_{ij} .

Step 3: 对于点迹 P_i , 利用式(8)计算其任意两个速度 \mathbf{v}_{ij} 和 \mathbf{v}_{ik} 的接近程度 d_{ijk} , 并通过式(9)计算其相似性度量 u_{ijk} .

Step 4: 根据式(10)构造点迹 P_i 的相似性度量矩阵 U_i , U_i 为对称矩阵.

Step 5: 对矩阵 U_i 的每列元素进行检测, 若满足 $\max_{j=i+1}^S \{u_{ijk}\} \neq u_{ikk}$, 则从第 k 列中找出满足 $u_{ijk} > u_{ikk}$ 的 j 值, 即 $\{j|u_{ijk} > u_{ikk}\}$, 将这些 j 值与 i 和 k 归为一类, 记为集合 A_{ik} , $A_{ik} = \{i\} \cup \{k\} \cup \{j|u_{ijk} > u_{ikk}\}$; 若 $\max_{j=i+1}^S \{u_{ijk}\} = u_{ikk}$, 即第 k 列的最大值在对角线上, 则表明没有点迹关联, 记 $A_{ik} = \emptyset$.

Step 6: 对所有点迹重复 Step 3~Step 5, 得到所有可能的航迹集合序列 $\{A_{ik}\}$, $i = 1, 2, \dots, S$, $k = i + 1, i + 2, \dots, S$.

Step 7: 对航迹集合序列 $\{A_{ik}\}$ 进行合并处理, 即如果 $\text{count}\{A_{ij} \cap A_{mn}\} \geq 2$, 则 $A_{ij} = A_{ij} \cup A_{mn}$ 并使 $A_{mn} = \emptyset$, $\text{count}\{A\}$ 为集合 A 元素的个数.

Step 8: 输出集合序列 $\{A_{ik}\}$ 中的非空集合, 每个非空集合中的点迹起始一条航迹.

算法将相似性度量超过区分门限的两个速度归为一类, 即认为构成这两个速度的 3 个点迹来自同一目标, 因此可有效利用点迹的时间信息, 从初步航迹中进一步提取真实的目标航迹信息. 在雷达网获得的点迹信息较少时, 速度聚类起始算法也可单独使用以快速起始目标航迹, 但需要对航向的均方差进行限制.

事实上, 当 $|t_i - t_j| < \Delta t$ 时 (Δt 为某一较小时间阈值), 都存在一个速度计算的误差. 一般而言, 两个量测的时间间隔越小, 测量误差越大, 速度计算误差也越大. 误差的影响不可消除, 但文中提出的速度模糊聚类算法已经考虑了定位误差和点迹距离的影响, 式(8)在计算点迹速度的接近程度时, 已将定位误差和点迹距离作为参数加入其中. 另外, 即使出现位置相近的点迹配对不合理, 也会在算法的 Step 7 中得到修正, 即如果两个点都与距离较远的另外两个点关联上, 则将这 4 个点归为一类, 这在一定程度上可以抑制误差的影响. 在定位误差相差不大的情况下, 由距离较远的两个点获得的速度信息可靠性较高. 对于时戳相同的量测, 并未直接计算速度, 这里同样可通过上述方法确定其关系.

3 仿真分析

以二维观测空间为例, 设双基雷达网系统由一个发射站和两个接收站构成. 以发射站为原点建立直角坐标系, 设两个接收站坐标分别为 $(-50 \text{ km}, 0)$ 和 $(50 \text{ km}, 0)$, 发射站和第 1 个接收站构成的双基雷达测距精度为 $\sigma_{\rho_1} = 150 \text{ m}$, 测角精度 $\sigma_{\theta_1} = 5 \text{ mrad}$; 发射站和第 2 个接收站构成的双基雷达测距精度为 $\sigma_{\rho_2} = 200 \text{ m}$, 测角精度 $\sigma_{\theta_2} = 8 \text{ mrad}$. 观测空间为一个 $8 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ 的区域(横坐标为 $-4 \sim 4 \text{ km}$, 纵坐标

为 $30 \sim 36 \text{ km}$), 其中有 5 个目标沿直线飞行, 飞行时间为 10 s. 目标 1 和目标 2 的轨迹处于同一条直线上, 且均与目标 3 的轨迹平行, 目标 4 和目标 5 交叉飞行, 如图 2 所示. 杂波在整个观测空间内均匀分布, 设在相同的观测时间内, 两部雷达观测到的真目标点迹数量与杂波数量基本相当. 在仿真过程中, 雷达每得到一个量测, 同时记录相应的时间作为其时戳, 时戳精度为 0.1 ms .

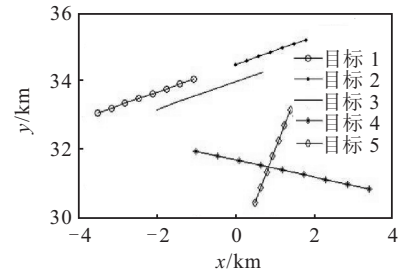


图 2 目标轨迹

根据雷达网获得的点迹数据, 分别采用 Hough 变换法、概率网格 Hough 变换法和本文方法进行航迹起始, 航迹起始结果如图 3~图 5 所示. 为了验证算法起始航迹的准确率, 对上述算法分别进行 200 次蒙特卡罗仿真, 其结果如表 1 所示.

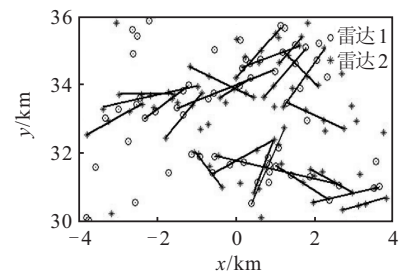


图 3 Hough 变换航迹起始结果

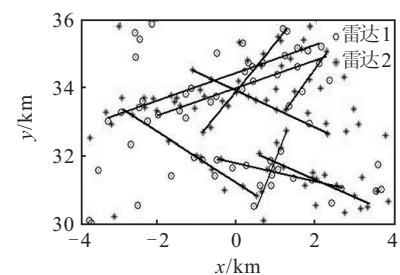


图 4 概率网格 Hough 变换航迹起始结果

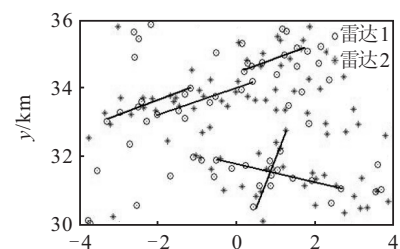


图 5 本文方法航迹起始结果

表 1 蒙特卡罗仿真结果

航迹起始算法	航迹起始准确率/%	虚假航迹比率/%
Hough 变换	96.4	56.4
概率网格 Hough 变换	97.6	24.3
本文方法	97.8	6.2

由表 1 可见, Hough 变换提取的虚假航迹较多, 且航迹的精度较低; 概率网格 Hough 变换能够有效提取目标航迹, 且精度较高, 但难以区分同一直线上的不同航迹; 本文方法提取的航迹与真实目标航迹大致相同, 能有效区分同一直线上的不同航迹和小距离平行航迹. 这是因为本文方法在概率网格 Hough 变换的基础上, 利用了点迹的时间特性, 通过速度聚类进一步提取目标航迹.

4 结 论

本文研究了杂波环境下不同精度异步采样的双基雷达网航迹起始问题. 通过概率网格 Hough 变换提取初步航迹, 可有效去除杂波, 并可解决多雷达精度不一的问题; 在初步航迹的基础上, 利用点迹的时间特性, 进行速度模糊聚类, 进一步提取目标真实航迹. 仿真结果表明, 本文方法能有效区分同一直线上的不同航迹和小距离平行航迹, 且起始的航迹准确率高, 虚假航迹比率较低, 适合不同精度异步采样的雷达网航迹起始. 在计算量方面, 本文方法用到了概率计算和 Hough 变换, 因此其计算量较大. 由此可以看出, 航迹起始性能的提高是以牺牲计算时间为代价的, 但随着微处理器的发展, 运算速度已不是瓶颈问题, 故本文方法具有较高的应用价值.

参考文献(References)

- [1] 王燊燊, 冯金富, 王方年, 等. 基于约束最小二乘的近空间雷达网定位算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(7): 1655-1660.
(Wang S S, Feng J F, Wang F N, et al. Location method of near space radar network based on regularized constrained total least square[J]. J of Electronics & Information Technology, 2011, 33(7): 1655-1660.)
- [2] 张云飞, 马东立, 武哲. 两种隐身飞机模型的雷达散射特性测试与分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(2): 147-150.
(Zhang Y F, Ma D L, Wu Z. Radar scattering characteristic test and analysis of two stealth aircraft models[J]. J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(2): 147-150.)
- [3] 欧阳成, 姬红兵, 张俊根. 一种改进的 CPHD 多目标跟踪算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2112-2118.
(Ouyang C, Ji H B, Zhang J G. Improved CPHD filter for multi-target tracking[J]. J of Electronics & Information Technology, 2010, 32(9): 2112-2118.)
- [4] Darko Musicki. Multi-target tracking using multiple passive bearings-only asynchronous sensors[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(3): 1151-1160.
- [5] William F Leven, Aaron D Lanterman. Unscented Kalman filters for multiple target tracking with symmetric measurement equations[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2009, 54(2): 370-375.
- [6] Michail N Petsios, Emmanouil G Alivizatos, Nikolaos K Uzunoglu. Solving the association problem for a multistatic range-only radar target tracker[J]. Signal Processing, 2008, 88: 2254-2277.
- [7] Carlson B D, Evans E D, Wilson S L. Errata: Search radar detection and track with the hough transform[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 382-383.
- [8] 赵志超, 饶彬, 王雪松. 基于概率网格 Hough 变换的多雷达航迹起始算法[J]. 航空学报, 2010, 31(11): 2209-2215.
(Zhao Z C, Rao B, Wang X S. Multi-radar track initiation algorithm based on probabilistic grid Hough transform[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2209-2215.)
- [9] 金术玲, 梁彦, 王增福, 等. 两级 Hough 变换航迹起始算法[J]. 电子学报, 2008, 36(3): 590-593.
(Jin S L, Liang Y, Wang Z F, et al. A two-hierarchy Hough transform based track initiation algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 590-593.)
- [10] 时银水, 姬红兵, 汤金平. 对断续点迹的速度模糊聚类航迹起始研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(10): 2118-2122.
(Shi Y S, Ji H B, Tang J P. Study on track initiation from fragmentary plots with velocity fuzzy clustering[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2009, 30(10): 2118-2122.)
- [11] 赵志超, 王雪松, 肖顺平. 基于联合概率密度的多传感器定位算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(10): 1446-1450.
(Zhao Z C, Wang X S, Xiao S P. A multisensory localization algorithm based on joint probability density[J]. Chinese J of Sensors and Actuators, 2009, 22(10): 1446-1450.)
- [12] 党宏社, 韩崇昭, 王立琦, 等. 基于模糊推理原理的多传感器数据融合方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 527-530.
(Dang H S, Han C Z, Wang L Q, et al. A multi-sensor data fusion method based on fuzzy logic reasoning[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 527-530.)