

基于空间分布信息的雷达与ESM航迹灰色关联算法

彭彬彬, 关欣

(海军航空工程学院电子信息工程系, 山东烟台 264001)

摘要: 针对异地配置的雷达与ESM航迹关联问题, 传统的统计类方法对逐条航迹采用检验假设的思想进行关联决策, 没有利用多目标间的空间分布信息。首先基于距离信息和空间分布信息, 获取所有交叉点, 将所有的交叉点分成若干排列组合; 基于距离信息的预处理减少了可能关联组合的数目, 提高了运算速度; 基于分布曲线相似的灰关联方法充分利用了多目标的空间分布信息; 最后对多个时刻的关联结果进行处理, 获得最终关联结果。仿真结果表明, 该方法能够快速有效地实现雷达与ESM的航迹关联。

关键词: 航迹关联; 雷达; ESM; 灰色关联

中图分类号: TN958.93

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2017)06-0034-05

Gray Track Correlation Algorithm of Radar and ESM Based on Spatial Distribution Information

PENG Bin-bin, GUAN Xin

(Department of Electronics and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The track association of radar and Electronic Support Measure (ESM) at different sites is researched. The traditional algorithms based on statistics make decision of association for each track by hypothesis testing without making full use of the spatial distribution information of multiple targets. In this paper, the range and space distribution information is utilized for obtaining all the crossing points, which are divided into several combinations. Pretreatment based on range information is used to eliminate some false combinations and raise the speed of operation. The space distribution information of multiple targets is fully utilized by gray correlation based on the similarity. The final association results can be obtained by processing of several history association results. The simulation results show that proposed algorithm can accomplish the track association of radar and ESM quickly and effectively.

Key words: track association; radar; Electronic Support Measure(ESM); gray correlation

0 引言

雷达与ESM的数据融合可以实现信息的优势互补。雷达与ESM航迹关联是雷达与ESM航迹融合的前提和关键, 国内外众多学者在这方面做了许多工作^[1-3]。早期方法常采用角度量测构造关联统计量^[4-5], 这种方法最简单, 但是由于只有角度信息, 关联时需较大的样本容量和较长的观测时间才能达到较好的关联性能。文献[6]在直角坐标系下基于位置和速度构造关联统计

量, 并对正确关联概率和错误关联概率进行分析推导和简化。文献[7]在修正极坐标下基于不同状态向量提出了5种关联方法, 并对3种典型场景进行了仿真。文献[8]在一种新的MPC坐标下基于最大似然估计提出一种航迹关联算法, 讨论了可观测状态数目对关联性能的影响。文献[9]分析了有偏估计对雷达与ESM航迹关联的影响, 并近似求解了非中心统计参量, 为了确保目标运动参数的可观测性, 要求ESM传感器满足相对于目标高一次以上的机动。上述文献主要针对雷达和ESM处于同一个平台时的情况。但在传感器组网中, 雷达和ESM不可能总处于同一个平台^[10-11]。文献[12]在雷达和ESM传感器异地配置的情况下, 分别提出了基于角度和距离统计量的异类传感器航迹关联算法, 仿真表明两种算法具有类似的正确关联概率,

收稿日期: 2016-06-30

修回日期: 2016-07-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61032001); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0872)

作者简介: 彭彬彬(1991—), 男, 安徽安庆人, 硕士, 研究方向为异类传感器航迹关联。

但是,基于距离统计量的方法具有更低的错误关联概率。文献[13]对不同目标运动方程下的几种关联方法进行了研究,发现不同的关联方法在显著条件相同时,性能有较大区别。上述统计方法的不足是需较大的样本容量和较长的观测时间以达到较好的关联性能,且随着目标的增加(密集程度的增加),关联性能会迅速下降。本文基于曲线形状相似的思想^[14-15],提出一种基于距离的局部关联和基于空间分布的全局灰关联相结合的异类传感器航迹关联算法,将所有交叉定位点分成若干排列组合,有效地利用了多目标的空间分布信息,且关联的过程中无需进行关联门限选择,提高了雷达和 ESM 的关联性能。

1 问题描述

1.1 获取交叉定位点

假设异地配置的二维雷达和 ESM 在公共笛卡尔坐标系下同时对目标进行探测,其中,雷达位于坐标 (x_A, y_A) 处,ESM 位于 (x_B, y_B) 处。设 k 时刻,探测区域有 n 个目标,对各雷达目标按照角度的递增顺序排序,得到 k 时刻雷达目标量测序列 $Z(k) = \{Z_i(k) | i=1, 2, \dots, n\}$,其中

$$Z_i(k) = \begin{bmatrix} r_i(k) \\ \theta_i^A(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{r}_i(k) + \varepsilon_r(k) \\ \bar{\theta}_i^A(k) + \varepsilon_{\theta A}(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

是 k 时刻第 i 个雷达目标的量测, $r_i(k)$ 和 $\theta_i^A(k)$ 分别是 k 时刻第 i 个雷达目标的距离与方位测量值, $\bar{r}_i(k)$ 和 $\bar{\theta}_i^A(k)$ 分别是目标距离与方位的真值,随机量测误差 $[\varepsilon_r(k) \ \varepsilon_{\theta A}(k)]^T$ 是具有零均值、恒定方差 $R_n = \text{diag}[\sigma_r^2 \ \sigma_{\theta A}^2]$ 的高斯白噪声。进行直角坐标转换,得到转换坐标序列 $Y(k) = \{Y_i(k) | i=1, 2, \dots, n\}$,其中, $Y_i(k) = [x_i(k) \ y_i(k)]^T$ 是 k 时刻第 i 个雷达目标的转换量测, $x_i(k)$, $y_i(k)$ 分别为转换后的横、纵轴坐标。同样,对 k 时刻 ESM 测量点迹按照角度的递增顺序进行排列,记为 $X(k) = \{\theta_j^B(k) | j=1, 2, \dots, n\}$,其中

$$\theta_j^B(k) = \bar{\theta}_j^B(k) + \varepsilon_{\theta B}(k) \quad (2)$$

式中: $\theta_j^B(k)$ 为 k 时刻 ESM 第 j 个目标的角度测量值; $\bar{\theta}_j^B(k)$ 为目标的角度真值;随机测量误差 $\varepsilon_{\theta B}(k)$ 是具有零均值、恒定方差 $\sigma_{\theta B}^2$ 的高斯白噪声。依据交叉定位原理^[16-17],定义交叉定位坐标矩阵 $\Omega_{n \times n}^x$ 和 $\Omega_{n \times n}^y$,元素 $\Omega^x(i, j)$ 和 $\Omega^y(i, j)$ 分别记录第 i 个雷达目标与第 j 个 ESM 目标的角度交叉定位点 x_{ij} 和 y_{ij} 坐标,即

$$\begin{cases} x_{ij}(k) = \frac{[x_A \cot(\theta_i^A(k)) - y_A] - [x_B \cot(\theta_j^B(k)) - y_B]}{\cot(\theta_i^A(k)) - \cot(\theta_j^B(k))} \\ y_{ij}(k) = \frac{[y_A \tan(\theta_i^A(k)) - x_A] - [y_B \tan(\theta_j^B(k)) - x_B]}{\tan(\theta_i^A(k)) - \tan(\theta_j^B(k))} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 划分排列

不失一般性,以 3 个目标为例进行分析。

图 1 是存在 3 个目标时 ESM 与雷达交叉定位情况。

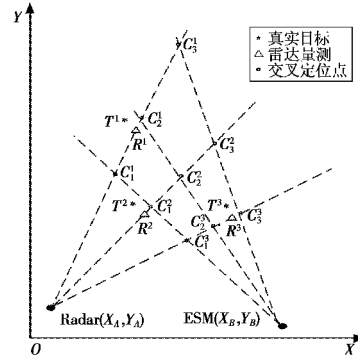


图 1 雷达与 ESM 交叉定位示意图

Fig. 1 Cross location of radar and ESM

图中: T^i 表示第 i 个真实目标; R^i 表示第 i 个雷达目标; C_j^i 表示第 i 个雷达目标和第 j 个 ESM 目标的交叉定位点。图 1 共有 9 个交叉点,由于一个 ESM 目标只能与一个雷达目标关联,未经预处理时可以列出 6 种组合排列方式,即 $\{C_1^1, C_2^2, C_3^3\}$, $\{C_1^1, C_2^3, C_3^2\}$, $\{C_1^1, C_2^2, C_3^3\}$, $\{C_2^1, C_3^2, C_1^3\}$, $\{C_2^1, C_3^3, C_1^2\}$ 和 $\{C_3^1, C_2^2, C_1^3\}$ 来与雷达目标 $\{R^1, R^2, R^3\}$ 依次关联。图 1 中排列 $\{C_2^1, C_1^2, C_3^3\}$ 与雷达目标 $\{R^1, R^2, R^3\}$ 依次相关联。依次连接 R^1, R^2 和 R^3 , 将所画线称为雷达目标的分布曲线;类似,依次连接 C_2^1, C_1^2 和 C_3^3 , 将获得的线称为交叉点的分布曲线。当不存在误差时,雷达目标的分布曲线和与之关联的交叉点的分布曲线应该是完全重合的;当存在测量误差时,虽然不完全重合,但是两者的分布曲线非常相似(如图 1 中的 $\{C_2^1, C_1^2, C_3^3\}$ 与 $\{R^1, R^2, R^3\}$ 在空间中的形状相似),而灰关联分析可以根据曲线几何形状来衡量数据因素之间的相似或者相异程度。当目标增加到 n 个,交叉定位点会增加到 n^2 个,其中只有 n 个交叉点对应真实目标,而其余 $n(n-1)$ 个则为鬼点,有 $n!$ 种交叉点的排列方式,其中必然有一组对应完全正确的关联。所以,当目标较多或环境复杂时,如果不加以处理, $n!$ 种排列方式产生的运算量会急剧增加,因此先进行基于距离的局部关联处理。

2 异地配置的 ESM 与雷达航迹关联

2.1 基于距离信息的预处理

当以雷达为融合中心时,可以得到第 i 个雷达目标与第 j 个 ESM 目标的角度交叉定位点距雷达传感器的距离为

$$d_{ij}(k) = \sqrt{(x_{ij}(k) - x_A)^2 + (y_{ij}(k) - y_A)^2} \quad (4)$$

$d_{ij}(k)$ 的方差为 $\sigma_{d_{ij}(k)}^2$, 即

$$\sigma_{d_i(k)}^2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_{ij}(k)}{\partial \theta_i^A(k)} & \frac{\partial d_{ij}(k)}{\partial \theta_j^B(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{\theta_i^A}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta_j^B}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial d_{ij}(k)}{\partial \theta_i^A(k)} & \frac{\partial d_{ij}(k)}{\partial \theta_j^B(k)} \end{bmatrix}^T = \sigma_{\theta_i^A}^2 \left(\frac{\partial d_{ij}(k)}{\partial \theta_i^A(k)} \right)^2 + \sigma_{\theta_j^B}^2 \left(\frac{\partial d_{ij}(k)}{\partial \theta_j^B(k)} \right)^2 \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial d_{ij}(k)}{\partial \theta_i^A(k)} = \frac{\partial d_{ij}(k)}{\partial x_{ij}(k)} \frac{\partial x_{ij}(k)}{\partial \theta_i^A(k)} + \frac{\partial d_{ij}(k)}{\partial y_{ij}(k)} \frac{\partial y_{ij}(k)}{\partial \theta_i^A(k)} = \\ \frac{\partial x_{ij}(k)}{\partial \theta_i^A(k)} \sin(\theta_i^A(k)) + \frac{\partial y_{ij}(k)}{\partial \theta_i^A(k)} \cos(\theta_i^A(k)) \\ \frac{\partial d_{ij}(k)}{\partial \theta_j^B(k)} = \frac{\partial d_{ij}(k)}{\partial x_{ij}(k)} \frac{\partial x_{ij}(k)}{\partial \theta_j^B(k)} + \frac{\partial d_{ij}(k)}{\partial y_{ij}(k)} \frac{\partial y_{ij}(k)}{\partial \theta_j^B(k)} = \\ \frac{\partial x_{ij}(k)}{\partial \theta_j^B(k)} \sin(\theta_i^A(k)) + \frac{\partial y_{ij}(k)}{\partial \theta_j^B(k)} \cos(\theta_i^A(k)) \end{cases} \quad (6)$$

令 $D_{ij}(k) = d_{ij}(k) - r_i(k)$, 由于目标方位与距离之间的测量误差相互独立, $D_{ij}(k)$ 近似服从高斯分布, 方差为 $\sigma_{D_{ij}(k)}^2 = \sigma_{d_{ij}(k)}^2 + \sigma_r^2$.

基于距离的局部预处理的处理规则为: 当 $-3\sigma_{D_{ij}} \leq D_{ij}(k) \leq 3\sigma_{D_{ij}}$ 时, 认为第 i 个雷达目标与第 j 个 ESM 目标来自同一个目标, 即两航迹试验关联; 当不满足时, 认为第 i 个雷达目标与第 j 个 ESM 目标不可能来自同一个目标。由正态分布的“ 3σ ”法则可知, 当不满足条件时, 第 i 个雷达目标与第 j 个 ESM 目标不可能来自同一个目标的概率为 99.74%, 所以上述规则是合理的。需要指出的是, 对于某个雷达目标 i , 并不需要遍历所有的 ESM 与雷达的交点, 只需要遍历其角度方向的所有交点, 因为与雷达目标 i 可能关联的定位点一定在其角度的延长线方向。通过距离预处理, 可以排除一些不可能的排列组合, 为后面的关联减少大量的计算而且基本不会出现漏关联情况。

2.2 基于分布曲线相似的灰关联

2.2.1 对 k 时刻的处理

假设经距离预处理后剩余 N 种排列方式, 接下来基于空间形状采用灰关联分析, 来寻找与雷达目标分布曲线最相似的一个排列。选取 k 时刻所有的雷达目标位置作为参考数列, 即 $Y(k) = \{Y_i(k) | i=1, 2, \dots, n\}$, $Y_i(k) = [Y_i^1(k) \ Y_i^2(k)]^T$, 前文已经得到 N 种排列方式, 对应的交叉定位点坐标序列定义为 $W_l = \{W_l(i) | i=1, 2, \dots, n\}$, $l=1, 2, \dots, N$, 其中, $W_l(i)$ 是第 l 个交叉定位点排列的第 v 个元素的坐标, $W_l(i) = [W_l^1(i) \ W_l^2(i)]^T$, $W_l^1(i)$ 和 $W_l^2(i)$ 分别是 $W_l(i)$ 的横、纵轴坐标。

定义第 l 个航迹关联事件矩阵第 i 个雷达目标与第 i 个雷达点迹的第 m 个指标的相关系数序列为

$$\xi_{li}^m(k) = \frac{\min_i \min_l |Y_i^m(k) - W_{li}^m(k)| + \rho \max_i \max_l |Y_i^m(k) - W_{li}^m(k)|}{|Y_i^m(k) - W_{li}^m(k)| + \rho \max_i \max_l |Y_i^m(k) - W_{li}^m(k)|} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{记 } \Delta_{li}^m(k) &= |Y_i^m(k) - W_{li}^m(k)|, \text{ 则} \\ \xi_{li}^m(k) &= \frac{\min_i \min_l \Delta_{li}^m(k) + \rho \max_i \max_l \Delta_{li}^m(k)}{\Delta_{li}^m(k) + \rho \max_i \max_l \Delta_{li}^m(k)} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, ρ 为分辨系数, ρ 越小, 分辨力越差, 通常取 $\rho=0.5$ 。

由于第 l 个排列组合有 n 个交叉点, 且每一个交叉定位点坐标序列都包含横、纵轴两个相关系数序列分量, 定义第 l 个排列组合与雷达目标的相似度的灰关联度为

$$\gamma_l(k) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^2 \xi_{li}^m(k) \quad (9)$$

计算得到 $\gamma_s = \max\{\gamma_l | l=1, 2, \dots, N\}$, 即第 s 个排列组合对应的交叉定位点迹与雷达目标点迹空间分布相似程度最高, 然后依据第 s 个排列组合的交叉点依次判定多目标情况下的各 ESM 与雷达航迹在 k 时刻的关联情况。

2.2.2 对多个时刻的处理

经过上述处理, 设 k 时刻得到各个雷达与 ESM 的航迹关联关系, 用矩阵 $G(k) = [g_{ij}(k)]$ 表示, $g_{ij}(k) = 1$, 表明雷达目标 i 与 ESM 目标 j 关联, $g_{ij}(k) = 0$, 表明雷达目标 i 与 ESM 目标 j 不关联。为提高航迹关联性能得到更可信的关联结果, 对多个时刻进行序贯处理。假设可以得到 r 个时刻的关联结果, 即可得到矩阵集合 $\{G(k) | k=1, \dots, r\}$, 令 $Q = \sum_{k=1}^r G(k)$, 则 Q 包含了 r 个时刻的关联信息。采用最大判别规则, 即 $[v \ j] = \max(Q(i, :))$, $i=1, 2, \dots, n$, 其中, v 代表 Q 的第 i 行的最大值, j 代表 v 所在的列数, 则认为第 i 个雷达目标与第 j 个 ESM 目标关联。

3 仿真结果与分析

为了验证本文提出关联算法的有效性, 用本文的算法与文献[12]提出的基于角度统计量的算法关联性能进行仿真对比实验。仿真中, 正确关联概率为 $P_c = N_c / (N_c + N_e + N_s)$, 错误关联概率为 $P_e = N_e / (N_c + N_e + N_s)$, 漏关联概率为 $P_s = N_s / (N_c + N_e + N_s)$, 其中, N_c , N_e 和 N_s 依次为实验中正确、错误和漏关联的点迹对的数目, 且有 $P_c + P_e + P_s = 1$ 。

假设 ESM 与雷达分别位于 (0 km, 0 km) 和 (150 km, 0 km), 在目标存在区域随机产生 4 个匀速目标, 目标的初始速度和初始航向分别在 50 ~ 70 m/s 和 0 ~ 2π 内均匀分布。雷达与 ESM 已实现时间对准且采样时间均为 1 s。本文中, S 代表以 (80 km, 70 km) 与 (85 km, 75 km) 为对角的矩形作为目标存在区域, L 代表以 (80 km, 70 km) 与 (90 km, 80 km) 为对角的矩形作为目标存在区域。

实验 1 关联时长对算法的影响。假设 ESM 的测角误差为 0.7° ，雷达测角和测距误差为 0.5° 和 100 m ，允许的漏关联概率为 0.1 。在上述条件下各进行 100 次蒙特卡罗仿真，结果见图 2 和图 3。

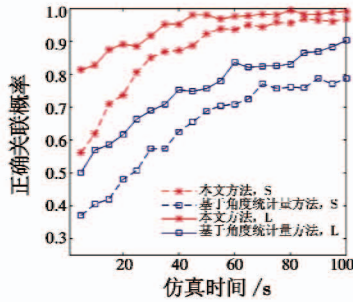


图 2 不同关联时长的正确关联概率

Fig. 2 The correct association probability for different length of association time

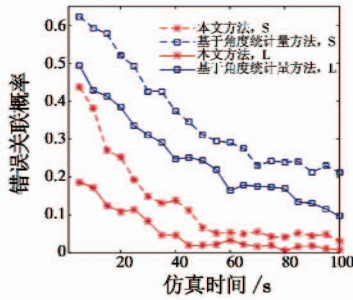


图 3 不同关联时长的错误关联概率

Fig. 3 The false association probability for different length of association time

从图 2 和图 3 可以看出，随着关联时长的增加，两种方法的正确关联概率也增加，错误关联概率减小。本文方法的正确关联概率增加得很快，在 $t = 30\text{ s}$ 左右就比基于角度统计量方法在 $t = 100\text{ s}$ 时的正确关联概率更高。本文方法的关联概率在 50 s 左右趋于稳定，基于角度统计量方法在 70 s 附近趋于稳定。稳定后，基于角度统计量方法在不同目标密集程度的正确关联概率相差 12% ，本文方法相差 3% ，说明基于角度统计量方法比本文方法更易受目标密集程度的影响。在 L 和 S 环境中，本文方法分别比基于角度统计量的方法正确关联概率高 10% 和 18% 。

实验 2 不同实验参数对算法的影响。仿真时间设为 50 s ，设置 3 组不同的参数如表 1 所示。在上述条件下各进行 100 次蒙特卡罗仿真，结果如图 4 所示。

表 1 不同实验组数的参数设置

Table 1 Parameters for different experiments

组数	$\sigma_{\theta A}/(^{\circ})$	$\sigma_{\theta B}/(^{\circ})$	σ_r/m
1	$0.1 \sim 1.2$	0.7	100
2	0.5	$0.1 \sim 1.2$	100
3	0.5	0.7	$20 \sim 200$

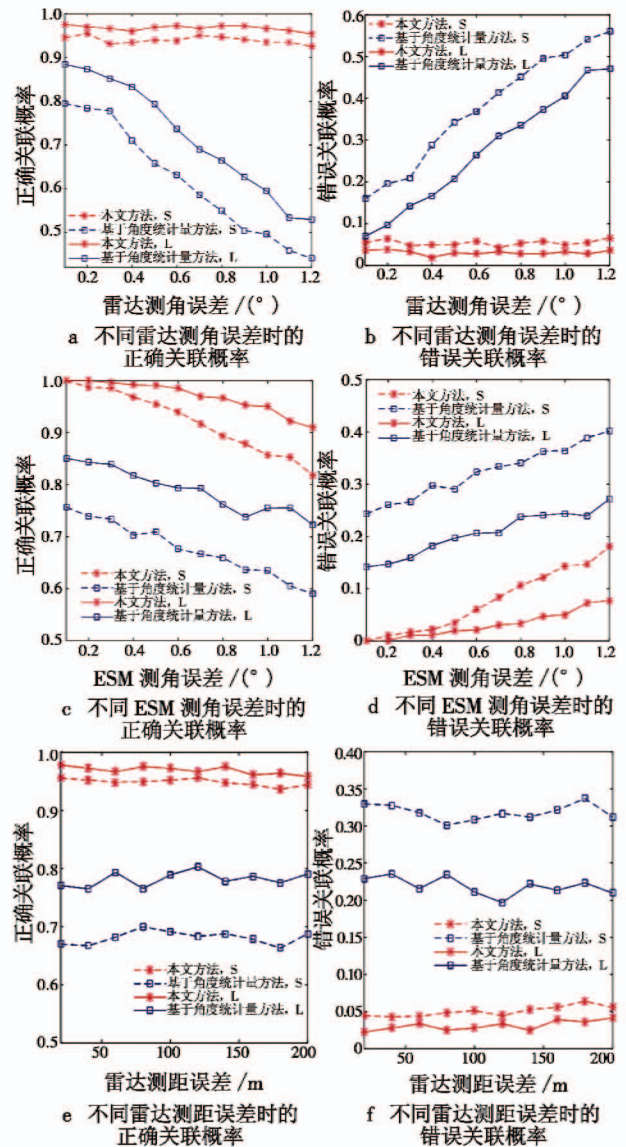


图 4 不同参数下雷达与 ESM 航迹关联概率

Fig. 4 The association probability of radar and ESM for different parameters

图 4a 和图 4b 是不同雷达测角误差对本文算法的影响结果。从图中可以看出，随着雷达测角误差的增大，基于角度统计量方法的正确关联概率减小，错误关联概率增加；本文方法性能略微下降，这是因为本文是比较交叉定位点与雷达目标的曲线形状，由于交叉定位点必然位于雷达目标的角度方向，所以两者之间的位置差异受雷达测角误差的影响比较小，故关联性能受雷达测角误差影响较小；在 L 和 S 环境中，基于角度统计量方法正确关联概率相差 8% ，而本文方法相差 3% 左右，说明基于角度统计量方法比本文方法更易受目标密集程度的影响，凸显了本文算法的稳健性优势。

图 4c 和图 4d 是不同 ESM 测角误差对本文算法的影响结果。从图中可以看出，随着 ESM 测角误差的

增大,两种方法的性能均有所下降。本文方法充分利用了多目标的空间分布信息,正确关联概率比基于角度统计量的方法高 19% 左右。本文方法在 ESM 测角误差较小时,在 L 和 S 环境中表现相当;当 ESM 测角误差较大时,密集环境中的关联性能下降较快。同样可以看出,基于角度统计量方法比本文方法更易受目标密集程度的影响。

图 4e 和图 4f 是不同雷达测距误差对本文算法的影响结果。从图中可以看出,随着雷达测距误差的增大,基于角度统计量的方法性能变化不大,本文方法略微下降。在 L 和 S 环境中,基于角度统计量方法正确关联概率相差 9%,而本文方法相差 1.5% 左右,说明基于角度统计量方法比本文方法更易受目标密集程度的影响。

4 结 论

本文就异地配置的雷达与 ESM 航迹关联问题进行了研究,提出了一种基于距离的局部关联和基于空间分布信息的两级关联算法。首先将所有的交叉点分成若干排列组合,基于距离的局部关联排除了部分虚假点,减少了可能关联组合的数目,提高了运算速度;基于空间形状信息的灰关联方法充分利用了目标的空间信息。蒙特卡罗仿真结果表明,相比于已有的方法,本文方法能更快更有效地实现航迹关联,且对密集环境适应能力强。

参 考 文 献

- [1] 何友,王国宏,关欣,等. 信息融合理论及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010:124-146.
- [2] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜,等. 多元信息融合[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2010:455-496.
- [3] 赵宗贵,刁联旺,李君灵,等. 信息融合工程实践——技术与方法[M]. 北京:国防工业出版社,2014:50-75.
- [4] WANG G H, MAO S Y, HE Y. Triple-threshold radar to ESM correlation algorithm when each radar track is specified by different number of measurements[J]. IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, 2000, 147(4): 177-187.
- [5] HUANG Y P, ZHOU Y F, ZHANG H B. Heterogeneous sensors track-to-track correlation algorithm based on gray correlative degree[C]//International Symposium on Computer Science and Computational Technology, 2008: 104-108.
- [6] WANG G H, MAO S Y, HE Y. Analytical performance evaluation of association of active and passive tracks for airborne sensors[J]. Signal Processing, 2003, 83(5): 973-981.
- [7] BENAMEUR K. Radar ESM track to track association[R]. Defence Research and Development Canada, Ottawa, 2001.
- [8] ZHOU Y F, LI W, LEUNG H. Maximum likelihood based ESM/radar track association algorithm in a new modified polar coordinate[R]. Defence Research and Development Canada, Ottawa, 2004.
- [9] WANG G H, ZHANG X Y, TAN S C. Effect of biased estimation on radar-to-ESM track association[J]. Journal of System Engineering and Electronic Techniques, 2012, 23(2): 188-194.
- [10] 陈中华,王国宏,刘德浩,等. 基于几何法的雷达与 ESM 航迹关联算法[J]. 电光与控制, 2012, 19(10): 10-12.
- [11] 宋振宇,张翔宇,张光轶. 系统误差对异地配置的雷达和 ESM 航迹关联的影响[J]. 电光与控制, 2014, 21(3): 42-46.
- [12] 王国宏,邵锡军,潘哲. 主被动传感器异地配置下的数据关联[J]. 现在雷达, 2003, 4(4): 26-29.
- [13] CHEN H, BAR-SHALOM Y. Track association and fusion with heterogeneous local trackers[C]//The 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, 2007: 12-14.
- [14] 董凯,关欣,王海鹏,等. 基于序贯修正灰关联度的全局最优航迹关联算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(8): 1939-1945.
- [15] GUAN X, HE Y, YI X. Grey track-to-track correlation tracking for distributed multitarget tracking system[J]. Signal Processing, 2006, 86(11): 3448-3455.
- [16] 修建娟,何友,王国宏,等. 两站无源定位系统中的多目标跟踪算法研究[J]. 电子学报, 2002, 30(12): 1763-1767.
- [17] 修建娟,何友,王国宏,等. 被动定位系统中的方位数据关联[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(3): 280-283.