

# 基于相对位置矢量的群目标灰色精细航迹起始算法

何友, 王海鹏, 熊伟\*, 董云龙

海军航空工程学院 信息融合研究所, 山东 烟台 264001

**摘要:**为解决群内目标精细航迹起始的难题,基于对传统航迹起始算法及现有群目标航迹起始算法优缺点的分析,给出了完整的群目标航迹起始框架,并提出了一种基于相对位置矢量的群目标灰色精细航迹起始算法。首先基于循环阈值模型、群中心点进行群的预分割、预关联,然后对预关联成功的群搜索对应坐标系,建立群中各量测的相对位置矢量,基于灰色精细互联模型完成群内量测的互联,最后基于航迹确认规则得到群目标状态矩阵。经仿真数据验证,与修正的逻辑法、基于聚类 and Hough 变换的多编队航迹起始算法相比,该算法在起始真实航迹、抑制虚假航迹及杂波鲁棒性等方面综合性能更优。

**关键词:** 群目标; 相对位置矢量; 灰色精细互联模型; 对应坐标系; 航迹起始

**中图分类号:** V243.2; TP953 **文献标识码:** A

在目标跟踪领域将聚集在一起且具有相似行为模式的多个目标称为群目标<sup>[1-5]</sup>,如飞机编队、导弹编队、集体行进的鸟群、鱼群、人群等。

群目标的航迹起始比传统多目标的航迹起始要复杂得多。传统的航迹起始算法对群目标的起始效果不理想<sup>[3-4,6]</sup>:第一,群中各目标空间距离较小,如果采用直观法<sup>[1]</sup>和逻辑法<sup>[1,7-8]</sup>对群中各目标分别建航,各目标的起始波门会严重交叉,因量测误差、外推误差的存在,群中目标与量测极易出现错误的交叉互联;第二,因为群中各目标行为模型相似,各目标回波前后时刻交叉关联性很强,错误的临时航迹能在后续时刻找到关联值,直观法、逻辑法等传统目标起始方法的确认航迹规则无法抑制错误航迹的输出,最终造成虚假航迹起始率增大;第三,如果采用基于 Hough 变换的各种航迹起始算法<sup>[1,9-10]</sup>对群中各目标建航,对需建航目标而言,其他目标的回波均为杂波,因误差的

存在,易出现局部极大值,造成群内各目标量测交叉关联,正确航迹起始率下降。

现有群目标航迹起始算法<sup>[6,11-12]</sup>大多首先基于 K 方法<sup>[1,13]</sup>、集群引晶方法<sup>[4,13]</sup>和图解法<sup>[14]</sup>等进行群分割,然后基于群的等效量测采用传统的目标起始算法进行群的互联和群速度的估计,最终得出群等效量测的状态值。其优点是避免了群内各目标间的交叉关联错误,降低了计算量;其缺点主要有两个:①因为随时可能有新成员加入群和旧成员离开群,而且当雷达分辨率较低时,群中量测可能丢失,所以在杂波环境下简单依靠空间距离直接对群分割不准确,群的互联和群速度的估计不稳定,起始航迹精确度较低;②在一些实际工程应用中,如低空编队突防目标的拦截及群内具有特殊价值的目标跟踪等,在跟踪整个群的同时,十分需要对群中个体目标准确建航,因而需要对群中个体目标进行航迹起始,即群目标的精细

收稿日期:2011-09-13; 退修日期:2011-11-22; 录用日期:2011-12-19; 网络出版时间:2012-04-07 18:40

网络出版地址:www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120407.1840.001.html

基金项目:国家自然科学基金(61032001,60801049)

\* 通讯作者. Tel.: 0535-6635671 E-mail: xiongweimail@tom.com

引用格式: He Y, Wang H P, Xiong W, et al. Refined gray track initiation algorithm of group targets based on relative position vectors. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(10): 1850-1863. 何友,王海鹏,熊伟,等.基于相对位置矢量的群目标灰色精细航迹起始算法.航空学报,2012,33(10):1850-1863.

航迹起始,然而现有群目标航迹起始算法只能得到群中心的状态,没有考虑群目标的精细航迹起始问题,漏航迹起始率较大。

为解决杂波环境下群目标的精细航迹起始问题,本文给出了群目标航迹起始的完整框架,提出了一种基于相对位置矢量的群目标灰色精细航迹起始算法,基于仿真及实测数据验证了算法的有效性。

## 1 单传感器群目标航迹起始框架

设  $Z(k)$  为传感器所获得的第  $k$  个量测集,即

$$Z(k) = \{z_i(k)\}, i = 1, 2, \dots, m_k \quad (1)$$

式中:  $m_k$  为量测个数;  $z_i(k) = [x \ y \ t]^T$  为雷达系统输出量测,  $t$  为输出量测  $z_i(k)$  的实际时间(现有部分雷达系统按扇区输出量测,即使在同一个探测周期中,各量测的输出时间也可能不同)。

设  $k$  时刻传感器已确认系统航迹由传统多目标航迹和群目标航迹组成,航迹起始过程包括传统多目标和群目标双重航迹起始过程,完整的起始框架如图 1 所示。

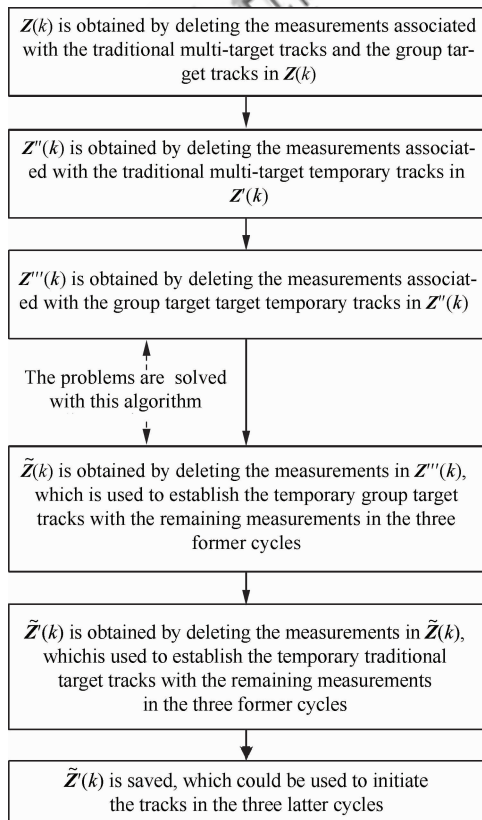


图 1 群目标航迹起始框架图

Fig. 1 Frame of the group target track initiation

## 2 基于相对位置矢量的群目标航迹起始算法

为完成群目标航迹起始框架中的第 3、4 步,本文提出了基于相对位置矢量的群目标灰色精细航迹起始算法,具体流程如图 2 所示。

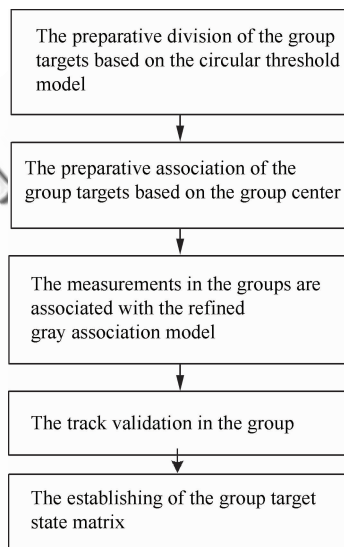


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the algorithm

### 2.1 基于循环阈值模型的群预分割

循环阈值模型<sup>[15]</sup>基于各量测空间距离与常数阈值间的大小关系完成群的预分割。预分割结果不作为群的最终分割结果,该点区别于现有的群目标航迹起始算法。定义  $Z'''(k)$  中  $z_{i_1}(k) = [x_{i_1k} \ y_{i_1k} \ t_{i_1k}]^T$  与  $z_{i_2}(k) = [x_{i_2k} \ y_{i_2k} \ t_{i_2k}]^T$  的距离为

$$d(z_{i_1}(k), z_{i_2}(k)) = \sqrt{(x_{i_1k} - x_{i_2k})^2 + (y_{i_1k} - y_{i_2k})^2} \quad (2)$$

式中:  $Z'''(k)$  为图 1 中第 3 步完成后得到的量测集;  $d_0$  为常数阈值,主要取决于群目标的类型(可根据目标出现的场景进行粗判断)。若  $d(z_{i_1}(k), z_{i_2}(k)) < d_0$ , 则判定量测  $z_{i_1}(k)$  和  $z_{i_2}(k)$  属于同一个群。具体预分割过程如图 3 所示。同理,对图 1 中第 2 步完成后得到的量测集  $Z''(k)$  和前 3 个周期的剩余量测可依照图 3 完成群的预分割,在此不再赘述。

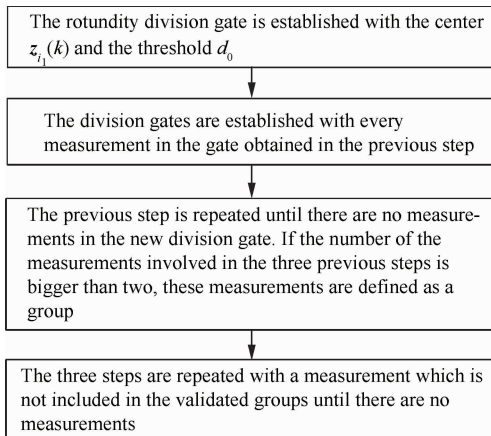


图3 循环阈值模型流程图

Fig. 3 Flow chart of the circulatory threshold model

## 2.2 基于群中心点的预互联

设预分割后  $Z''(k)$  包含  $m$  个群目标, 要完成群的预互联, 需要首先计算群目标的等效量测, 在此定义群的中心点为群的等效量测。设  $Z_j(k) = [\bar{x}_{jk} \quad \bar{y}_{jk} \quad \bar{t}_{jk}]$  为第  $j$  个群  $U_j$  的中心点, 且

$$\bar{x}_{jk} = \frac{1}{\bar{m}_j} \sum_{l=1}^{\bar{m}_j} x_{lk}^j, \quad \bar{y}_{jk} = \frac{1}{\bar{m}_j} \sum_{l=1}^{\bar{m}_j} y_{lk}^j, \quad \bar{t}_{jk} = \max_l \{t_{lk}^j\} \quad (3)$$

式中:  $\bar{m}_j$  为预分割后  $U_j$  的量测个数。记  $z_l^j(k) = [x_{lk}^j \quad y_{lk}^j \quad t_{lk}^j]^T$  为  $U_j$  的第  $l$  个量测, 定义  $\bar{R}_j(k)$  为  $Z_j(k)$  的量测误差协方差, 且

$$\bar{R}_j(k) = \frac{1}{\bar{m}_j} \sum_{l=1}^{\bar{m}_j} R_l^j(k) \quad (4)$$

式中:  $R_l^j(k)$  为  $z_l^j(k)$  的量测误差协方差。

为降低计算量, 规定从当前时刻向前 3 个时刻内的剩余量测有效。设  $Z_{j'} = [\bar{x}_{j'} \quad \bar{y}_{j'} \quad \bar{t}_{j'}]^T$  为  $k-3$  时刻到  $k$  时刻剩余量测中群目标  $U_{j'}$  的中心点, 若

$$d_{jj'}^T (\bar{R}_j + \bar{R}_{j'})^{-1} d_{jj'} \leq \gamma \quad (5)$$

则判定  $U_j$  与  $U_{j'}$  可建立新的群航迹头。式(5)中:  $\bar{R}_{j'}$  为  $Z_{j'}$  的量测误差协方差;  $\gamma$  为门限值;  $d_{jj'}$  的表达式为

$$d_{jj'} = [\max(0, \bar{x}_{jk} - \bar{x}_{j'} - v_{\max}^x t) + \max(0, -\bar{x}_{jk} + \bar{x}_{j'} + v_{\min}^x t) + \max(0, \bar{y}_{jk} - \bar{y}_{j'} - v_{\max}^y t) + \max(0, -\bar{y}_{jk} + \bar{y}_{j'} + v_{\min}^y t)]^T \quad (6)$$

式中:  $v_{\max} = [v_{\max}^x \quad v_{\max}^y]^T$ ,  $v_{\min} = [v_{\min}^x \quad v_{\min}^y]^T$

为群目标速度的最大值和最小值;  $t = \bar{t}_{jk} - \bar{t}_{j'}$ 。

若判断  $U_j$  与第  $j'$  条群目标临时航迹关联, 除需要满足式(5)外, 还需要满足一定的角度限制规则, 具体规则与直观法相同。

## 2.3 基于量测相对位置矢量的群内目标灰色精细互联

由群的定义可知, 群中各目标的相对位置是缓慢漂移的, 相邻几个周期内同一群中目标回波可构成一个结构相对稳定的整体, 发生仿射变换的幅度较小(主要受量测误差影响)。在航迹起始阶段, 对相邻时刻预互联成功的群目标而言, 其内部目标回波的相对位置关系基本不变, 只是整体发生了平移和旋转, 但前后周期内杂波的出现是随机的, 不存在真实目标回波所具有的整体关联性。这是基于量测相对位置矢量完成群内目标灰色精细互联的理论基础。

### 2.3.1 量测相对位置矢量的建立

设  $Z_1$  与  $Z_2$  为相邻周期预互联成功的两个群,  $Z_1$  在前,  $Z_2$  在后, 且

$$Z_1 = \{z_{l_1}^1\}_{l_1=1}^{\bar{m}_1}, \quad Z_2 = \{z_{l_2}^2\}_{l_2=1}^{\bar{m}_2} \quad (7)$$

式中:  $\bar{m}_1$  和  $\bar{m}_2$  为两个群中的量测个数。建立  $Z_1$  与  $Z_2$  中各量测的相对位置矢量可分为以下两步进行。

#### 1) 对应坐标系的建立

##### ①基本坐标系与参考坐标系的建立

在  $Z_1$  中任选两个量测  $z_1^1 = [x_1^1 \quad y_1^1]^T$  和  $z_2^1 = [x_2^1 \quad y_2^1]^T$ , 若  $Z_2$  中存在两个量测  $z_1^2 = [x_1^2 \quad y_1^2]^T$  和  $z_2^2 = [x_2^2 \quad y_2^2]^T$ , 其连线的长度、方向与  $z_1^1$  和  $z_2^1$  连线的长度、方向基本相同, 即满足式(8), 则以  $z_1^1$  和  $z_2^1$  连线的中点为原点仿照大地直角坐标系建立基本坐标系, 同理基于  $z_1^2$  和  $z_2^2$  建立参考坐标系。

$$\begin{cases} |d_1 - d_2| < a\sigma_\rho \\ |\theta_1 - \theta_2| < b\sigma_\theta \\ d_1 = \sqrt{(x_1^1 - x_2^1)^2 + (y_1^1 - y_2^1)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_1^2 - x_2^2)^2 + (y_1^2 - y_2^2)^2} \\ \theta_1 = c\pi + d \arcsin \frac{y_1^1 - y_2^1}{\sqrt{(x_1^1 - x_2^1)^2 + (y_1^1 - y_2^1)^2}} \\ \theta_2 = c\pi + d \arcsin \frac{y_1^2 - y_2^2}{\sqrt{(x_1^2 - x_2^2)^2 + (y_1^2 - y_2^2)^2}} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\sigma_\rho$  和  $\sigma_\theta$  分别为  $\rho$  方向与  $\theta$  方向上的量测误差标准差;  $a, b$  为阈值系数;  $c, d$  分别与量测  $(z_1^2 - z_1^1)$  和  $(z_2^2 - z_2^1)$  所在的象限有关, 若量测  $(z_1^2 - z_1^1)$  或  $(z_2^2 - z_2^1)$  处于第一象限, 则  $c=0, d=1$ , 若在第 2 象限, 则  $c=1, d=-1$ , 若在第 3 象限, 则  $c=2, d=-1$ , 若在第 4 象限, 则  $c=1, d=1$ 。

### ② 坐标原点综合量的建立

一个基本坐标系可能有满足式(8)的多个参考坐标系, 但实际最多只有一个与其构成对应关系。就坐标原点与群中各量测的整体关系而言, 对应坐标系最相近。因此, 可建立坐标原点综合量描述坐标原点与群中各量测的整体关系并完成对应坐标系的确认。

将基本坐标系和各参考坐标系从极轴开始沿顺时针方向划分为  $\hat{S}$  个象限<sup>[16]</sup>, 将基本坐标系与参考坐标系同一象限中的所有量测与各自原点连线, 并基于式(8)进行判断。对该象限内满足式(8)的各量测与坐标原点间的欧氏距离求和, 作为该象限的分量。以参考坐标系  $\hat{j}$  为例, 定义坐标原点综合量  $C_j$  为

$$C_j = \left[ \sum_{s=1}^{S_1} \rho^{0i_s^1} \quad \cdots \quad \sum_{s=1}^{S_{\hat{n}}} \rho^{0i_s^{\hat{n}}} \quad \cdots \quad \sum_{s=1}^{S_M} \rho^{0i_s^M} \right] \quad (9)$$

式中:  $\rho^{0i_s^{\hat{n}}} = \sqrt{(x_j^{20} - \hat{x}_{i_s^{\hat{n}}}^{20})^2 + (y_j^{20} - \hat{y}_{i_s^{\hat{n}}}^{20})^2}$  为参考坐标系  $\hat{j}$  坐标原点  $z_j^{20} = (z_{1j}^{20} + z_{2j}^{20})/2 = [x_j^{20} \quad y_j^{20}]^T$  与群中落入第  $\hat{n}$  个象限且满足式(8)的第  $s$  个量测的欧氏距离,  $S_{\hat{n}}$  表示象限  $\hat{n}$  中满足式(8)的量测数。

若假设象限数  $\hat{S} = 8$ , 群  $Z_2$  中有 7 个量测, 如图 4 所示。经检测后, 群  $Z_2$  在参考坐标系  $\hat{j}$  中有 5 个量测与群  $Z_1$  在基本坐标系中的量测满足式(8),  $z_4^2$  和  $z_6^2$  不满足。则参考坐标系  $\hat{j}$  的坐标原点综合量为  $C_j = [\rho^{03} \quad \rho^{02} \quad \rho^{05} \quad 0 \quad 0 \quad \rho^{01} + \rho^{07} \quad 0 \quad 0]$ 。同理可得基本坐标系  $\hat{i}$  和  $\hat{M}$  个参考坐标系的坐标原点综合量  $B_i$  和  $C_j, j = 1, 2, \dots, \hat{M}$ 。

### ③ 对应坐标系的确认

为便于比较参考坐标系与基本坐标系之间的相似性, 基于式(10)建立统计量  $T_{ij}$ , 并选取  $T_{ij}$  最小的基本坐标系与参考坐标系为对应坐标系。

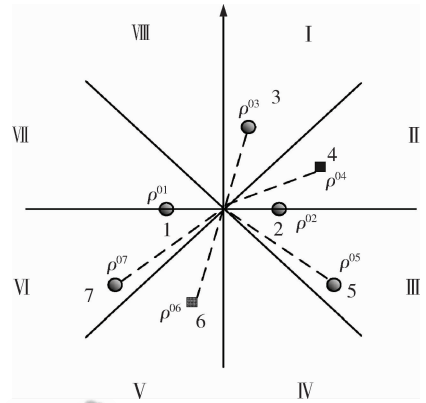


图 4 参考坐标系  $\hat{j}$  中量测的相对位置示意图  
Fig. 4 Relative positions of the measurements in the reference coordinates  $\hat{j}$

$$T_{ij} = 1 - \frac{B_i C_j^T}{\sqrt{|B_i| |C_j|}} \quad \hat{i} = 1, 2, \dots, \hat{N}; \hat{j} = 1, 2, \dots, \hat{M} \quad (10)$$

式中:  $\hat{N}$  为基本坐标系的个数。

### 2) 相对位置矢量的建立

当对应坐标系确认后, 可建立群  $Z_2$  中各量测的相对位置矢量  $W_2 = \{w_{l_2}^2\}, l_2 = 1, 2, \dots, n_2$ , 其中  $w_{l_2}^2 = \text{pol}([x_{l_2}^{20} \quad y_{l_2}^{20} \quad y_{l_2}^{20} - y_j^{20}]^T) = [\rho_{l_2}^2 \quad \theta_{l_2}^2]$  (11)

式中:  $\text{pol}(\cdot)$  为将直角坐标变换成极坐标的函数;  $[x_j^{20} \quad y_j^{20}]^T$  为参考坐标系  $j^*$  坐标原点在大地直角坐标系中的坐标;  $[\rho_{l_2}^2 \quad \theta_{l_2}^2]$  为量测  $z_{l_2}^2$  相对坐标原点的距离和方位。同理可得,  $Z_1$  中各量测的相对位置矢量  $W_1 = \{w_{l_1}^1\}, l_1 = 1, 2, \dots, n_1$ 。

### 2.3.2 灰色精细互联模型的建立

$Z_1$  和  $Z_2$  中目标回波在对应坐标系中的位置基本相同, 而相对位置矢量描述了各量测在对应坐标系中的位置, 因此, 可基于各量测的相对位置矢量, 判断不同时刻预关联群中量测的相似程度, 实现杂波的剔除及群内目标的精细互联。本文采用灰色理论<sup>[17]</sup>解决该问题。

#### 1) 问题的描述

为考虑问题的方便, 只考虑相邻两个周期内的关联群。把来自群  $Z_1$  的  $l_1$  个量测看做是  $l_1$  个已知模式, 把来自  $Z_2$  的量测  $z_{l_2}^2$  看做是待识别模式, 则不同周期预互联群内目标量测的精细互联转化为一个典型的模式识别问题。

## 2) 量测相对位置矢量间的灰关联度

## ①数据列的确定

选取  $Z_2$  的量测  $z_{l_2}^2$  为参考矢量, 记为  $w_0 = \{w_{l_2}^2(g), g=1, 2\}$ 。设  $Z_1$  中的  $n_1$  个量测为比较矢量, 记为  $w_{l_1} = \{w_{l_1}(g), g=1, 2, l_1=1, 2, \dots, n_1\}$ 。

## ②数据的标准化

为保证数据具有可比性, 在进行灰关联分析时, 需要对数据列进行生成处理, 这里采用区间值法对量测相对位置特征数据进行归一化。

$$w_{l_1}(g) = \frac{w_{l_1}(g) - \min_{l_1} w_{l_1}(g)}{\max_{l_1} w_{l_1}(g) - \min_{l_1} w_{l_1}(g)}, \quad l_1=1, 2, \dots, n_1 \quad (12)$$

$$w_0(g) = \frac{w_0(g) - \min_{l_1} w_{l_1}(g)}{\max_{l_1} w_{l_1}(g) - \min_{l_1} w_{l_1}(g)}, \quad l_1=1, 2, \dots, n_1 \quad (13)$$

## ③计算灰关联系数

根据量测误差标准差  $\sigma = [\sigma_\rho \quad \sigma_\theta]^T$ , 推导参考矢量  $w_0$  与比较矢量  $w_{l_1}$  的关联系数为

$$\xi_{l_1}(g) = \frac{\sigma(g)}{\sigma(g) + |w_{l_1}(g) - w_0(g)| \cdot A(g)} \quad (14)$$

式中:  $A(g) = (\max_{l_1} w_{l_1}(g) - \min_{l_1} w_{l_1}(g))$ 。于是可得参考矢量  $w_0$  与比较矢量  $w_{l_1}$  的关联系数为  $\xi_{l_1} = \{\xi_{l_1}(g), g=1, 2\}$ 。

## ④计算灰关联度

为便于比较, 需要将关联系数的各个指标集中体现在一个值上, 该值称为灰关联度。记比较矢量  $w_{l_1}$  对参考矢量  $w_0$  的灰关联度为  $\gamma(w_0, w_{l_1})$ , 简记为  $\gamma_{l_1}$ 。由式(11)可知, 量测的相对位置矢量由群中量测与对应坐标系原点的距离和方位组成, 在不考虑系统误差的情况下, 距离和方位信息受量测噪声的影响, 当距离量测噪声较大时, 目标的雷达探测距离与真实距离相差较大, 距离信息对量测相对位置的贡献可信度较低, 此时应赋予距离信息指标较小的权值; 同理适用于方位信息指标。定义灰关联度为

$$\gamma_{l_1} = \lambda_1 \xi_{l_1}(\rho) + \lambda_2 \xi_{l_1}(\theta) = \frac{\sigma(\theta)\sigma_{\max}(\rho)\xi_{l_1}(\rho) + \sigma(\rho)\sigma_{\max}(\theta)\xi_{l_1}(\theta)}{\sigma(\rho)\sigma_{\max}(\theta) + \sigma(\theta)\sigma_{\max}(\rho)} \quad (15)$$

式中:  $\sigma_{\max} = [\sigma_{\max}(\rho) \quad \sigma_{\max}(\theta)]^T$  为雷达量测误

差标准差的最大值; 在无法确定  $\sigma_{\max}$  的情况下, 取  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$  一般可满足要求。

## 3) 灰关联量测精细互联准则

当获得描述两个量测在对应坐标系相对位置接近程度的灰关联度之后, 需判决两量测是否互联。为了给出量测  $z_{l_2}^2$  与  $z_{l_1}^1$  ( $l_1=1, 2, \dots, n_1$ ) 的互联判决, 需要对灰关联度按从大到小排序, 得出灰关联序。在此采用最大关联度识别原则, 即

$$\gamma^* = \max_{l_1} \gamma_{l_1} \quad (16)$$

且

$$\gamma^* > \epsilon \quad (17)$$

则判决量测  $z_{l_2}^2$  与  $z_{l_1}^1$  互联, 且  $z_{l_2}^2$  不再与其他任何量测互联; 否则, 判定量测  $z_{l_2}^2$  为杂波。式(17)中:  $\epsilon$  为阈值参数,  $\epsilon \leq 1$ , 具体取值与构成  $w_0$  和  $w_{l_1}$  的所有量测及量测误差  $\sigma$  有关, 计算公式为附录 A 中式(A13), 具体推导过程请见附录 A。最终可得到  $Z_1$  和  $Z_2$  中对应互联的量测集合  $\hat{Z} = \{[z_c^1 \quad z_c^2]\}_{c=1}^C$ , 其中  $C$  为互联量测对的个数。

## 2.4 群内航迹的确认

基于对应互联量测集建立可能航迹后, 利用 3/4 逻辑规则<sup>[1]</sup>, 完成群中各目标确认航迹的输出, 进一步降低虚假航迹起始率。

为更清晰地描述航迹确认过程, 在此举例说明。设图 5 为连续 4 个处理周期某个预关联群中量测的分布情况; 基于灰色精细互联模型可形成

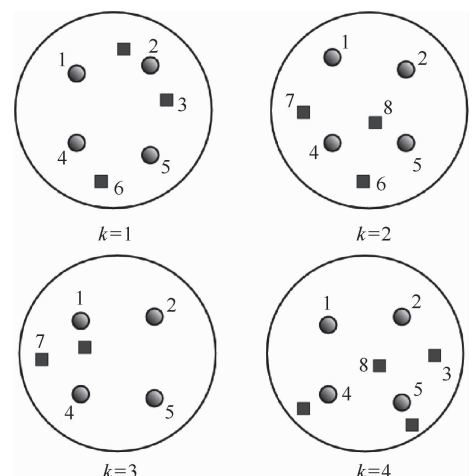


图 5 预关联群量测分布示意图

Fig. 5 Measurement distribution of the preparatory associated group

8条可能航迹,图中标有同一序号的量测隶属同一条航迹,然而超过3个关联量测的航迹只有{1, 2, 4, 5},根据3/4逻辑规则,只有这4条航迹为确认航迹,输出{1, 2, 4, 5}并撤销其他航迹。

## 2.5 群目标状态矩阵的建立

为充分描述群目标的状态,基于式(18)建立群目标状态矩阵,其中,第一列为群中心的状态,其余的 $n$ 列为群中 $n$ 条确认航迹的状态。在此需要说明的是,群中心的状态及状态协方差由群中各确认航迹确定,与预分割及预互联结果无关。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & \cdots & x_n \\ \dot{x}_0 & \dot{x}_1 & \cdots & \dot{x}_n \\ y_0 & y_1 & \cdots & y_n \\ \dot{y}_0 & \dot{y}_1 & \cdots & \dot{y}_n \\ t_0 & t_1 & \cdots & t_n \end{bmatrix} \quad (18)$$

## 3 算法仿真验证与分析

为验证算法性能和有效性,本文采用100次蒙特卡罗仿真,对本文所提出的基于相对位置矢量的群目标灰色精细航迹起始算法(Group算法)与修正的逻辑法(Logic算法)及文献[11]提出的基于聚类及Hough变换的多编队航迹起始算法(Center算法)就航迹起始性能进行比较与分析。

### 3.1 仿真环境

假定雷达的采样周期 $T=1$  s,雷达的测向误差和测距误差分别为 $\sigma_\theta=0.3^\circ$ 和 $\sigma_r=40$  m。为比较各算法在不同仿真环境中的航迹起始性能,设置以下3种典型环境:

**环境1** 模拟杂波下稀疏群目标环境。设在一二维平面上存在10个目标,其中8个目标构成2个群,稀疏群目标环境群中各目标的距离一般处于区间(600 m, 1 000 m)中。第1个群做匀速直线运动,由前4个目标组成,各目标的初始位置分别为(5 000 m, 800 m)、(5 400 m, 1 400 m)、(5 850 m, 1 500 m)和(6 100 m, 900 m),初始速度均为[0 m/s 300 m/s];第2个群做机动运动,由第5~8个目标组成,各目标的初始位置分别为(-5 000 m, 10 000 m)、(-5 200 m, 9 400 m)、(-4 900 m, 8 600 m)和(-5 300 m, 8 000 m),初

始速度均为[-270 m/s 270 m/s],初始加速度均为[5 m/s<sup>2</sup> -10 m/s<sup>2</sup>];剩余2个目标做匀速直线运动,初始位置分别为(10 000 m, -8 000 m)和(-10 000 m, -8 000 m),初始速度分别为[-240 m/s 200 m/s]和[200 m/s 230 m/s]。

仿真中杂波的产生分为两部分。对普通目标 $T_0$ 而言,以 $T_0$ 为中心在极坐标下建立一个边长为[10  $\sigma_\rho$ , 10 $\sigma_\theta$ ]的矩阵,在此矩阵中均匀产生 $\lambda_1$ 个杂波;对群目标 $\mathbf{G}$ 而言,计算群目标的中心点 $\bar{\mathbf{G}}$ ,以 $\bar{\mathbf{G}}$ 为中心在极坐标下建立一个边长为[2  $\Delta G_\rho + 10 \sigma_\rho$ , 2  $\Delta G_\theta + 10 \sigma_\theta$ ]的矩阵(其中 $\Delta G_\rho$ 、 $\Delta G_\theta$ 为 $\mathbf{G}$ 中各量测在极坐标系两坐标轴上的最大差值),在此矩阵中均匀产生 $\lambda_2$ 个杂波。在此,取 $\lambda_1=2$ , $\lambda_2=4$ 。

**环境2** 模拟杂波下密集群目标环境。密集群目标环境群中各目标的距离一般处于区间(100 m, 300 m)中,第1个群中各目标的初始位置变为(5 000 m, 800 m)、(5 200 m, 850 m)、(5 350 m, 900 m)和(5 550 m, 830 m);第2个群中各目标的初始位置变为(-5 000 m, 10 000 m)、(-5 100 m, 9 800 m)、(-5 000 m, 9 650 m)和(-5 050 m, 9 500 m);其他参数同环境1。

**环境3** 为验证各算法综合起始能力随杂波及传感器测量误差的变化情况,在环境1的基础上,杂波(单位为个)、测距误差 $\sigma_\rho$ (单位为m)及测角误差 $\sigma_\theta$ (单位为 $^\circ$ )的取值如表1所示。

表1 环境3中杂波及测量误差取值表

Table 1 The number of clutter and measurement error in Environment 3

$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\sigma_\rho/\text{m}$	$\sigma_\theta/^\circ$
1	2	20	0.1
2	4	40	0.3
3	6	60	0.5
4	8	70	0.7
5	10	80	0.9
6	12	100	1.2

### 3.2 仿真结果及分析

1) 图6为10个目标的整体态势局部放大图,图中包括2个群目标和2个普通目标;图7为前4

个周期传感器量测分布图,从图 7 中可以看出,与传统目标相比,群的量测分布要密集很多;图 8 为环境 1 下目标真实航迹图;图 9 为环境 1 下 Logic、Group 和 Center 3 种算法分别对第 1 个群目标(图 9(a)~图 9(c))、第 2 个群目标(图 9(d)~图 9(f))、第 1 个普通目标(图 9(g)~图 9(i))的航迹起始比较图;图 10 为环境 2 下目标真实航迹图;图 11 为环境 2 下 3 种算法的航迹起始比较图,其中,图 11(a)~图 11(c)对应第 1 个群目标,图 11(d)~图 11(f)对应第 2 个群目标,图 11(g)~图 11(i)对应第 1 个普通目标。两种环境下群的运动状态相似,但就群中各航迹的密集程度而言,后者高于前者。将图 9、图 11 与图 8、图 10 对应比较可知,对两种环境下的群量测而言,Logic 算法起始出多条虚假航迹,已无法辨别出群的真实运动态势,Center 算法对每个

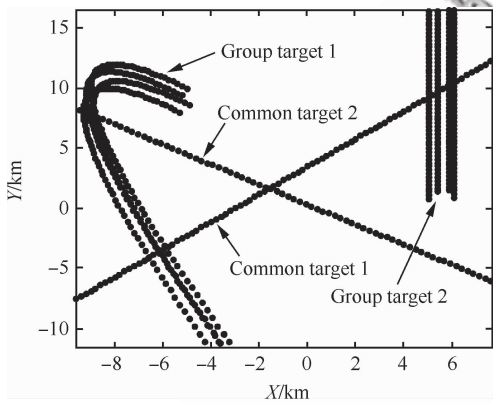


图 6 目标整体态势图(环境 1)

Fig. 6 Overall situation of the targets (Environment 1)

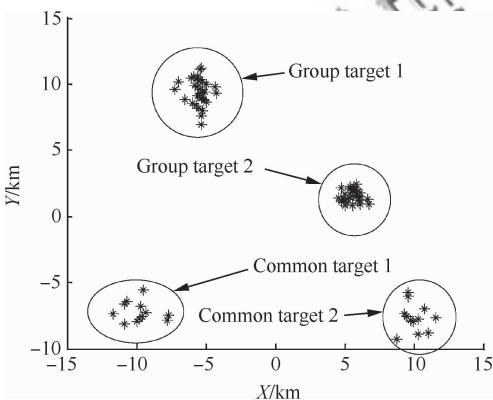


图 7 前 4 个周期量测分布图(环境 1)

Fig. 7 Measurement distribution in the four former cycles (Environment 1)

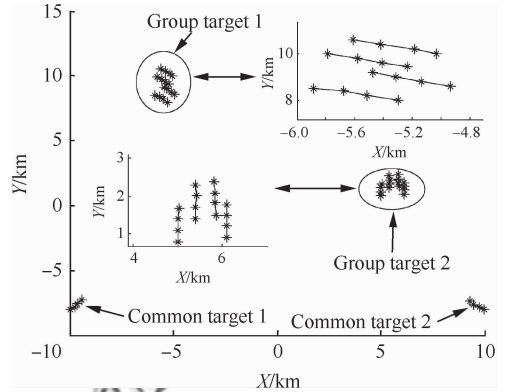


图 8 前 4 个周期各目标真实航迹图(环境 1)

Fig. 8 True tracks of the targets in the four former cycles (Environment 1)

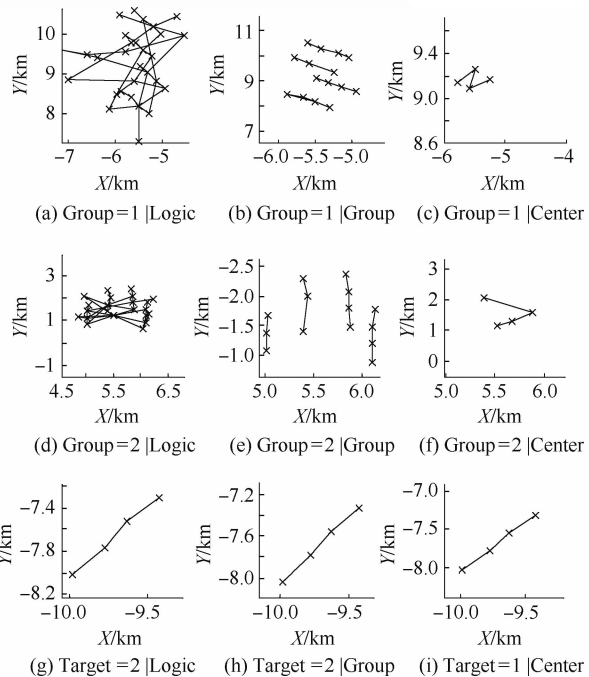


图 9 3 种算法航迹起始比较图(环境 1)

Fig. 9 Track initiation of the three algorithms (Environment 1)

群只能建立 1 条航迹,且航迹精确度较低;Group 算法可基本准确地起始出群中各目标,只在图 11 第 1 个群的起始图中出现了一次航迹交叉,整体效果明显优于 Logic、Center 两种算法;对普通目标而言,因各算法采用的起始逻辑一致,起始效果相同。

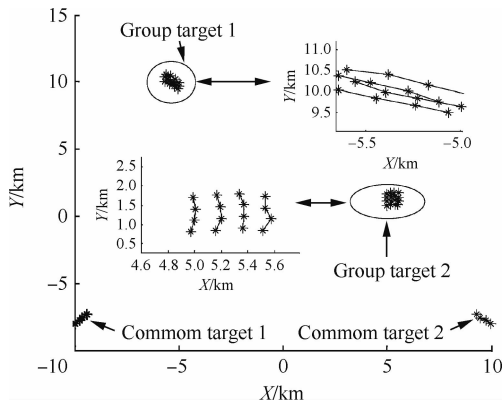


图 10 前 4 个周期各目标真实航迹图(环境 2)

Fig. 10 True tracks of the targets in the four former cycles (Environment 2)

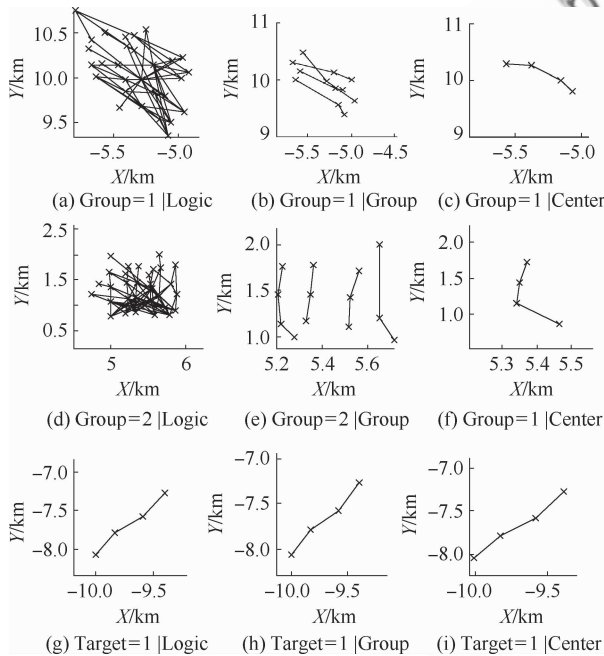


图 11 3 种算法航迹起始比较图(环境 2)

Fig. 11 Track initiation of the three algorithms (Environment 2)

造成上述结果的原因为:Logic 算法为非抢占式的,即已参加建航的量测仍可为其他航迹所用,如此可保证较高的正确航迹起始率及航迹精度,但会增加虚假航迹起始率;Center 算法基于群的中心点进行起始,最多只能起始出 1 条航迹,固会造成态势的丢失,而且因为杂波的存在,易造成群中心点偏离真实值,进而降低所建立航迹

的精确度,严重时甚至无法建航;Group 算法对各互联群基于量测相对矢量进行群内精心建航,最大限度地消除了杂波的影响,并基于 3/4 逻辑剔除虚假航迹,保证了较高的正确航迹起始率和较低的虚假航迹起始率。

2) 为了量化各算法航迹起始效果的优劣,本文建立了整体起始航迹质量与整体起始航迹精度两项指标,并给出了 50 次仿真(每次仿真包括 100 次蒙特卡罗仿真)中各算法基于两项指标的比较图,指标建立过程可分为以下 3 步。

### ① 起始航迹真伪的判断

设航迹起始算法基于 4 个周期的量测共建立  $T_i$  条航迹,其中第  $i$  条航迹的状态为  $\hat{\mathbf{X}}_i = [\hat{g}_i \quad \hat{v}_{ix} \quad \hat{y}_i \quad \hat{v}_{iy}]^T$ ,要计算该算法的整体起始航迹质量与整体起始航迹精度,首先需要判断  $T_i$  条航迹中真实航迹的个数,设此时  $T$  个目标的真实航迹为  $\{\mathbf{X}_j = [x_j \quad v_{jx} \quad y_j \quad v_{jy}]^T\}_{j=1}^T$ ,若  $\hat{\mathbf{X}}_i$  与  $\mathbf{X}_j$  满足式(19),则  $\hat{\mathbf{X}}_i$  为真实航迹  $\mathbf{X}_j$  的候选对应航迹:

$$\begin{cases} |\hat{\rho}_i - \rho_j| < \xi_\rho \\ |\hat{\theta}_i - \theta_j| < \xi_\theta \\ |\Delta d| < \xi_d \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $\xi_\rho$ 、 $\xi_\theta$  和  $\xi_d$  分别为判断速度大小、速度方向和位置距离大小的阈值,与量测误差有关;  $(\hat{\rho}_i, \hat{\theta}_i) = \text{pol}(\hat{v}_{ix}, \hat{v}_{iy})$ ,  $(\rho_j, \theta_j) = \text{pol}(v_{jx}, v_{jy})$ ; 如果第  $i$  条航迹包含 4 个量测,则

$$\Delta d = \sqrt{(\hat{x}_i - x_j)^2 + (\hat{y}_i - y_j)^2} \quad (20)$$

如果第  $i$  条航迹只包含 3 个量测,则

$$\Delta d = \min(\sqrt{(\hat{x}_i - x_j)^2 + (\hat{y}_i - y_j)^2}, d') \quad (21)$$

式中:  $d' = \sqrt{(\hat{x}_i - x_{3j})^2 + (\hat{y}_i - y_{3j})^2}$ ,  $(x_{3j}, y_{3j})$  为第  $j$  条真实航迹的第 3 个测量点。

$\{\hat{\mathbf{X}}_i\}_{i=1}^{T_i}$  中  $\mathbf{X}_j$  候选对应航迹可能有多条,定义综合量  $D_{ij}$  进行判断,

$$D_{ij} = |\hat{\rho}_i - \rho_j| + |\hat{\theta}_i - \theta_j| + \Delta d \quad (22)$$

$$i^* = \arg \min_{i=1, T'} (D_{ij}) \quad (23)$$

式中:  $T'$  为  $\mathbf{X}_j$  候选对应航迹的个数。将  $\hat{\mathbf{X}}_{i^*}$ 、 $\mathbf{X}_j$  置零,其不能参加其他航迹真伪的判断;将表示真实航迹个数的  $l_{\text{true}}$  加 1,并存储  $D_{i_{\text{true}}} = D_{i^* j}$ 。

### ② 整体起始航迹质量的建立



航迹起始要求尽可能多地起始真实航迹,同时尽可能少地起始虚假航迹,所以可以利用正确航迹起始率、错误航迹起始率及漏航迹起始率综合表示一种算法的优劣。利用式(24)定义一种算法整体起始航迹质量  $P_{qu}$ , 其分子为算法虚假航迹起始率与漏航迹起始率之和,分母为正确航迹起始率。 $P_{qu}$  越小,航迹起始效果越好。

$$P_{qu} = \frac{\left(1 - \frac{l_{true}}{T}\right) + \frac{(T_l - l_{true})}{T}}{\frac{l_{true}}{T}} \quad (24)$$

### ③整体起始航迹精度的建立

航迹起始要求建立的航迹状态与真实航迹尽可能一致,可以通过起始航迹的位置、速度等状态的精度判读一个起始算法的优劣,利用式(25)定义一种算法整体起始航迹精度  $P_{pr}$ , 其中  $D_i$  充分包含了位置、速度大小、速度方向上的精度信息,所以  $P_{pr}$  越小,航迹起始效果越好。

$$P_{pr} = \frac{\sum_{i=1}^{l_{true}} D_i}{l_{true}} \quad (25)$$

图 12 和图 13 为环境 1 和环境 2 下 50 次仿真中各算法整体起始航迹质量比较图。从图 12 和图 13 中可以看出,Group 算法的整体航迹质量远高于 Logic 算法与 Center 算法。其原因为:Logic 算法为非抢占式的,因而正确航迹起始率很高,漏起始率很低,但同时虚假航迹起始率要远远高于其他两种算法,从而拉低了该算法的整体起始航迹质量;Center 算法简单基于群的中心点建航,虚假航迹起始率相对较低,但正确航迹起始率较

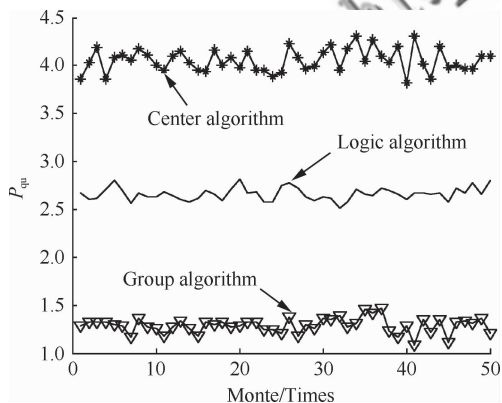


图 12 各算法整体起始航迹质量比较图(环境 1)

Fig. 12 Overall initiation track quality of the algorithms (Environment 1)

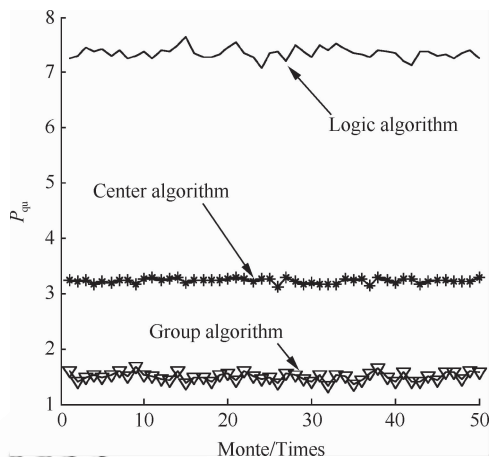


图 13 各算法整体起始航迹质量比较图(环境 2)

Fig. 13 Overall initiation track quality of the algorithms (Environment 2)

低,漏起始率较高,同样拉低了该算法的整体起始航迹质量;Group 算法正确航迹起始率可能略低于 Logic 算法,但其虚假航迹起始率远低于 Logic 算法,故总体质量远高于 Logic 算法;Group 算法虚假航迹起始率可能与 Center 算法相当,但其正确航迹起始率要远高于 Center 算法,所以总体质量同样远高于 Center 算法。

图 14 和图 15 为环境 1 和环境 2 下 50 次仿真中各算法整体起始航迹精度比较图。从图 14 和图 15 中可以看出,Logic 算法整体航迹精度最高,Group 算法次之,Center 算法最差。其原因为:Logic 算法中各量测均参与多条航迹的起始,

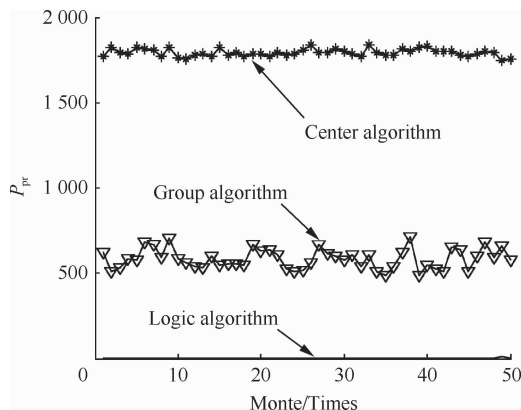


图 14 各算法整体起始航迹精度比较图(环境 1)

Fig. 14 Overall initiation track precision of the algorithms (Environment 1)

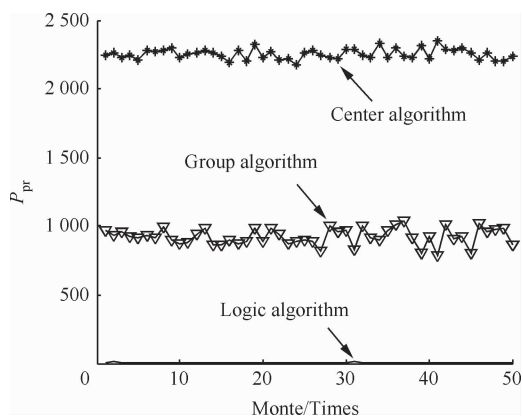


图 15 各算法整体起始航迹精度比较图(环境 2)

Fig. 15 Overall initiation track precision of the algorithms (Environment 2)

每条航迹均能找到最佳的关联点; Group 算法为抢占式算法, 每个量测只能与 1 条航迹关联, 当出现量测关联错误的情况时, 会影响其他航迹找到真实的关联点, 在一定程度上降低了整体起始航迹精度; Center 算法利用群中心点起始航迹, 但在杂波存在的情况下, 群分割时易将杂波纳入群中, 造成群中心点偏离真实值, 故利用群中心点起始的群航迹精度较低。

3) 为验证本文算法对杂波及传感器测量误差的适应能力, 基于环境 3 分别给出了 3 种算法正确航迹起始率(Correct Track Initiation Probability, CTIP)及错误航迹起始率(Error Track Initiation Probability, ETIP)随两种指标的变化比较表(见表 2 和表 3)。

从表 2 可以看出, 随杂波数的增大, Logic 算法的正确起始率一直最高, 几乎能确保起始出所有的真实航迹, 原因是该算法对所有满足关联条

件的量测均建立航迹, 没有考虑量测的重复使用问题, 所以在其建立的航迹中肯定包含真实航迹, 漏航迹起始率几乎为零, 但这样做的代价是建立了多条虚假航迹, 其虚假航迹起始率要远高于其他两种算法, 在杂波数为(6, 12)时, 其错误航迹起始率(虚假航迹起始率与漏航迹起始率之和)高达 12.987 0, 即该算法起始出 120 多条虚假航迹, 是其他两种算法的 10 倍以上; Center 算法的正确起始率有所下降, 且始终低于 40%, 不能满足实际的工程需求, 原因是该算法对 1 个群只能建立 1 条航迹, 虽然保证了较低的虚假航迹起始率, 但漏起始率较高, 而且当杂波很密集时, 其虚假航迹起始率会增大; Group 算法因为基于相对位置矢量对群内量测进行了专门处理, 受杂波的影响较小, 虽然正确航迹起始率略有下降, 错误航迹起始率略有上升, 但总体起始效果保持在一个较高水平, 对杂波的鲁棒性优于其他两种算法。

从表 3 可以看出, 随着量测误差的增大, 3 种算法的正确航迹起始率都有所下降, 错误航迹起始率都有所上升, 其中 Center 算法的变化幅度最小, 因为 Center 算法的航迹形成由群航迹与普通目标航迹两部分组成, 量测误差对群的分割影响较小, 而该算法形成群航迹的个数只与群的个数有关, 进而对群航迹形成影响较小, 所以量测误差对该算法的影响只来源于对普通目标航迹的影响; Logic 算法的变化幅度居中, 因为该算法将群看做普通目标处理, 所以量测误差对群目标航迹同样产生了影响; Group 算法的变化幅度相对较大, 因为该算法对群内目标精细起始的前提是群中各目标的相对位置是缓慢漂移的, 而当量测误差较大时, 航迹起始阶段同一群中各目标量测

表 2 各算法正确航迹起始率及错误航迹起始率随杂波数变化比较表

Table 2 Variation of true track initiation ratio and error track initiation ratio of the algorithms with the number of clutters

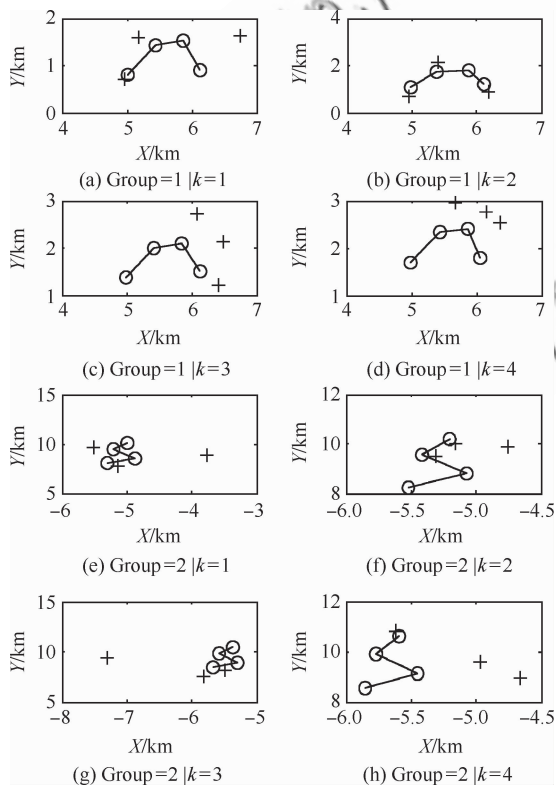
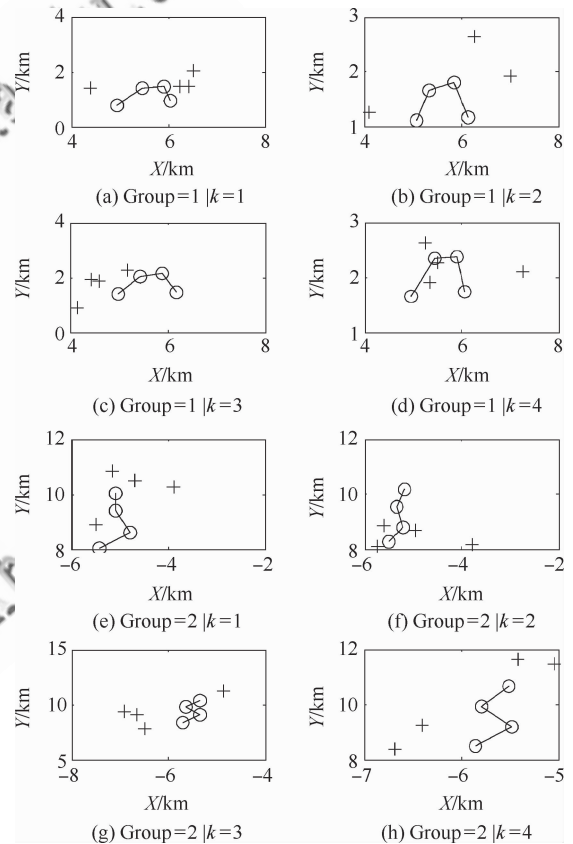
Clutter		CTIP			ETIP		
$\lambda_1$	$\lambda_2$	Logic	Group	Center	Logic	Group	Center
1	2	1.000 0	0.885 0	0.345 0	1.336 0	0.428 0	0.723 0
2	4	1.000 0	0.749 0	0.357 0	2.647 0	0.653 0	0.798 0
3	6	0.999 0	0.705 0	0.372 0	4.487 0	0.749 0	0.943 0
4	8	1.000 0	0.649 0	0.373 0	6.791 0	0.991 0	1.100 0
5	10	1.000 0	0.609 0	0.212 0	9.405 0	1.270 3	1.040 0
6	12	0.999 0	0.536 0	0.197 0	12.987 0	1.537 0	0.968 0

表3 各算法正确航迹起始率及错误航迹起始率随量测误差变化比较表

Table 3 Variation of true track initiation ratio and error track initiation ratio of the algorithms with the measurement errors

Measurement error		CTIP			ETIP		
$\sigma_\rho$	$\sigma_\theta$	Logic	Group	Center	Logic	Group	Center
20	0.1	1.000 0	0.795 0	0.345 0	1.306 0	0.412 0	0.798 0
40	0.3	1.000 0	0.786 0	0.343 0	1.307 0	0.431 0	0.721 0
60	0.5	0.988 0	0.738 0	0.337 0	1.200 0	0.456 0	0.711 0
70	0.7	0.918 0	0.680 0	0.307 0	1.325 0	0.563 0	0.759 0
80	0.9	0.838 0	0.619 0	0.234 0	1.530 0	0.627 0 <td 0.809 0	
100	1.2	0.736 0	0.559 0	0.197 0	1.824 0	0.696 0	0.868 0

的整体形状仿射变化的幅度较大,降低了基于相对位置矢量判断群中各量测精细互联关系的准确度,造成量测关联错误,增大了错误航迹起始率。图16与图17为两种量测误差下前4个周期群目标1和群目标2的量测分布示意图,图中用实线相连的4个点为各周期群目标的真实量测,其他点为杂波(用+号表示);从图中可以看出,后者前4个周期同一群目标的仿射变化幅度明显大于前者。

图16 前4个周期群目标量测分布示意图( $\sigma_\theta = 0.3^\circ$ ,  $\sigma_r = 40$  m)Fig. 16 Measurement distribution of the groups in the four former cycles ( $\sigma_\theta = 0.3^\circ$ ,  $\sigma_r = 40$  m)图17 前4个周期群目标量测分布示意图( $\sigma_\theta = 1.2^\circ$ ,  $\sigma_r = 100$  m)Fig. 17 Measurement distribution of the groups in the four former cycles ( $\sigma_\theta = 1.2^\circ$ ,  $\sigma_r = 100$  m)

## 4 结论

为解决群内目标的精细互联问题,本文提出了一种基于相对位置矢量的群目标灰色精细航迹起始算法,该算法的优点为

- 1) 对群目标与普通目标分类处理,避免了传

统航迹起始算法起始群目标时虚假航迹率过高的缺点。

2) 对预关联成功的群进行精细处理,基于相对位置矢量利用灰色理论可对群内目标分别建航,避免了现有群目标航迹起始算法简单基于群等效量测建航造成态势丢失、航迹精度下降的缺点。

3) 通过群中各量测的相对位置矢量最大限度地剔除了群中杂波,对杂波的适应能力较强,避免了产生大量的虚假量测,同时保证了起始航迹的整体精度。

该算法的缺点是当量测误差很大时,群的形状仿射变化可能较大,此时该算法不再适用;且本文算法仅考虑了单传感器情况,需要扩展到多传感器系统。所以,需要进一步研究群目标的航迹特征,建立对量测误差的不敏变量,解决量测误差较大时的多传感器群目标精细航迹起始问题。

### 参 考 文 献

[1] He Y, Xiu J J, Zhang J W, et al. Radar data processing with applications. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 170-178. (in Chinese)  
何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用. 第2版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 170-178.

[2] Van Keuk G. MHT extraction and track maintenance of a target formation. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(1): 288-295.

[3] Clark D, Godsill S. Group target tracking with the gaussian mixture probability hypothesis density filter. Proceedings of the International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing. Melbourne, AU; IEEE, 2007: 149-154.

[4] Geng W D. Summarizing of group-target tracking. The 10th China Radar Conference, 2008: 367-371. (in Chinese)  
耿文东. 编队目标跟踪综述. 第十届全国雷达学术年会, 2008: 367-371.

[5] Lian F, Han C C, Liu W F, et al. Tracking partly resolvable group targets using SMC-PHDF. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(5): 731-741. (in Chinese)  
连锋, 韩崇昭, 刘伟锋, 等. 基于 SMC-PHDF 的部分可分辨的群目标跟踪算法. 自动化学报, 2010, 36(5): 731-741.

[6] Zhou D Q, Geng W D, Ni C L. Study of track initiation method based on barycenter of formation target. Radio Engineering of China, 2010, 40(2): 32-34. (in Chinese)  
周大庆, 耿文东, 倪春雷. 基于编队目标重心的航迹起始

方法研究. 无线电工程, 2010, 40(2): 32-34.

[7] Zhu H Y, Han C Z, Han H, et al. Study on approaches of track initiation. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(3): 284-288. (in Chinese)  
朱洪艳, 韩崇昭, 韩红, 等. 航迹起始算法研究. 航空学报, 2004, 25(3): 284-288.

[8] Tang Q, Huang J G, Yang X D. Algorithm of track initiation and performance evaluation. Journal of System Simulation, 2007, 19(1): 149-152. (in Chinese)  
汤琦, 黄建国, 杨旭东. 航迹起始算法及性能仿真. 系统仿真学报, 2007, 19(1): 149-152.

[9] Zhao Z C, Rao B, Wang X S, et al. Multi-radar track initiation algorithm based on probabilistic grid Hough transform. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2209-2215. (in Chinese)  
赵志超, 饶彬, 王雪松, 等. 基于概率网格 Hough 变换的多雷达航迹起始算法. 航空学报, 2010, 31(11): 2209-2215.

[10] Jin S L, Liang Y, Wang Z F, et al. A two-hierarchy Hough transform based track initiation algorithm. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 590-593. (in Chinese)  
金术玲, 梁彦, 王增福, 等. 两级 Hough 变换航迹起始算法. 电子学报, 2008, 36(3): 590-593.

[11] Xing F Y, Xiong W, Wang H P. A formation target track initiation algorithm based on clustering and hough transform. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010, 25(6): 624-629. (in Chinese)  
邢凤勇, 熊伟, 王海鹏. 基于聚类 and Hough 变换的多编队航迹起始算法. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(6): 624-629.

[12] Blackman S S, Popoli R. Design and analysis of modern tracking systems. Norwood, MA: Artech House, 1999: 981-985.

[13] Tou J T, Gonzalez R C. Pattern recognition principles. London: Addison-Wesley Publishing Company, 1974: 124-129.

[14] Wang H L, Wang D S, Tian L S. A new algorithm for group tracking. 2001 CIE International Conference on Radar, 2001: 1159-1163.

[15] Wang H P. Research on new multi-sensor multi-target tracking algorithm. Yantai: Naval Aeronautical and Astronautical University, 2009. (in Chinese)  
王海鹏. 多传感器多目标跟踪新算法研究. 烟台: 海军航空工程学院, 2009.

[16] Song Q. Target track alignment-correlation and sensor bias estimation technique research. Yantai: Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010. (in Chinese)  
宋强. 目标航迹对准关联与传感器系统误差估计技术研究. 烟台: 海军航空工程学院, 2010.

[17] Yi X, Guan X, He Y. Gray track correlation model for distributed multitarget tracking system. Signal Process-

ing, 2005, 21(6): 653-655. (in Chinese)

衣晓, 关欣, 何友. 分布式多目标跟踪系统的灰色航迹关联模型. 信号处理, 2005, 21(6): 653-655.

作者简介:

何友 男, 博士, 教授. 主要研究方向: 信息融合.

E-mail: heyounmail@sohu.com

王海鹏 男, 博士研究生. 主要研究方向: 多传感器群目标跟踪、航迹关联、误差估计.

Tel: 0535-6635877

E-mail: armystudent@sohu.com

熊伟 男, 博士, 副教授. 主要研究方向: 目标跟踪、误差配准.

Tel: 0535-6635671

E-mail: xiongweimail@tom.com

## 附录 A:

设  $Z_1$ 、 $Z_2$  为相邻时刻预互联成功的两个群, 为讨论问题的方便, 定义  $Z_1$  中的  $\{z_{11}, z_{12}, z_{13}\}$  与  $Z_2$  中的  $\{z_{21}, z_{22}, z_{23}\}$  分别在两个时刻对应目标  $\{t_1, t_2, t_3\}$ 。  $z_{12}, z_{13}$  构成基本坐标系,  $z_{22}, z_{23}$  构成参考坐标系。

1) 推导量测误差对量测直角坐标的影响。

设量测误差标准差为  $\sigma = [\sigma_\rho \ \sigma_\theta]^T$ ,  $z_{11} = [x_{11} \ y_{11}]^T = [\rho_{11} \ \theta_{11}]^T$ , 与其对应的目标真实量测为  $z'_{11} = [x'_{11} \ y'_{11}]^T = [\rho'_{11} \ \theta'_{11}]^T$ , 则  $x'_{11} = \rho'_{11} \cos \theta'_{11} = (\rho_{11} + \Delta\rho_{11}) \cos(\theta_{11} + \Delta\theta_{11}) = \rho_{11} \cos \theta_{11} \cos \Delta\theta_{11} - \rho_{11} \sin \theta_{11} \sin \Delta\theta_{11} + \Delta\rho_{11} \cos \theta_{11} \cos \Delta\theta_{11} + \Delta\rho_{11} \sin \theta_{11} \sin \Delta\theta_{11} \approx x_{11} \cos \Delta\theta_{11} - y_{11} \sin \Delta\theta_{11} + \Delta\rho_{11} \cos \theta_{11}$  (A1)

式中:  $\Delta\rho_{11} \in [-\sigma_\rho, \sigma_\rho]$ ,  $\Delta\theta_{11} \in [-\sigma_\theta, \sigma_\theta]$ , 则  $x_{11} - x'_{11} = x_{11}(1 - \cos \Delta\theta_{11}) - y_{11} \sin \Delta\theta_{11} + \Delta\rho_{11} \cos \theta_{11}$  (A2)

同理可得

$$y_{11} - y'_{11} = y_{11}(1 - \cos \Delta\theta_{11}) + x_{11} \sin \Delta\theta_{11} + \Delta\rho_{11} \sin \theta_{11} \quad (A3)$$

经推导可得

$$\begin{cases} x_{11} - x'_{11} \in [x_{11}(1 - \cos \sigma_\theta) - |y_{11} \sin \sigma_\theta| - |\sigma_\rho \cos \theta_{11}|, x_{11}(1 - \cos \sigma_\theta) + |y_{11} \sin \sigma_\theta| + |\sigma_\rho \cos \theta_{11}|] \\ y_{11} - y'_{11} \in [y_{11}(1 - \cos \sigma_\theta) - |x_{11} \sin \sigma_\theta| - |\sigma_\rho \sin \theta_{11}|, y_{11}(1 - \cos \sigma_\theta) + |x_{11} \sin \sigma_\theta| + |\sigma_\rho \sin \theta_{11}|] \end{cases} \quad (A4)$$

同理适用于  $z_{12}, z_{13}$ 。

2) 推导直角坐标系下量测误差对相对位置矢量的影响

设  $z_{01} = z_{11} - \frac{z_{12} + z_{13}}{2} = [x_{01} \ y_{01}]^T$ , 其真

实值为  $z'_{01} = z'_{11} - \frac{z'_{12} + z'_{13}}{2} = [x'_{01} \ y'_{01}]^T$ , 则

$$x_{01} - x'_{01} = \frac{2(x_{11} - x'_{11}) - (x_{12} - x'_{12}) - (x_{13} - x'_{13})}{2} \geq \frac{[(2x_{11} - x_{12} - x_{13})(1 - \cos \sigma_\theta) - (|y_{11}| + |y_{12}| + |y_{13}|) \sin \sigma_\theta - (|\cos \theta_{11}| + |\cos \theta_{12}| + |\cos \theta_{13}|) \sigma_\rho]/2}{2} \quad (A5)$$

因为  $\{z_{11}, z_{12}, z_{13}\}$  属于同一预分割群, 所以

$$\begin{cases} |x_{11} - x_{12}| \leq d_0 \\ |x_{11} - x_{13}| \leq d_0 \end{cases} \quad (A6)$$

式中:  $d_0$  为群分割阈值, 故  $\frac{|2x_{11} - x_{12} - x_{13}|}{2} \leq d_0$ ; 又因为  $\sigma_\theta$  取值较小, 所以

$\frac{(2x_{11} - x_{12} - x_{13})(1 - \cos \sigma_\theta)}{2} \approx 0$ ,  $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$ , 式(A5)可化简为

$$x_{01} - x'_{01} \geq -[ (|y_{11}| + |y_{12}| + |y_{13}|) \sigma_\theta + (|\cos \theta_{11}| + |\cos \theta_{12}| + |\cos \theta_{13}|) \sigma_\rho ]/2 = -(A\sigma_\theta + B\sigma_\rho) \quad (A7)$$

式中:  $A_{01} = \frac{|y_{11}| + |y_{12}| + |y_{13}|}{2}$ ,  $B_{01} = \frac{|\cos \theta_{11}| + |\cos \theta_{12}| + |\cos \theta_{13}|}{2}$ 。经推导得

$$x_{01} - x'_{01} \in [-(A\sigma_\theta + B\sigma_\rho), A\sigma_\theta + B\sigma_\rho] \quad (A8)$$

同理可得:

$$y_{01} - y'_{01} \in [-(C\sigma_\theta + D\sigma_\rho), C\sigma_\theta + D\sigma_\rho] \quad (A9)$$

式中:  $C_{01} = \frac{|x_{11}| + |x_{12}| + |x_{13}|}{2}$ ,  $D_{01} = \frac{|\sin \theta_{11}| + |\sin \theta_{12}| + |\sin \theta_{13}|}{2}$ 。

3) 推导极坐标系下量测误差对相对位置矢量的影响

设  $w_{01} = \text{pol}(x_{01}, y_{01}) = (\rho_{01}, \theta_{01})$ , 其真实值为  $w'_{01} = \text{pol}(x'_{01}, y'_{01}) = (\rho'_{01}, \theta'_{01})$ 。式(A8)和式(A9)定义了直角坐标系下相对位置矢量偏离真

实值的范围,经推导得

$$\begin{cases} |\rho_{01} - \rho'_{01}| \in [-E_{01}, E_{01}] \\ |\theta_{01} - \theta'_{01}| \in [-F_{01}, F_{01}] \end{cases} \quad (\text{A10})$$

式中:

$$\begin{cases} E_{01} = [(A_{01}^2 + B_{01}^2)\sigma_\theta^2 + (C_{01}^2 + D_{01}^2)\sigma_\rho^2 + \\ 2(A_{01}B_{01} + C_{01}D_{01})\sigma_\theta\sigma_\rho]^{1/2} \\ F_{01} = \max(|\arctan \frac{A_{01}\sigma_\theta + B_{01}\sigma_\rho}{C_{01}\sigma_\theta + D_{01}\sigma_\rho}|, \\ |\arctan \frac{C_{01}\sigma_\theta + D_{01}\sigma_\rho}{A_{01}\sigma_\theta + B_{01}\sigma_\rho}|) \end{cases} \quad (\text{A11})$$

同理可得,  $z_{21}$  在参考坐标系中的相对位置矢量

$w_{02}$  偏离真实值的范围为

$$\begin{cases} |\rho_{02} - \rho'_{02}| \in [-E_{02}, E_{02}] \\ |\theta_{02} - \theta'_{02}| \in [-F_{02}, F_{02}] \end{cases} \quad (\text{A12})$$

4) 基于式(A10)和式(A11)及文中式(14)和式(15)可得  $\gamma \in [\varepsilon, 1]$ , 其中

$$\varepsilon = \frac{\sigma(\theta)\sigma_{\max}(\rho)G(\rho) + \sigma(\theta)\sigma_{\max}(\rho)G(\theta)}{\sigma(\rho)\sigma_{\max}(\theta) + \sigma(\theta)\sigma_{\max}(\rho)} \quad (\text{A13})$$

$$\text{式中: } G(\rho) = \frac{\sigma(\rho)}{\sigma(\rho) + (E_{01} + E_{02})}, \quad G(\theta) = \frac{\sigma(\theta)}{\sigma(\theta) + (F_{01} + F_{02})} \circ$$

## Refined Gray Track Initiation Algorithm of Group Targets Based on Relative Position Vectors

HE You, WANG Haipeng, XIONG Wei\*, DONG Yunlong

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

**Abstract:** A complete track initiation frame is provided based on an analysis of the traditional track initiation algorithms and the existent group target track initiation algorithms with the aim of solving the refined track initiation problem of targets in a group, and a refined gray track initiation algorithm of group targets based on relative position vectors is proposed. Firstly, a preparative division and association of the group targets are performed based respectively on the circular threshold model and the group center. Secondly, the corresponding coordinates of the preparative associated groups are found, and then the relative position vectors of the measurements are built. The measurements in the groups are associated with the refined gray association model. Finally, the group target state matrix is obtained with the track validation rule. An analysis of the results of the simulation data shows that the overall performance of this algorithm is better in terms of true track initiation, false track restraint and adaptation to clutters as compared with the modified logic algorithm and the multi-formation track initiation algorithm based on clustering and Hough transform.

**Key words:** group target; relative position vector; refined gray association model; corresponding coordinates; track initiation

Received: 2011-09-13; Revised: 2011-11-22; Accepted: 2011-12-19; Published online: 2012-04-07 18:40

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120407.1840.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61032001, 60801049)

\* Corresponding author. Tel.: 0535-6635671 E-mail: xiongweimail@tom.com