

# 一种基于时空交叉点新特征的航迹关联算法

崔亚奇\* 熊伟 唐田田

(海军航空大学信息融合研究所 烟台 264001)

**摘要:** 为有效解决实际工程中的航迹关联问题, 该文定义了广义时空交叉点, 并提出了以航迹对时空交叉点为特征, 通过特征匹配来实现航迹抗差关联的新方法。实测数据验证结果表明: 在雷达航迹不完全匹配且存在时空差异误差的情况下, 该方法可有效实现雷达航迹的抗差关联, 并且几乎不受时空差异误差大小的影响, 具有强鲁棒性和稳定性, 可有效解决实际工程中的航迹关联问题, 消除冗余航迹, 提供统一态势。

**关键词:** 航迹关联; 时空交叉点; 特征匹配; 假设检验; Hausdorff距离

**中图分类号:** TN953; TN957.51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2020)10-2500-08

**DOI:** 10.11999/JEIT190822

## A Track Correlation Algorithm Based on New Space-time Cross-point Feature

CUI Yaqi XIONG Wei TANG Tiantian

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

**Abstract:** To solve the problem of track correlation in practical engineering effectively, a new concept of generalized space-time cross point of track pair is defined in this paper. Then a new algorithm which utilize space-time cross-point as feature points and realizes the track correlation through feature point matching is proposed in this paper. The test experiments with measured data illustrate the proposed algorithm of which the performance is effective, stable and robust, can eliminate redundant tracks and provide a unified situation.

**Key words:** Track correlation; Space-time cross-point; Feature matching; Hypothesis testing; Hausdorff Distance(HD)

### 1 引言

作为多雷达信息融合系统的核心关键技术, 航迹关联是航迹融合和属性融合的前提和基础。受雷达量测系统误差、平台姿态角误差以及时间误差的影响, 海空平台雷达上报的目标航迹是存在时间不一致和空间旋转平移等时空差异的, 此时传统的基于统计距离的关联算法已难以可靠地关联目标航迹, 极易造成战场态势的混乱, 亟需开展航迹抗差关联技术研究, 以在时空误差情况下实现多雷达航迹的稳定可靠关联<sup>[1-3]</sup>。

目前国内外学者在该方面已经开展了有益的研究, 并取得了一定研究成果<sup>[4-18]</sup>。根据研究思路 and 实现方法, 可把现有抗差关联方法分为两大类: 图像抗差关联和拓扑抗差关联。图像抗差关联是把航

迹抗差关联分解为航迹集合配准和单个航迹关联两个步骤, 并把航迹集合配准问题转化为图像配准问题, 采用图像处理中的理论和方法, 对航迹集合间的旋转平移量进行估计消除, 实现航迹集合的对齐配准, 进而采用传统航迹关联算法, 实现单个航迹的关联<sup>[9-11]</sup>。文献[11]提出了一种基于傅里叶变换的系统误差配准前航迹对准关联算法, 算法将组网雷达的航迹数据看作为一种整体信息, 采用傅里叶变换理论来估计和补偿相对旋转量和平移量, 实现了误差配准前的航迹准确关联。由于采用图像处理中的相关方法, 导致该类算法计算复杂、计算量大, 实时处理难度大。拓扑抗差关联利用航迹间相对位置、相对航向等几乎不受系统误差影响的拓扑不变量信息, 通过计算拓扑序列和拓扑距离, 构建关联矩阵, 来实现单个航迹的关联<sup>[12-16]</sup>。文献[12]利用传感器到各目标径向划分来构建参照拓扑矩阵, 并采用模糊信息处理方法对拓扑矩阵距离进行综合, 从而建立航迹关联矩阵, 实现单个航迹关联, 但算法仅适用于存在平移误差的航迹关联问题。文献[15]采用各目标航迹点所构成的三角形作

收稿日期: 2019-10-25; 改回日期: 2020-05-04; 网络出版: 2020-05-13

\*通信作者: 崔亚奇 cui\_yaqi@126.com

基金项目: 国家自然科学基金重大专项基金(61790550, 61790554)

Foundation Items: The National Natural Science Major Special Projects Foundation of China (61790550, 61790554)

为拓扑结构元构建相似度,依据局部相似度做出航迹对关联判决,但由于需要对目标量测进行全局搜索,计算量将随目标数增长而急剧增大。依据工程需求,综合算法研究现状,现有研究成果存在的问题可归纳如下:(1)图像抗差关联算法计算量大,拓扑抗差关联算法易受虚假航迹、漏跟航迹影响,不稳定;(2)航迹集合间的空间差异呈现出区域缓变性,难以用统一的空间差异参数描述;(3)缺乏对雷达时间差异问题的考虑,不同位置、不同平台雷达上报的目标航迹时间是不一致的。

## 2 广义时空交叉定义

定义广义时空交叉点为航迹在 $T$ 时间方向、 $X$ 位置方向、 $Y$ 位置方向等任意两个维度空间中存在的相交点,并统称为时空交叉点,如图1所示。同一航迹对间的时空交叉点集 $J$ 包含3种类型相交点,即 $J = \{J_1, J_2, J_3\}$ ,它们分别为:(1)I型时空交叉点 $J_1$ :航迹对在 $T-X$ 平面空间中发生相交时,在两条航迹上的对应点,它们的 $T$ 和 $X$ 方向坐标相同, $Y$ 方向坐标不同;(2)II型时空交叉点 $J_2$ :航迹对在 $T-Y$ 平面空间中发生相交时,在两条航迹上的对应点,它们的 $T$ 和 $Y$ 方向坐标相同, $X$ 方向坐标不同;(3)III型时空交叉点 $J_3$ :航迹对在 $X-Y$ 平面空间中发生相交时,在两条航迹上的对应点,它们的 $X$ 和 $Y$ 方向坐标相同, $T$ 方向坐标不同。

图1(a)中的横坐标轴表示时间,纵坐标同时表示航迹 $X$ 方向坐标和 $Y$ 方向坐标,同一航迹在图1(a)中对应两条直线,分别为 $T-X$ 直线、 $T-Y$ 直线。图1(b)中的横坐标轴表示 $X$ 方向坐标,左纵坐标表示航迹 $Y$ 方向坐标,右纵坐标表示航迹时间,同一航迹在图1(b)中对应两条直线,分别为 $X-Y$ 直线、 $X-T$ 直线。由图1(a)可知,航迹1和航迹2的 $T-X$ 直线存在交点,可得到交点的时间、 $X$ 方向坐标,同时根据航迹1和2的 $T-Y$ 直线,可得相应航迹的 $Y$ 方向坐标,进而可得航迹对I型时空交叉点在

不同航迹上的对应坐标,同理可得航迹对的II、III型时空交叉点坐标。

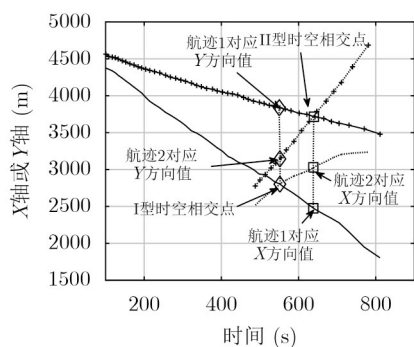
## 3 算法设计

任意两目标航迹间的时空交叉关系不受雷达时间平移、空间平移等因素的影响,具有确定不变性,如果不同雷达的航迹对都源于同一目标对,是彼此对应的,那么不同雷达航迹对的时空交叉点应是一一对应的,并且根据匹配时空交叉点得到的时空差异参数应可有效地对雷达航迹进行时空配准,使不同雷达航迹在同一时空中重合。相应地,如果不同雷达的航迹对满足上述条件,那么可以认为不同雷达的航迹对是相关的,对应于同一目标对。因此可以通过对不同雷达航迹对时空交叉点进行匹配,来判断不同雷达航迹对是否源于同一个目标对,从而实现不同雷达航迹的抗差关联。

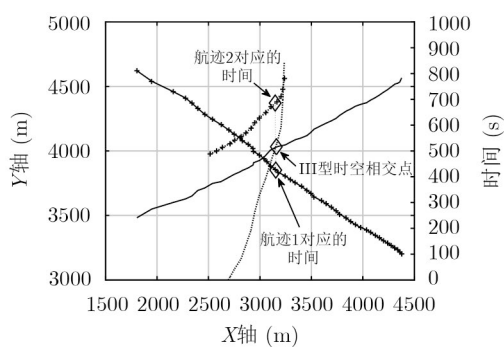
基于上述思路,结合工程实际,考虑主要利用航迹的时间、 $XY$ 平面位置信息,通过航迹对时空交叉点求取、基于时空交叉点的航迹对预匹配、航迹关联等处理步骤,来实现不同雷达航迹的抗差关联,其中时空交叉点求取和航迹对预匹配是本文的主要研究成果,航迹关联步骤则是采用航迹关联技术领域常用的Hausdorff距离(Hausdorff Distance, HD)航迹集合距离和最大关联系数阈值判别原则进行航迹的最终关联。下面以两部雷达的航迹关联问题为例,对本文的主要研究成果进行详细描述,该算法很容易扩展应用到多雷达航迹关联情况。

### 3.1 航迹对时空交叉点求取

根据时空交叉点的定义,对航迹对时空交叉点集进行求取。对雷达上报航迹进行时间积累,可得雷达1上报的航迹集 $\Theta_1 = \{U_1, U_2, \dots, U_{n_1}\}$ ,共 $n_1$ 条航迹,其中航迹 $i$ 包含 $m_i$ 个航迹点 $U_i = \{X_1, X_2, \dots, X_{m_i}\}$ ,每个航迹点由时间、 $X$ 方向坐标、 $Y$ 方向坐标等3个变量构成, $X = [t \ x \ y]^T$ 。



(a) I和II型时空交叉点示意图



(b) III型时空交叉点示意图

图1 时空交叉点

目标短时间内可近似为匀速直线运动,并假设X方向运动和Y方向运动相互独立。以航迹的 $T, X, Y$  3个变量中任意一个变量为输入,不同变量为输出,建立相应的线性模型,并假设实际航迹点时空数据与线性模型间的偏差为高斯白噪声,可得

$$x = a_1 t + b_1 + w_1 \quad (1)$$

$$y = a_2 t + b_2 + w_2 \quad (2)$$

$$y = a_3 x + b_3 + w_3 \quad (3)$$

式中 $a, b$ 为线性模型参数, $w$ 表示建模偏差,为0均值高斯白噪声,由于假设目标在X方向和Y方向独立运动,则 $w_1, w_2$ 为独立分布,联合式(1)和式(2),可得到式(3),因此 $w_3$ 可表示为 $w_1, w_2$ 的线性组合。

利用多个航迹点信息,采用最小二乘法,根据式(1),可求取航迹 $i$ 的 $T-X$ 模型参数,得到

$$\begin{bmatrix} a_{i,1} \\ b_{i,1} \end{bmatrix} = (\mathbf{H}_{i,t}^T \mathbf{H}_{i,t})^{-1} \mathbf{H}_{i,t}^T \mathbf{Z}_{i,x} \quad (4)$$

$$R_{i,1} = \text{var} \left( \mathbf{Z}_{i,x} - \mathbf{H}_{i,t} \begin{bmatrix} a_{i,1} \\ b_{i,1} \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

其中 $\text{var}$ 为方差求取函数, $R_{i,1}$ 为0均值高斯白噪声 $w_{i,1}$ 的方差,变量2个标号下标的含义为:第1个下标表示航迹编号,第2个下标表示变量的相关类别,数字1, 2, 3表示与I型、II型、III型交叉点相关,为字母 $t, x, y$ 表示与时间、X方向坐标、Y方向坐标相关,下同。因此 $a_{i,1}$ 表示航迹 $i$ 与I型交叉点 $T-X$ 线性模型的系数

$$\mathbf{H}_{i,t} = \begin{bmatrix} t_{i,1} & t_{i,2} & \cdots & t_{i,m_i} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$\mathbf{Z}_{i,x} = [x_{i,1} \ x_{i,2} \ \cdots \ x_{i,m_i}]^T \quad (7)$$

同理,可得航迹 $i$ 的 $T-Y$ 模型和 $X-Y$ 模型参数为

$$\begin{bmatrix} a_{i,2} \\ b_{i,2} \end{bmatrix} = (\mathbf{H}_{i,t}^T \mathbf{H}_{i,t})^{-1} \mathbf{H}_{i,t}^T \mathbf{Z}_{i,y} \quad (8)$$

$$R_{i,2} = \text{var} \left( \mathbf{Z}_{i,y} - \mathbf{H}_{i,t} \begin{bmatrix} a_{i,2} \\ b_{i,2} \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} a_{i,3} \\ b_{i,3} \end{bmatrix} = (\mathbf{H}_{i,x}^T \mathbf{H}_{i,x})^{-1} \mathbf{H}_{i,x}^T \mathbf{Z}_{i,y} \quad (10)$$

$$R_{i,3} = \text{var} \left( \mathbf{Z}_{i,y} - \mathbf{H}_{i,x} \begin{bmatrix} a_{i,3} \\ b_{i,3} \end{bmatrix} \right) \quad (11)$$

式中 $R_{i,2}, R_{i,3}$ 分别为0均值高斯白噪声 $w_{i,2}, w_{i,3}$ 的方差。

$$\mathbf{H}_{i,x} = \begin{bmatrix} x_{i,1} & x_{i,2} & \cdots & x_{i,m_i} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

$$\mathbf{Z}_{i,y} = [y_{i,1} \ y_{i,2} \ \cdots \ y_{i,m_i}]^T \quad (13)$$

在已分别对雷达1航迹建立 $T-X, T-Y$ 和 $X-Y$ 线性模型基础上,对雷达1同一空间划分内的航迹两两进行组合,求取它们的各类时空交叉点。

联立雷达1航迹 $i$ 和航迹 $j$ 的 $T-X$ 线性模型,可得

$$\begin{cases} x = a_{i,1}t + b_{i,1} + w_{i,1} \\ x = a_{j,1}t + b_{j,1} + w_{j,1} \end{cases} \quad (14)$$

求解式(14),可得航迹 $i$ 和 $j$ 的 $T-X$ 空间相交点为

$$\begin{cases} t_{i,j,1} = \frac{b_{i,1} - b_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} + \frac{w_{i,1} - w_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} \\ x_{i,j,1} = \frac{a_{j,1}b_{i,1} - a_{i,1}b_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} + \frac{a_{j,1}w_{i,1} - a_{i,1}w_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} \end{cases} \quad (15)$$

式中变量3个标号下标的含义为:第1个下标表示相交航迹1的编号,第2个下标表示相交航迹2的编号,第3个下标变量的相关类别,与2个标号下标相同,下同。后面出现的4个标号下标变量,其前3位下标与3个标号下标变量下标含义相同,第4位为1或2表示相交点在相交航迹1或2上的坐标。

由式(15)可知,航迹 $i$ 和 $j$ 的 $T-X$ 空间相交点 $(t_{i,j,1}, x_{i,j,1})$ 由 $w_{i,1}, w_{j,1}$ 和确定量的线性组合得到,而同一信源量测误差可认为是相互独立的,因此 $w_{i,1}, w_{j,1}$ 可认为独立高斯分布。两个高斯独立分布的和仍就是高斯分布,因此 $t_{i,j,1}, x_{i,j,1}$ 均是高斯分布随机变量,但两者之间存在相关性。

结合航迹 $i$ 和 $j$ 的 $T-Y$ 模型,可得两航迹同一 $T-X$ 空间相交点对应的不同Y方向坐标为

$$\begin{aligned} y_{i,j,1,1} &= \frac{a_{i,2}b_{i,1} - a_{i,2}b_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} + b_{i,2} \\ &+ \frac{a_{i,2}w_{i,1} - a_{i,2}w_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} + w_{i,2} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} y_{i,j,1,2} &= \frac{a_{j,2}b_{i,1} - a_{j,2}b_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} + b_{j,2} \\ &+ \frac{a_{j,2}w_{i,1} - a_{j,2}w_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} + w_{j,2} \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $y_{i,j,1,1}$ 为I型相交点在航迹 $i$ 上的Y方向坐标, $y_{i,j,1,2}$ 为交点在航迹 $j$ 上的Y方向坐标。根据假设, $w_{i,1}, w_{i,2}$ 是相互独立的,进而 $w_{j,1}, w_{i,1}, w_{i,2}$ 三者是相互独立的,因此 $y_{i,j,1,1}$ 也是高斯分布随机变量,同理 $y_{i,j,1,2}$ 也是。

综合式(15)、式(16)和式(17)可得,航迹 $i$ 和 $j$ 的I型时空交叉点为高斯分布随机变量,其均值为 $\mathbf{J}_{i,j,1,1}, \mathbf{J}_{i,j,1,2}$ ,大小分别由式(18)和式(20)计算得到,协方差 $\mathbf{R}_{i,j,1,1}, \mathbf{R}_{i,j,1,2}$ ,大小分别由式(19)和式(21)计算得到

$$\mathbf{J}_{i,j,1,1} = \left[ \frac{b_{i,1} - b_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} \quad \frac{a_{j,1}b_{i,1} - a_{i,1}b_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} \quad \frac{a_{i,2}b_{i,1} - a_{i,2}b_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} + b_{i,2} \right]^T \quad (18)$$

$$\mathbf{R}_{i,j,1,1} = \frac{1}{(a_{j,1} - a_{i,1})^2} \begin{bmatrix} R_{i,1} + R_{j,1} & a_{j,1}R_{i,1} + a_{i,1}R_{j,1} & a_{i,2}(R_{i,1} + R_{j,1}) \\ a_{j,1}R_{i,1} + a_{i,1}R_{j,1} & a_{j,1}^2R_{i,1} + a_{i,1}^2R_{j,1} & a_{j,1}a_{i,2}R_{i,1} + a_{i,1}a_{i,2}R_{j,1} \\ a_{i,2}R_{i,1} + a_{i,2}R_{j,1} & a_{j,1}a_{i,2}R_{i,1} + a_{i,1}a_{i,2}R_{j,1} & a_{i,2}^2(R_{i,1} + R_{j,1}) + (a_{j,1} - a_{i,1})^2R_{i,2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{J}_{i,j,1,2} = \left[ \frac{b_{i,1} - b_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} \quad \frac{a_{j,1}b_{i,1} - a_{i,1}b_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} \quad \frac{a_{j,2}b_{i,1} - a_{j,2}b_{j,1}}{a_{j,1} - a_{i,1}} + b_{j,2} \right]^T \quad (20)$$

$$\mathbf{R}_{i,j,1,2} = \frac{1}{(a_{j,1} - a_{i,1})^2} \begin{bmatrix} R_{i,1} + R_{j,1} & a_{j,1}R_{i,1} + a_{i,1}R_{j,1} & a_{j,2}(R_{i,1} + R_{j,1}) \\ a_{j,1}R_{i,1} + a_{i,1}R_{j,1} & a_{j,1}^2R_{i,1} + a_{i,1}^2R_{j,1} & a_{j,1}a_{j,2}R_{i,1} + a_{i,1}a_{j,2}R_{j,1} \\ a_{i,2}R_{i,1} + a_{i,2}R_{j,1} & a_{j,1}a_{i,2}R_{i,1} + a_{i,1}a_{i,2}R_{j,1} & a_{j,2}^2(R_{i,1} + R_{j,1}) + (a_{j,1} - a_{i,1})^2R_{j,2} \end{bmatrix} \quad (21)$$

需要说明的是上述交叉点可能在航迹上，也可能在航迹的延长线上，但不影响其作为关联匹配点的特性。

同理，联立雷达1航迹*i*和*j*的*T-Y*线性模型，可得航迹*i*和*j*的II型时空交叉点，联立雷达1航迹*i*和*j*的*X-Y*线性模型，可得航迹*i*和*j*的III型时空交叉点，按照I型相交点的分析方法，可知II和III型时空交叉点同样为高斯分布，其均值可分别表示为 $\mathbf{J}_{i,j,2,1}$ 、 $\mathbf{J}_{i,j,2,2}$ 和 $\mathbf{J}_{i,j,3,1}$ 、 $\mathbf{J}_{i,j,3,2}$ ，协方差可分别表示为 $\mathbf{R}_{i,j,2,1}$ 、 $\mathbf{R}_{i,j,2,2}$ 和 $\mathbf{R}_{i,j,3,1}$ 、 $\mathbf{R}_{i,j,3,2}$ 。其中需要特别指出的是，III型交叉点包含 $w_{i,1}$ 、 $w_{i,3}$ 或 $w_{i,2}$ 、 $w_{i,3}$ 的线性组合，由于 $w_{i,3}$ 可表示为 $w_{i,1}$ 、 $w_{i,2}$ 的线性组合，因此 $w_{i,1}$ 、 $w_{i,3}$ 或 $w_{i,2}$ 、 $w_{i,3}$ 的线性组合可以进一步表示为 $w_{i,1}$ 、 $w_{i,2}$ 的线性组合，即 $w_{i,1}$ 、 $w_{i,3}$ 或 $w_{i,2}$ 、 $w_{i,3}$ 的线性组合仍为高斯分布随机变量。

### 3.2 基于时空交叉点的航迹对预匹配

根据航迹对时空差异参数的一致性，对不同雷达存在的时空交叉点进行匹配、对相应的航迹对关联关系进行预判断。假设雷达1某个空间划分内 $o_1$ 个航迹对相交，共 $6 \times o_1$ 个时空交叉点坐标，雷达2相同空间划分内 $o_2$ 个航迹对相交，共 $6 \times o_2$ 个时空交叉点坐标，依次对雷达1和雷达2的相交航迹对进行预匹配处理。需要说明的是算法并不需要每部雷达任意两条航迹都存在时空交叉点，只需要雷达间相对应的航迹对存在时空交叉点即可。

根据问题描述，雷达1和雷达2一定空间区域内的航迹时间满足常量误差模型、航迹*X,Y*位置满足平移模型，具体为

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_2 \\ x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} + \mathbf{d} \quad (22)$$

其中 $[t_1, x_1, y_1]^T$ 为雷达1航迹点的时空坐标，与雷达2航迹点时空坐标 $[t_2, x_2, y_2]^T$ 对应， $\mathbf{d} = [d_t, d_x, d_y]^T = [d_t, \mathbf{d}_{xy}^T]^T$ 为时空平移误差常量矩阵。

假设雷达1第 $c_1$ 个航迹相交由航迹*i,j*构成，雷达2第 $c_2$ 个航迹相交由航迹*l,m*构成。如果雷达1航迹*i,j*与雷达2航迹*l,m*是对应的，那么它们的各类时空交叉点应是一一对应的，并满足式(22)，同时由于航迹*i,j*与航迹*l,m*间存在两种对应关系，需要进一步进行假设判断。

假设1：雷达1航迹*i*与雷达2航迹*l*对应，雷达1航迹*j*与雷达2航迹*m*对应；

假设2：雷达1航迹*j*与雷达2航迹*l*对应，雷达1航迹*i*与雷达2航迹*m*对应。

根据式(22)，在假设1条件下，航迹*i,j*与航迹*l,m*间3类6个航迹交叉点坐标对应关系可写为

$$\mathbf{J}_{i,j,q,1} + \mathbf{w}_{i,j,q,1} = \mathbf{J}_{l,m,q,1} + \mathbf{w}_{l,m,q,1} + \mathbf{d} \quad (23)$$

$$\mathbf{J}_{i,j,q,2} + \mathbf{w}_{i,j,q,2} = \mathbf{J}_{l,m,q,2} + \mathbf{w}_{l,m,q,2} + \mathbf{d} \quad (24)$$

其中 $\mathbf{J}_{i,j,q,1}$ 为雷达1航迹*i,j*的*q*类时空交叉点航迹*i*上坐标均值， $\mathbf{w}_{i,j,q,1}$ 为时空交叉点高斯白噪声，其协方差为 $\mathbf{R}_{i,j,q,1}$ ，其他相似变量含义相同。由于雷达间量测可认为是相互独立的，因此 $\mathbf{w}_{i,j,q,1}$ 和 $\mathbf{w}_{l,m,q,1}$ 是相互独立高斯随机变量。

利用式(23)求解出时空差异参数，利用式(24)进行假设检验，以验证两式的相容性，如果两式相容，那么认为该假设是可信的，航迹对是匹配的。如果两式不相容，则认为该假设不可信，相应的航迹对是不匹配的，不是源于同一目标对。

进一步，采用广义最小二乘法，根据式(23)，在不同类型时空交叉点独立假设下，可得时空平移误差常量矩阵近似估计为

$$\tilde{\mathbf{d}} \approx \left( \sum_{q=1}^3 (\mathbf{R}_{i,j,q,1} + \mathbf{R}_{l,m,q,1})^{-1} \right)^{-1} \cdot \sum_{q=1}^3 (\mathbf{R}_{i,j,q,1} + \mathbf{R}_{l,m,q,1})^{-1} (\mathbf{J}_{i,j,q,1} - \mathbf{J}_{l,m,q,1}) \quad (25)$$

利用已求出的时空差异参数, 结合式(24), 构建假设检验统计量为

$$\alpha = \sum_{q=1}^3 (J_{i,j,q,2} - J_{l,m,q,2} - \tilde{d})^T \cdot (R_{i,j,q,2} + R_{l,m,q,2})^{-1} \cdot (J_{i,j,q,2} - J_{l,m,q,2} - \tilde{d}) \quad (26)$$

其中 $\alpha$ 可近似认为具有9自由度的 $\chi^2$ 分布随机变量。

对 $\alpha$ 进行 $\chi^2$ 检验, 如果

$$\alpha \leq \delta \quad (27)$$

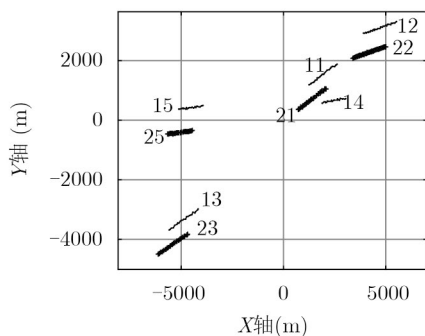
则认为假设1是可信的, 否则不可信。其中 $\delta$ 为假设检验阈值, 由于 $\alpha$ 是近似9自由度的 $\chi^2$ 分布随机变量,  $\delta$ 大小由检验显著水平求得, 并经人工调节最终确定。

按照上面的步骤, 继续对假设2进行检验。如果假设1和假设2都满足假设检验或只有一个假设满足检验, 则认为航迹对是匹配的, 并把检验统计量最小的航迹关联假设以及相应的时空差异参数作为可信关联假设输出。如果两个假设都不满足假设检验, 则认为航迹对是不匹配的, 不输出关联假设。对输出的可信关联假设, 进一步求取其关联系数, 做进一步地关联判决。

#### 4 算法数据验证

本文利用两部导航雷达数据, 通过与文献[13]基于傅里叶变换的典型航迹对准关联算法(简称傅里叶关联算法)进行对比分析, 来验证本文所提算法(简称交叉点关联算法)的有效性和实用性。首先设计了如下3种类型数据。

测试数据1: 雷达1航迹数据采用导航雷达实测数据, 雷达2航迹数据通过对雷达1航迹数据添加 $\tau_t=30$  s的时间误差、 $\tau_{xy}=[500 \text{ m}, 800 \text{ m}]^T$ 的位置平移误差和随机噪声, 并去除雷达1某条航迹来产生, 雷达1和雷达2航迹关联关系人工可辨, 以验证一般关联环境下算法的性能。



(a) 雷达1与雷达2在X-Y平面空间航迹

测试数据2: 在测试数据1中, 增大雷达2与雷达1的时空平移量误差 $\tau_t=100$  s,  $\tau_{xy}=[5000 \text{ m}, 8000 \text{ m}]^T$ , 使雷达1和雷达2航迹关联关系人工不可辨, 以验证算法对严重恶化环境的鲁棒适应性。

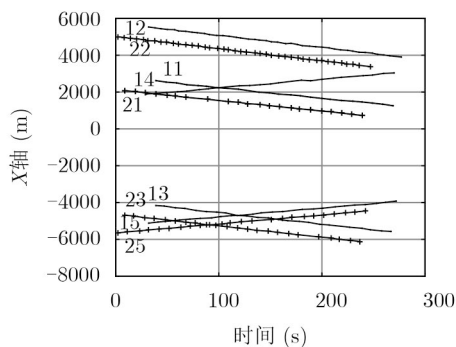
测试数据3: 雷达1与雷达2采用具有共视区域的两部独立导航雷达数据, 以进一步验证算法的工程实用性。

图2、表1和表2中, 批号的第1位表示雷达编号, 后面的位数表示不同目标的航迹, 不同雷达航迹批号后面位数相同表示同一目标, 雷达1航迹采用点线进行显示, 雷达2航迹采用加号线进行显示, 下同。

在测试数据1中, 如图2所示, 雷达2航迹数据受人工设置时空差异误差的影响, 与雷达1航迹数据有一定偏离, 但由于不同雷达同目标偏离程度小于同雷达不同目标间距离, 同目标不同雷达航迹数据仍是相邻分布。

本文算法对测试数据1的处理结果如表2和图3所示, 傅里叶算法的处理结果如表1所示。由表1可知, 傅里叶算法仅能成功关联两对航迹, 估计出的空间平移误差为580.14 m, 878.56 m, 精度达到84%左右。而由表2可知, 除雷达1的14号航迹外(雷达2中没有对应航迹), 算法成功实现所有4对航迹的有效关联, 并且最高关联系数航迹关联对估计出的时间平移误差为30.31 s, 精度达到98%左右, 估计出的空间平移误差为525.22 m, 819.61 m, 精度达到95%左右, 性能明显优于缺乏对时间误差考虑的傅里叶算法。利用本文算法估计出的时空差异参数对雷达2航迹进行补偿, 结果如图3所示, 雷达1和雷达2航迹在时空3维空间中基本重合。综合上述分析可知, 本文算法有效地解决了不同雷达存在时空差异误差情况下的航迹关联问题, 实现了不同雷达航迹的有效关联匹配。

在测试数据2中, 如图4所示, 由于时空误差较大, 雷达2航迹数据与雷达1航迹数据完全偏离, 人



(b) 雷达1与雷达2在时间-X平面空间航迹

图2 测试数据1中雷达原始航迹示意

工直观上也难以给出雷达间航迹关联关系。本文算法对测试数据2的处理结果如表4和图5所示，傅里叶算法的处理结果如表3所示。由表3可知，由于时间误差进一步增大，傅里叶算法的性能也进一步地下降，仅能成功关联一对航迹。而由表4可知，本文所提交叉点算法成功实现3对航迹的有效关联，最高关联系数航迹关联对估计出的时间平移误差为89.03 s，精度达到89%左右，估计出的空间平移误差为4876.42 m，7953.41 m，精度达到97%左右，即使航迹12和航迹22没有成功匹配，但利用算法估计出的时空差异参数对雷达2航迹进行补偿后，如图5所示，采用传统关联算法也可实现漏关联航迹(航

迹12和航迹22)的关联。综上分析可知，即使在雷达航迹间时空误差严重恶化情况下，算法仍就能实现雷达间航迹的有效关联，性能几乎不受影响，因此算法具有较高的鲁棒性和稳定性。

本文算法对如图6所示测试数据3的处理结果如表5和图7所示，傅里叶算法的处理结果如表6所示。由表5可知，除航迹29和航迹210外(在雷达1中均没有对应的航迹)，本文算法成功实现了所有8对航迹的有效关联，而由表6可知，傅里叶算法仅能实现3对航迹的有效关联，其性能与交叉点算法有明显差距。综上分析可知，算法可有效解决实际工程中的航迹关联问题，消除冗余航迹，提供统一态势。

5 结束语

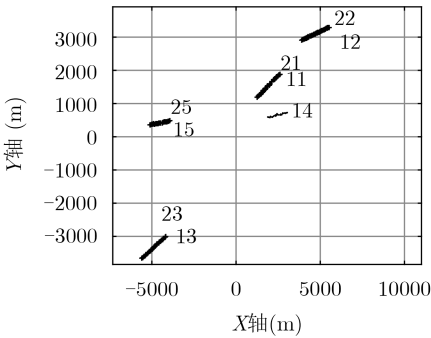
本文定义了广义航迹对时空交叉点，给出了以航迹对时空交叉点为特征、通过特征点匹配来实现航迹抗差关联的新算法，实测数据验证结果表明：本文算法在雷达航迹不完全匹配以及存在时空差异

表 1 测试数据1下傅里叶算法关联结果

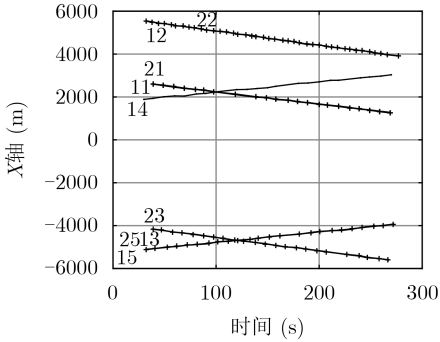
雷达1批号	11	12
雷达2批号	21	22
空间误差估计(m)	580.14 878.56	580.14 878.56

表 2 测试数据1下交叉点算法关联结果

雷达1批号	15	13	11	12
雷达2批号	25	23	21	22
关联系数	0.657	0.657	0.648	0.503
时间误差估计(s)	30.31	30.31	25.42	29.57
空间误差估计(m)	525.22 819.61	525.22 819.61	571.18 813.87	468.00 825.56



(a) 雷达1与雷达2在X-Y平面空间航迹



(b) 雷达1与雷达2在时间-X平面空间航迹

图 3 算法补偿后测试数据1中雷达航迹示意

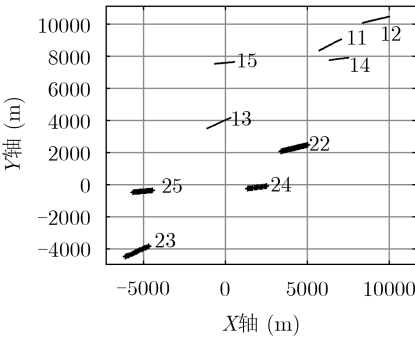


图 4 测试环境2中雷达原始航迹示意

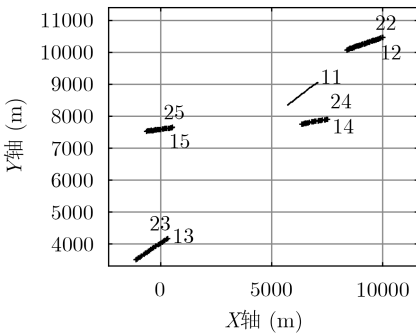


图 5 测试环境2中算法补偿后雷达航迹示意

表 3 测试数据2下傅里叶算法关联结果

雷达1批号	13
雷达2批号	23
空间误差估计(m)	5310.32 8605.41

表 4 测试环境2下交叉点算法关联结果

雷达1批号	13	15	14
雷达2批号	23	25	24
关联系数	0.845	0.845	0.835
时间误差估计	89.03	89.03	86.17
空间误差估计	4876.42 7953.41	4876.42 7953.41	5053.34 8036.30

表 5 测试环境3下交叉差算法关联结果

雷达1批号	17 12 11 18 14 13 16 15
雷达2批号	27 22 21 28 24 23 26 25

表 6 测试环境3下傅里叶算法关联结果

雷达1批号	11	18	16
雷达2批号	21	28	26

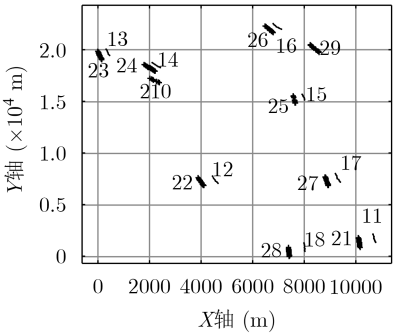


图 6 测试环境3中雷达原始航迹示意

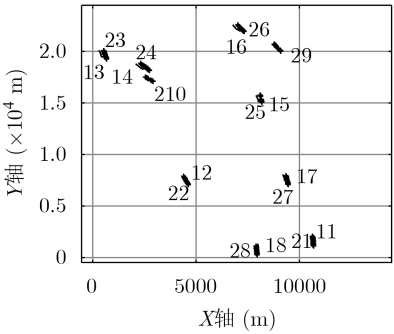


图 7 测试环境3中算法补偿后雷达航迹示意

误差的情况下，可有效实现雷达航迹的抗差关联，与典型傅里叶关联算法相比，本文算法性能提高明显，并且几乎不受时空差异误差大小的影响，即使时空差异误差大到人工难以判断雷达航迹关联关系的程度，算法也能给出正确有效的航迹关联结果，

具有很强鲁棒性和稳定性。为进一步扩展算法的适用范围，下一步本文将重点研究雷达间存在时间平移、空间旋转平移误差情况下的航迹抗差关联问题，以期提高算法的广泛适用性。

参 考 文 献

[1] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 220–223.  
HE You, XIU Jianjuan, ZHANG Jingwei, *et al.* Radar Data Processing with Applications[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 220–223.

[2] 李保珠, 关键, 董云龙. 基于航迹矢量检测的雷达与电子支援设施抗差关联算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 123–129. doi: 10.11999/JEIT180303.  
LI Baozhu, GUAN Jian, and DONG Yunlong. Anti-bias track association algorithm of radar and electronic support measurements based on track vectors detection[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(1): 123–129. doi: 10.11999/JEIT180303.

[3] 李保珠, 董云龙, 李秀友, 等. 基于t分布混合模型的抗差关联算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(7): 1774–1778. doi: 10.11999/JEIT161084.  
LI Baozhu, DONG Yunlong, LI Xiuyou, *et al.* Anti-bias track association algorithm based on t-distribution mixture model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(7): 1774–1778. doi: 10.11999/JEIT161084.

[4] 李保珠, 张林, 董云龙, 等. 基于航迹矢量分级聚类的雷达与电子支援措施抗差关联算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(6): 1310–1316. doi: 10.11999/JEIT180714.  
LI Baozhu, ZHANG Lin, DONG Yunlong, *et al.* Anti-bias track association algorithm of radar and electronic support measurements based on track vectors hierarchical clustering[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(6): 1310–1316. doi: 10.11999/JEIT180714.

[5] 李保珠, 董云龙, 李秀友, 等. 基于t分布混合模型的抗差关联算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(7): 1774–1778. doi: 10.11999/JEIT161084.  
LI Baozhu, DONG Yunlong, LI Xiuyou, *et al.* Anti-bias track association algorithm based on t-distribution mixture model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(7): 1774–1778. doi: 10.11999/JEIT161084.

[6] 关欣, 彭彬彬, 衣晓. 修正极坐标系下雷达与ESM航迹对准关联[J]. 航空学报, 2017, 38(5): 221–232. doi: 10.7527/S1000-6893.2016.0287.  
GUAN Xin, PENG Binbin, and YI Xiao. Track alignment-association of radar and ESM in MPC[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2017, 38(5): 221–232. doi: 10.7527/S1000-6893.2016.0287.

[7] 齐林, 崔亚奇, 熊伟, 等. 基于距离检测的自动识别系统和对海雷达航迹抗差关联算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8):

- 1855–1861. doi: 10.11999/JEIT141472.
- QI Lin, CUI Yaqi, XIONG Wei, *et al.* Anti-bias association algorithm for automatic identification system and radar based on bias detection[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1855–1861. doi: 10.11999/JEIT141472.
- [8] 柳向, 李东生. 对分布式组网雷达的航迹欺骗偏差补偿技术[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(6): 1255–1264. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2018.06.10.
- LIU Xiang and LI Dongsheng. Deviation compensation for phantom tracks jamming against distributed radar network[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(6): 1255–1264. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2018.06.10.
- [9] 宋强, 熊伟, 何友. 基于复数域拓扑描述的航迹对准关联算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(3): 560–566. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.03.017.
- SONG Qiang, XIONG Wei, and HE You. A track alignment-correlation algorithm based on topological description of complex number field[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(3): 560–566. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.03.017.
- [10] 宋强, 熊伟, 马强. 基于目标不变信息量的模糊航迹对准关联算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 190–195. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.01.39.
- SONG Qiang, XIONG Wei, and MA Qiang. Fuzzy track alignment-correlation algorithm based on target invariable information[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(1): 190–195. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.01.39.
- [11] 何友, 宋强, 熊伟. 基于傅里叶变换的航迹对准关联算法[J]. 航空学报, 2010, 31(2): 356–362.
- HE You, SONG Qiang, and XIONG Wei. A track registration-correlation algorithm based on Fourier transform[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2010, 31(2): 356–362.
- [12] 吴泽民, 任姝婕, 刘熹. 基于拓扑序列法的航迹关联算法[J]. 航空学报, 2009, 30(10): 1937–1942. doi: 10.3321/j.issn:1000-6893.2009.10.024.
- WU Zemin, REN Shujie, and LIU Xi. Topology sequence based track correlation algorithm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(10): 1937–1942. doi: 10.3321/j.issn:1000-6893.2009.10.024.
- [13] 董凯, 王海鹏, 刘瑜. 基于拓扑统计距离的航迹抗差关联算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(1): 50–55. doi: 10.11999/JEIT140244.
- DONG Kai, WANG Haipeng, and LIU Yu. Anti-bias track association algorithm based on topology statistical distance[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(1): 50–55. doi: 10.11999/JEIT140244.
- [14] 齐林, 刘瑜, 任华龙, 等. 空基多雷达航迹抗差关联算法[J]. 航空学报, 2018, 39(3): 221–229. doi: 10.7527/S1000-6893.2017.21691.
- QI Lin, LIU Yu, REN Hualong, *et al.* Air-platform multi-radar anti-bias tracks association algorithm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(3): 221–229. doi: 10.7527/S1000-6893.2017.21691.
- [15] 鹿强, 吴琳, 陈昭, 等. 海上目标多源轨迹数据关联综述[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(5): 571–581. doi: 10.12082/dqxxkx.2018.180024.
- LU Qiang, WU Lin, CHEN Zhao, *et al.* A review of multi-source trajectory data association for marine targets[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(5): 571–581. doi: 10.12082/dqxxkx.2018.180024.
- [16] 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. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01455.
- DONG Kai, GUAN Xin, WANG Haipeng, *et al.* Global optimal track association algorithm based on sequential modified grey association degree[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(8): 1939–1945. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01455.
- [17] ZHU Hongyan, WANG Wei, and WANG Chen. Robust track-to-track association in the presence of sensor biases and missed detections[J]. *Information Fusion*, 2016, 27: 33–40. doi: 10.1016/j.inffus.2015.05.002.
- [18] QI Lin, DONG Kai, LIU Yu, *et al.* Anti-bias track-to-track association algorithm based on distance detection[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(2): 269–276. doi: 10.1049/iet-rsn.2016.0139.
- 崔亚奇: 男, 1987年生, 讲师, 研究方向为航迹关联、状态估计融合、机器学习、人工智能。
- 熊伟: 男, 1977年生, 教授, 研究方向为多传感器信息融合, 指挥自动化。
- 唐田田: 女, 1989年生, 讲师, 研究方向为大数据技术及应用。
- 责任编辑: 余蓉