

# 基于相位相关的航迹对准关联技术

何 友, 宋 强, 熊 伟

(海军航空工程学院信息融合技术研究所, 山东烟台 264001)

**摘 要:** 本文研究了雷达存在探测系统误差时的目标航迹关联问题, 给出了组网雷达常规及大系统误差对目标航迹影响的理论分析, 提出了一种基于相位相关的系统误差配准前目标航迹对准关联算法. 该算法利用 Radon 变换和 Fourier 变换的有关特性, 采用 1 维和 2 维相位相关来分别估计航迹间旋转和平移, 基于估计量对各雷达目标航迹进行对准后, 实现配准前航迹准确关联. 最后, 蒙特卡洛仿真结果比较验证了在各种不同的系统误差和目标环境中算法良好的航迹对准关联效果, 充分说明其能够为雷达误差配准提供可靠的关联航迹数据.

**关键词:** 相位相关; 拉东变换; 傅里叶变换; 系统误差; 航迹关联; 雷达组网

**中图分类号:** TP953; TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2718-06

## Track Alignment-Correlation Technique Based on Phase Correlation

HE You, SONG Qiang, XIONG Wei

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

**Abstract:** This paper has researched on the problem of track correlation with systematic errors in radar network, analyzed that how do the general and big systematic errors affect the detected tracks of target theoretically; On the basis, prior to registration, a target track alignment-correlation algorithm based on phase correlation has been presented. Based on the characteristics of Radon transform and Fourier transform, the algorithm estimates the rotation and the mass motion using 1D and 2D phase correlation respectively. Thus, the target tracks provided by different radars in common coordinates could be aligned and associated accurately without estimation and registration of radar systematic errors in advanced. Finally, the Monte-Carlo simulation result illustrates that the algorithm has excellent alignment-correlation performance in different systematic error and target environments, and shows that the algorithm can provide reliable associated tracks for the later registration.

**Key words:** phase correlation; Radon transform; Fourier transform; systematic errors; track correlation; radar network

## 1 引言

雷达组网数据处理技术通过对多部雷达适当布站, 组网雷达的信息共享、综合处理、控制与管理, 能够获得目标检测、跟踪、融合性能的最优化<sup>[1]</sup>. 而在雷达组网数据处理系统中, 雷达系统误差配准与目标航迹关联是两个关键环节, 系统误差配准是通过利用有效关联的航迹数据, 准确估计雷达系统误差, 并以此对各组网雷达上报的目标航迹进行补偿<sup>[1]</sup>, 是目标航迹可靠关联的前提, 而航迹关联的目的则是可靠关联各雷达目标航迹, 以便进行下一步的目标航迹融合<sup>[2]</sup>. 因此, 由于组网雷达系统误差的存在, 要进行航迹可靠关联需要准确配准雷达系统误差, 而要进行系统误差准确配准又必须可靠关联目标航迹, 这就导致目标航迹关联与系统误差配准互为条件与前提.

当前, 目标航迹关联算法主要有最近邻法<sup>[2]</sup>、加权

法<sup>[3]</sup>、双门限法<sup>[4,5]</sup>、序贯算法<sup>[6]</sup>、多维分配法<sup>[7]</sup>、灰色理论法<sup>[8]</sup>、模糊类算法<sup>[9]</sup>等等, 这些算法在仿真环境中的性能表现良好, 目前也得到了广泛应用. 但在工程应用中这些算法却经常会出现正确关联率严重下降, 误关联率和漏关联率大大上升的情况, 归根结底是由于这些算法本质上基于目标航迹点间的统计距离来构建关联准则, 通常并未考虑组网雷达存在的系统误差影响. 而由于航迹的准确关联是系统误差有效配准的前提, 采用误关联的目标航迹也必然不能准确估计和校正雷达系统误差, 从而进一步导致后端对所有目标航迹关联与融合性能的恶化. 此外, 雷达系统误差配准算法<sup>[1,10-13]</sup>也往往忽视上述问题, 均假设用于配准的航迹来源于同一目标, 而实际上, 由于组网雷达存在的系统误差, 使得目标航迹将极可能不能准确关联, 而利用这些不可靠关联的目标航迹进行系统误差估计必然会导致出现更大偏差. 为此, 本文通过研究不依赖于准确误差配准的目

标航迹关联技术来解决上述问题,为区别于传统航迹关联技术,这里将该技术称为航迹对准关联技术,可分为航迹对准及航迹关联两阶段.该技术处于雷达数据处理中系统误差配准的前端,主要为误差配准提供准确关联的航迹数据.

## 2 系统误差对目标航迹的影响分析

假设二坐标雷达  $A$ 、 $B$  异地配置,且以雷达  $A$  站址为原点建立公共笛卡尔坐标系,雷达  $B$  的坐标为  $(x_{B_s}, 0)$ ;两雷达有一定的白色高斯测量随机误差,设测距和测角随机误差均方差分别为  $(\delta r_A, \delta \theta_A)$ 、 $(\delta r_B, \delta \theta_B)$ ;而测距和测角系统误差分别设为  $(\Delta r_A, \Delta \theta_A)$ 、 $(\Delta r_B, \Delta \theta_B)$ ;  $k$  时刻两雷达目标航迹中对应同一目标的位置状态估计分别为  $(\hat{x}_A(k), \hat{y}_A(k))$ 、 $(\hat{x}_B(k), \hat{y}_B(k))$ ,而目标的真实位置为  $(x(k), y(k))$ ,真实极坐标分别设为  $(r_A(k), \theta_A(k))$ 、 $(r_B(k), \theta_B(k))$ .

对量测数据进行滤波获得目标航迹,此时可忽略滤波误差的影响,有

$$\begin{cases} \hat{x}_A(k) = (r_A(k) + \Delta r_A) \sin(\theta_A(k) + \Delta \theta_A) \\ \hat{y}_A(k) = (r_A(k) + \Delta r_A) \cos(\theta_A(k) + \Delta \theta_A) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \hat{x}_B(k) = (r_B(k) + \Delta r_B) \sin(\theta_B(k) + \Delta \theta_B) + x_{B_s} \\ \hat{y}_B(k) = (r_B(k) + \Delta r_B) \cos(\theta_B(k) + \Delta \theta_B) \end{cases} \quad (2)$$

对应于同一目标,通过推导,分别有

$$\begin{cases} \hat{x}_A(k) = x(k) \cos \Delta \theta_A + y(k) \sin \Delta \theta_A + \Delta r_A \sin(\theta_A(k) + \Delta \theta_A) \\ \hat{y}_A(k) = -x(k) \sin \Delta \theta_A + y(k) \cos \Delta \theta_A + \Delta r_A \cos(\theta_A(k) + \Delta \theta_A) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \hat{x}_B(k) = x(k) \cos \Delta \theta_B + y(k) \sin \Delta \theta_B + \Delta r_B \sin(\theta_B(k) + \Delta \theta_B) + x_{B_s}(1 - \cos \Delta \theta_B) \\ \hat{y}_B(k) = -x(k) \sin \Delta \theta_B + y(k) \cos \Delta \theta_B + \Delta r_B \cos(\theta_B(k) + \Delta \theta_B) + x_{B_s} \sin \Delta \theta_B \end{cases} \quad (4)$$

联立式(3)、(4),消除  $(x(k), y(k))$ ,经推导得到

$$\begin{cases} \hat{x}_B(k) = \hat{x}_A(k) \cos(\Delta \theta_B - \Delta \theta_A) + \hat{y}_A(k) \sin(\Delta \theta_B - \Delta \theta_A) - ((\Delta r_A \sin(\theta_A(k) + \Delta \theta_B) + \Delta r_B \sin(\theta_B(k) + \Delta \theta_B) + x_{B_s}(1 - \cos \Delta \theta_B))) \\ \hat{y}_B(k) = -\hat{x}_A(k) \sin(\Delta \theta_B - \Delta \theta_A) + \hat{y}_A(k) \cos(\Delta \theta_B - \Delta \theta_A) - ((\Delta r_A \cos(\theta_A(k) + \Delta \theta_B) + \Delta r_B \cos(\theta_B(k) + \Delta \theta_B) + x_{B_s} \sin \Delta \theta_B)) \end{cases} \quad (5)$$

定义

$$\begin{cases} \theta_0 \triangleq \Delta \theta_B - \Delta \theta_A \\ C_x \triangleq -(\Delta r_A \sin(\theta_A(k) + \Delta \theta_B) + \Delta r_B \sin(\theta_B(k) + \Delta \theta_B) + x_{B_s}(1 - \cos \Delta \theta_B)) \\ C_y \triangleq -(\Delta r_A \cos(\theta_A(k) + \Delta \theta_B) + \Delta r_B \cos(\theta_B(k) + \Delta \theta_B) + x_{B_s} \sin \Delta \theta_B) \end{cases} \quad (6)$$

式中,由于目标的运动,仅有  $\theta_A(k)$  和  $\theta_B(k)$  是随时间

变化的,雷达量测系统误差一般为较小常量或长时间段内缓慢漂移量.在实际使用中,通常可选择距各组网雷达均较远的某一局部公共探测区域作为对准关联区域,而一定时间内该区域中目标的方位变化一般不大,这样可认为  $C_x$ 、 $C_y$  大致为常量,  $\theta_0$  亦为常量.

因此有

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_B(k) \\ \hat{y}_B(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_A(k) \\ \hat{y}_A(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

这样,式(6)、(7)说明,雷达测距系统误差使各雷达的航迹间发生平移,而测角系统误差主要是使得各雷达航迹间产生旋转;而在理想情况时,雷达  $A$  的航迹经过角度  $\theta_0$  的旋转,再平移  $(C_x, C_y)$  后得到的目标航迹与雷达  $B$  的航迹应该是能够重合的.

此外,当某些特殊情况发生,例如雷达阵地遭受炮火猛烈轰炸,导致发生天线严重倾斜等异常状况时,很可能使得测距和测角系统误差过大,以上的结论将需要得到修正,此时

$$\begin{aligned} C_x &= -\Delta r_A \sin(\theta_A(k) + \Delta \theta_B) - \Delta r_B \sin(\theta_B(k) + \Delta \theta_B) \\ &\quad - x_{B_s}(1 - \cos \Delta \theta_B) \\ &= -\Delta r_A \sin(\theta_A(k) + \Delta \theta_A + \Delta \theta_B - \Delta \theta_A) \\ &\quad - \Delta r_B \sin(\theta_B(k) + \Delta \theta_B) - x_{B_s}(1 - \cos \Delta \theta_B) \\ &= -\Delta r_A \sin(\theta_A(k) + \Delta \theta_A) \cos(\Delta \theta_B - \Delta \theta_A) \\ &\quad - \Delta r_A \cos(\theta_A(k) + \Delta \theta_A) \sin(\Delta \theta_B - \Delta \theta_A) \\ &\quad - \Delta r_B \sin(\theta_B(k) + \Delta \theta_B) - x_{B_s}(1 - \cos \Delta \theta_B) \\ &= -\frac{\Delta r_A}{\Delta r_A + r_A} \hat{x}_A(k) \cos(\Delta \theta_B - \Delta \theta_A) \\ &\quad - \frac{\Delta r_A}{\Delta r_A + r_A} \hat{y}_A(k) \sin(\Delta \theta_B - \Delta \theta_A) \\ &\quad - \frac{\Delta r_B}{\Delta r_B + r_B} \hat{x}_B(k) - x_{B_s}(1 - \cos \Delta \theta_B) \end{aligned} \quad (8)$$

同理,有

$$\begin{aligned} C_y &= -\frac{\Delta r_A}{\Delta r_A + r_A} \hat{x}_A(k) \sin(\Delta \theta_B - \Delta \theta_A) - \frac{\Delta r_B}{\Delta r_B + r_B} \hat{y}_B(k) \\ &\quad - \frac{\Delta r_A}{\Delta r_A + r_A} \hat{y}_A(k) \cos(\Delta \theta_B - \Delta \theta_A) - x_{B_s} \sin \Delta \theta_B \end{aligned} \quad (9)$$

将式(8)、(9)代入式(7)后,化简可得

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_B(k) \\ \hat{y}_B(k) \end{bmatrix} = \frac{\Delta r_B + r_B}{r_B} \frac{2\Delta r_A + r_A}{\Delta r_A + r_A} \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_A(k) \\ \hat{y}_A(k) \end{bmatrix} + \frac{\Delta r_B + r_B}{r_B} \begin{bmatrix} x_{B_s}(1 - \cos \Delta \theta_B) \\ x_{B_s} \sin \Delta \theta_B \end{bmatrix} \quad (10)$$

由上式可知,在过大探测系统误差情况下,测距系统误差对航迹的影响要大,过大的测距系统误差不仅造成目标航迹的平移和旋转,还会造成目标航迹发生仿射变换,使航迹发生整体变形(即不同的点迹因所在真实位置不同导致其尺度、平移量就不同),说明大测距系统误差不仅使得目标航向偏离真实航向,更会

导致目标航速和目标之间的航向夹角发生变化;而测方位角系统误差只可能略微增大目标航迹平移量,对目标航迹的影响很小.

但一般情况下,雷达系统误差不会过大,因而对目标航迹的影响只是产生旋转和平移,本文也只研究这种情况下的航迹对准关联问题.

### 3 基于相位相关的目标航迹对准关联模型

本节利用 Radon 变换及 Fourier 变换<sup>[14,15]</sup>,分别采用 1 维、2 维相位相关技术,对上述旋转  $\theta_0$  和平移( $C_x, C_y$ )进行估计,并以此对目标航迹进行对准补偿,实现对航迹的准确关联.

#### 3.1 航迹数据空间的描述

在公共观测区域中选取一可靠的矩形区域作为航迹对准区域,设所选取矩形对准区域中心点坐标为( $x_C, y_C$ ),而该区域的长宽分别设为  $a, b$ .对区域按  $N \times N$  进行平均网格化,这样,航迹对准区域就被划分为  $N^2$  个面积为  $(a/N) \times (b/N)$  的小矩形网格,且定义( $x_I, y_I$ ), ( $x_I = 1 \cdots N, y_I = 1 \cdots N$ )为网格标号.由此,按照目标航迹点落入网格对应的标号,可分别构建两雷达的航迹数据空间矩阵  $f_A, f_B$ ,且

$$\begin{aligned} f_A(x_I, y_I) = & \begin{cases} Ck, k \text{ 时刻该网格存在雷达 A 航迹点落入} \\ 0, k \text{ 时刻该网格不存在雷达 A 航迹点落入, } C \text{ 为常量} \end{cases} \\ f_B(x_I, y_I) = & \begin{cases} Ck, k \text{ 时刻该网格存在雷达 B 航迹点落入} \\ 0, k \text{ 时刻该网格不存在雷达 B 航迹点落入} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

根据式(5),  $f_A, f_B$  存在以下关系

$$f_B(x_I, y_I) = f_A((x_I \cos \theta_0 + y_I \sin \theta_0) - C_x N/a, (-x_I \sin \theta_0 + y_I \cos \theta_0) - C_y N/b) \quad (12)$$

上式也表明,雷达 A 的数据空间  $f_A$  经过  $\theta_0$  角度的旋转,再在  $x_I$  和  $y_I$  维上分别进行( $C_x N/a, C_y N/b$ )的平移可以得到雷达 B 的数据空间  $f_B$ .

#### 3.2 航迹对准

##### 3.2.1 Radon 变换及其性质

2 维数据空间  $f(x, y)$  的 Radon 变换是该数据空间沿包含该函数的平面内的一组直线的线积分<sup>[14]</sup>,其定义如下:

$$R(\rho, \theta) = \text{Radon}\{f(x, y)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(\rho \cos \theta - \lambda \sin \theta, \rho \sin \theta + \lambda \cos \theta) d\lambda \quad (13)$$

而 Radon 变换关于数据空间的平移、旋转变换有以下特性:

##### (1) 平移特性

数据空间的平移在 Radon 变换域中表现为,对于不同的  $\theta \in [0, 2\pi]$ ,  $R(\rho, \theta)$  在  $\rho$  方向上拥有不同的移位,

即

$$\text{Radon}\{f(x - x_0, y - y_0)\} = R(\rho - \rho_0, \theta) \quad (14)$$

式中  $\rho_0 = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta$ ;

##### (2) 旋转特性

数据空间的旋转在 Radon 变换域中表现为  $R(\rho, \theta)$  在  $\theta$  方向上的移位,即

$$\text{Radon}\{f(x \cos \varphi + y \sin \varphi, -x \sin \varphi + y \cos \varphi)\} = R(\rho, \theta + \varphi) \quad (15)$$

式中  $\varphi$  为旋转角度.

##### 3.2.2 旋转角估计

根据 Radon 变换的性质,设  $f_A(x_I, y_I), f_B(x_I, y_I)$  对应的 Radon 变换分别为  $R_A(\rho, \theta)$  和  $R_B(\rho, \theta)$ ,对式(12)两边分别求 Radon 变换,由于  $f_A(x_I, y_I), f_B(x_I, y_I)$  间存在旋转  $\theta_0$  和平移( $C_x N/a, C_y N/b$ ),使得  $R_A(\rho, \theta), R_B(\rho, \theta)$  之间存在以下关系

$$R_B(\rho, \theta) = R_A(\rho - \rho_0, \theta + \theta_0) \quad (16)$$

且  $\rho_0 = C_x N \cos \theta/a + C_y N \sin \theta/b$ .

对于不同的  $\theta$ ,在  $\rho$  方向上对式(16)两边分别求 1 维 Fourier 变换,得到它们在频域中的关系为

$$F_B^R(\omega, \theta) = F_A^R(\omega, \theta + \theta_0) \exp(-2j\pi(\rho_0 \omega)) \quad (17)$$

式中,  $F_A^R(\omega, \theta), F_B^R(\omega, \theta)$  分别表示  $R_A(\rho, \theta), R_B(\rho, \theta)$  在  $\rho$  方向上的 1 维 Fourier 变换.通过对式(17)两边分别取幅值,得到幅值频谱的关系为

$$|F_B^R(\omega, \theta)| = |F_A^R(\omega, \theta + \theta_0)| \quad (18)$$

设  $H_A^R(\omega, \theta), H_B^R(\omega, \theta)$  分别表示  $F_A^R(\omega, \theta), F_B^R(\omega, \theta)$  的幅值,则上式转化为

$$H_B^R(\omega, \theta) = H_A^R(\omega, \theta + \theta_0) \quad (19)$$

这样,  $f_A(x_I, y_I), f_B(x_I, y_I)$  间的旋转已经完全转化为幅值频谱在  $\theta$  方向上的平移.

对于所有  $\omega$ ,在  $\theta$  方向上对式(19)两边分别求 1 维 Fourier 变换,得到

$$F_B^H(\omega, \vartheta) = F_A^H(\omega, \vartheta) \exp(-2j\pi(-\theta_0 \vartheta)) \quad (20)$$

式中,  $F_A^H(\omega, \vartheta), F_B^H(\omega, \vartheta)$  分别表示  $H_A^R(\omega, \theta), H_B^R(\omega, \theta)$  在  $\theta$  方向上的 1 维 Fourier 变换.

式(20)说明,对于所有  $\omega, H_A^R(\omega, \theta), H_B^R(\omega, \theta)$  变换到频域中有相同的幅值,但存在一个相位差,该相位差等于  $H_A^R(\omega, \theta)$  与  $H_B^R(\omega, \theta)$  之间在  $\theta$  方向上互功率谱的相位,表示为

$$\frac{F_B^H(\omega, \vartheta) F_A^{H*}(\omega, \vartheta)}{|F_B^H(\omega, \vartheta) F_A^{H*}(\omega, \vartheta)|} = \exp(-2j\pi(-\theta_0 \vartheta)) \quad (21)$$

式中  $F_A^{H*}(\omega, \vartheta)$  表示  $F_A^H(\omega, \vartheta)$  的复共轭.

这样,对于所有  $\omega$ ,通过对式(21)在  $\vartheta$  方向上进行 Fourier 逆变换,将在  $\omega$  方向上形成一系列单位脉冲函数,脉冲峰值点位于  $(\omega, -\theta_0)$ .

具体而言,旋转角  $\theta_0$  可通过下式求得

$$\theta_0 = -\arg \max_{\vartheta} \sum_{\omega} \left| F_{\vartheta}^{-1} \left[ \frac{F_A^H(\omega, \vartheta)}{F_B^H(\omega, \vartheta)} \right] \right| \quad (22)$$

式中,  $F_{\vartheta}^{-1}$  表示在  $\vartheta$  方向上进行 1 维 Fourier 逆变换.

这样, 对  $f_A$  进行角度  $\theta_0$  的旋转后可得到另一数据空间, 定义为  $f_A'$ , 且

$$f_A'(x_I, y_I) = f_A((x_I \cos \theta_0 + y_I \sin \theta_0), (-x_I \sin \theta_0 + y_I \cos \theta_0)) \quad (23)$$

此时,  $f_A', f_B$  间只存在  $(NC_x/a, NC_y/b)$  的平移, 即

$$f_B(x_I, y_I) = f_A'(x_I - C_x N/a, y_I - C_y N/b) \quad (24)$$

### 3.2.3 平移量估计

对式(24)进行 Fourier 变换, 假设  $f_A'(x_I, y_I)$  相应的 Fourier 变换为  $F_A'(u, v)$ , 有

$$F_B(u, v) = F_A'(u, v) \exp(-2j\pi(\frac{C_x N}{a}u + \frac{C_y N}{b}v)) \quad (25)$$

上式说明,  $f_A'(x_I, y_I)$  和  $f_B(x_I, y_I)$  变换到频域中有相同的幅值, 但存在一个相位差, 该相位差等于两数据空间互功率谱的相位, 表示为

$$\frac{F_B(u, v) F_A'^*(u, v)}{|F_B(u, v) F_A'^*(u, v)|} = \exp(-2j\pi(\frac{C_x N}{a}u + \frac{C_y N}{b}v)) \quad (26)$$

式中  $F_A'^*(u, v)$  表示  $F_A'(u, v)$  的复共轭. 类似的, 对式(26)进行 Fourier 逆变换也将形成一单位脉冲函数, 而脉冲的峰值点位于  $(C_x N/a, C_y N/b)$  处.

具体而言,  $(C_x N/a, C_y N/b)$  可通过下式求得

$$(C_x N/a, C_y N/b) = \arg \max_{u, v} \left| F^{-1} \left( \frac{F_B(u, v)}{F_A'(u, v)} \right) \right| \quad (27)$$

式中,  $F^{-1}$  表示 2 维 Fourier 逆变换.

由于  $N, a, b$  为已知量, 通过  $(C_x N/a, C_y N/b)$  不难求得平移量  $(C_x, C_y)$ . 这样, 依据旋转  $\theta_0$  与平移  $(C_x, C_y)$ , 对雷达 A 的量测进行相应补偿与滤波, 就可完成航迹对准.

### 3.3 航迹关联

采用双门限关联算法<sup>[5]</sup>来对目标航迹进行关联判决, 假设两雷达航迹号集分别为  $U_A = \{1, 2, \dots, n_A\}$ ,  $U_B = \{1, 2, \dots, n_B\}$ , 其中,  $n_A, n_B$  分别为两雷达航迹数.

假设  $\hat{X}_A^i(k|k), \hat{X}_B^j(k|k)$ ,  $(i \in U_A, j \in U_B)$  分别表示经对准后雷达 A 对目标  $i$  和雷达 B 对目标  $j$  的  $k$  时刻目标状态估计, 且

$$\begin{cases} \hat{X}_A^i(k|k) = [\hat{x}_A^i(k), \hat{\dot{x}}_A^i(k), \hat{y}_A^i(k), \hat{\dot{y}}_A^i(k)]' \\ \hat{X}_B^j(k|k) = [\hat{x}_B^j(k), \hat{\dot{x}}_B^j(k), \hat{y}_B^j(k), \hat{\dot{y}}_B^j(k)]' \end{cases} \quad (28)$$

式中的参数分别表示  $k$  时刻雷达 A 对目标  $i$  和雷达 B 对目标  $j$  在  $x$  和  $y$  维的位置和速度估计.

对来自雷达 A、B 的  $R$  个时刻连续状态估计样本  $\hat{X}_A^i(k|k), \hat{X}_B^j(k|k)$ , 首先逐个根据  $\chi^2$  分布门限进行假设检验, 即计算

$$\alpha_{ij}(k) = [\hat{X}_A^i(k|k) - \hat{X}_B^j(k|k)]' [\hat{P}_A^i(k|k) + \hat{P}_B^j(k|k)]^{-1}$$

$$\cdot [\hat{X}_A^i(k|k) - \hat{X}_B^j(k|k)], (i \in U_A, j \in U_B) \quad (29)$$

式(29)中,  $\hat{P}_A^i(k|k), \hat{P}_B^j(k|k)$  分别表示雷达 A 的航迹  $i$  与雷达 B 的航迹  $j$  的  $k$  时刻状态估计误差协方差.

若检验满足

$$\alpha_{ij}(k) \leq \delta, (i \in U_A, j \in U_B) \quad (30)$$

则认为该时刻两航迹点来源于同一目标, 且计数器加 1, 即  $m_{ij}(k) = m_{ij}(k-1) + 1$  ( $m_{ij}(0) = 0$ ); 反之, 该时刻计数器值不变.

经  $R$  次检验后, 把计数器所计数值与指定数  $L$  进行对比, 若  $m_{ij}(k) \geq L$  时, 则判决雷达 A 的航迹  $i$  与雷达 B 的航迹  $j$  关联, 否则, 判定为不关联航迹.

按高斯分布假设,  $\alpha_{ij}(k)$  服从自由度为  $n_x$  的  $\chi^2$  分布, 而  $n_x$  为目标状态向量维数, 式(30)中的阈值  $\delta$  可满足

$$\Pr\{\alpha_{ij}(k) > \delta | H_0\} = \alpha \quad (31)$$

式中的  $\alpha$  表示显著水平, 通常可取 0.01.

## 4 仿真验证与分析

为说明算法有效性, 采用蒙特卡洛方法对本文算法与传统算法关联性能进行仿真比较, 假设仿真次数设为 100 次, 时长为 100s.

假设两雷达均有测距 60m 和测角  $0.4^\circ$  的白色高斯分布随机量测误差, 设雷达 B 的坐标为 (150km, 0); 模拟目标在两维平面上进行匀速直线运动, 目标初速和初始航向分别在  $100 \sim 150\text{m/s}$  和  $0 \sim 2\pi$ (rad) 之间按均匀分布产生. 各目标的初始位置在一个位于公共观测区域内的矩形区域中也按均匀分布产生, 且该区域端点分别位于 (65km, 65km)、(65km, 85km)、(85km, 85km)、(85km, 65km), 而对准关联区域选定为 (55km, 55km)、(55km, 95km)、(95km, 95km)、(95km, 55km) 所标定的矩形区域, 仿真中  $L/R$  采用 6/8 逻辑准则. 在表 1 所列四种参数环境中进行算法仿真:

表 1 仿真环境设置

环境	目标数	$\Delta r_A$ (km)	$\Delta \theta_A$ ( $^\circ$ )	$\Delta r_B$ (km)	$\Delta \theta_B$ ( $^\circ$ )
1	15	0.5	0.5	0.5	-0.5
2	30	0.5	0.5	0.5	-0.5
3	15	1	1	1	-1
4	30	1	1	1	-1

航迹对准关联效果采用正确关联概率  $E_c$ 、错误关联概率  $E_e$ 、漏关联概率  $E_s$  来度量. 区别于传统航迹关联技术的目的, 本文所提出的航迹对准关联技术是为误差配准提供可靠关联的航迹对, 只需保证关联上的航迹对中, 错误关联概率尽可能小, 正确关联概率尽可能大, 而对漏关联概率没有过高要求. 为此, 这里重新定义三种概率, 设仿真中正确、错误及漏关联航迹对总数分别为  $N_c, N_e$  及  $N_s$ , 定义  $E_c = N_c / (N_c + N_e)$ 、 $E_e = N_e / (N_c + N_e)$ 、 $E_s = N_s / (N_c + N_e + N_s)$ , 其中  $E_c, E_e$  将反

映算法的有效关联能力,且  $E_c + E_e = 1$ .

仿真结果如以下图表所示,其中图 1、3 分别举例给出了单次仿真中环境 2、4 的对准前航迹图,而图 2、4 为采用本文算法进行对准后的航迹图,表 2 列出了四种环境中,使用本文算法与仅采用传统算法的正确、错误及漏关联概率的蒙特卡洛仿真结果.

表 2 航迹关联概率

关联概率	本文算法			传统算法 <sup>[4]</sup>		
	$E_c$	$E_e$	$E_s$	$E_c$	$E_e$	$E_s$
环境 1	0.9893	0.0107	0.0673	0.2196	0.7804	0.7753
环境 2	0.9827	0.0173	0.0580	0.4048	0.6952	0.8040
环境 3	0.9667	0.0333	0.1793	0	1	0.9333
环境 4	0.9675	0.0325	0.1683	0	1	0.9670

由图 1、3 不难看出,由于组网雷达存在系统误差,仿真环境中两雷达的目标航迹都已经相互偏离,其中环境 4 中由于更大系统误差的影响,导致航迹间偏离状况更为严重.而表 2 中显示,仅采用基于航迹间统计距离作为关联准则的传统关联算法对目标航迹进行关联,其所获得的航迹关联效果非常差,其中更大系统误差环境 3、4 中均无正确关联航迹,且 90% 以上目标航迹被漏关联,而在较小系统误差环境 1、2 中,算法的关联效果也非常差,目标的正确关联概率也均未超过 50%.由此充分说明,在这种情况下传统算法已不能提供可靠的目标关联航迹对,此时若使用这种关联效果的目标航迹对参与配准,将必然导致雷达系统误差估计的失败.

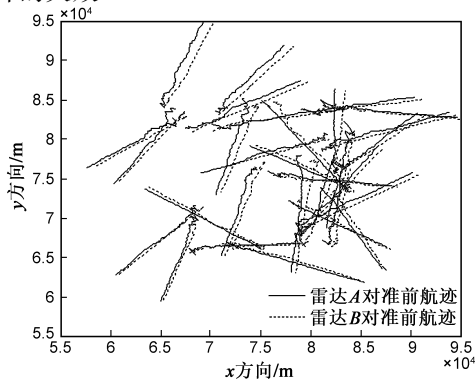


图1 (环境2)两雷达对准前目标航迹

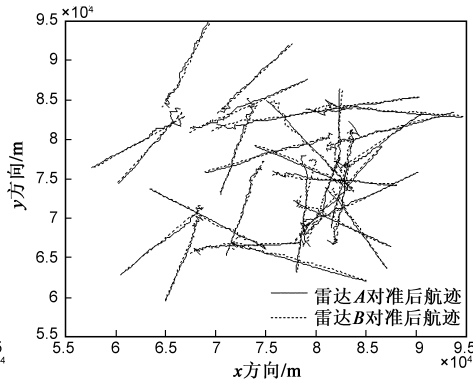


图2 (环境2)两雷达对准后目标航迹

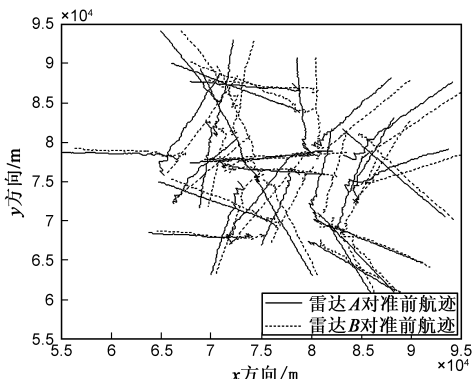


图3 (环境4)两雷达对准前目标航迹

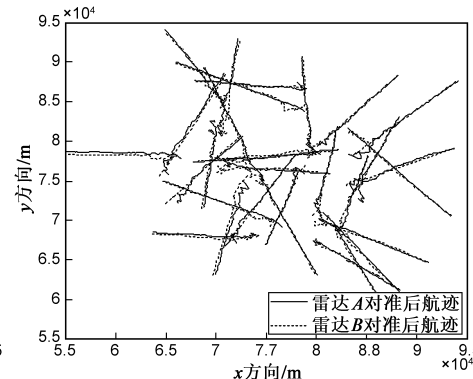


图4 (环境4)两雷达对准后目标航迹

而图 2、4 显示,在两种系统误差环境中,本文所提出的基于相位相关的算法均能很好地对准目标航迹;表 2 中的数据亦说明,采用本文算法时取得了很好的航迹对准关联效果,航迹正确关联概率均在 0.96 以上;同时,四种环境中的错误关联概率均较低,这说明采用本文算法进行关联不容易出现目标航迹的错误关联,充分显示了本文算法在组网雷达存在系统误差情况下航迹关联的可靠性;同时,从环境 1、3 与环境 2、4 的仿真对比可看出,虽然环境 2、4 的目标密度较环境 1、3 的更为密集,但是对于关联性能影响不大,这也说明了算法对于目标环境密集程度的良好适应能力;而同等情况下,从环境 1、2 与环境 3、4 设置系统误差所取得的关联效果可看出,由于更大系统误差相应增大了目标航迹的偏移程度,从而减少了对准关联区域中可利用的公共目标航迹数据,使得算法的对准关联性能有所下降,此时可通过适当增大对准关联区域面积来提升性能.尽管如此,环境 3、4 的正确关联概率只比环境 1、2 相应降低不到 4 个百分点,这也说明了本文算法在组网雷达存在系统误差时对准关联的良好鲁棒性.

此外,对于漏关联指标,从表 2 中可得,环境 3、4 的漏关联概率较环境 1、2 有一定程度的增加,反映算法的漏关联概率受到了系统误差的影响,但表中所列的各漏关联概率表明即使在最差情况下,本文的对准关联算法仍然能够有效关联上大部分航迹,而相应的正确与错误关联概率表明算法亦能保证关联的准确性,这都充分说明了算法能够为误差配准提供更加有效的关联航迹.

## 5 结论

本文研究了在组网雷达存在探测系统误差时的航迹关联问题,首先在组网雷达分别存在常规及大系统误差时,对系统误差影响进行了理论分析;在此基础上,提出了一种基于相位相关的雷达组网误差配准前航迹对准关联算法,该算法利用 Radon 和 Fourier 变换,采用 1 维相位相关来估计航迹间旋转角,对目标航迹数据空间进行旋转补偿后采用 2 维相位相关估计航迹间平移量,在利用该估计量对各组网雷达上报的目标航迹进行平移对准后,实现了

## 目标航迹的准确关联.

蒙特卡洛仿真结果验证了相对于传统算法,本文算法在组网雷达存在系统误差时进行航迹对准关联的优越性,能够为误差配准提供更为可靠的关联目标航迹.

## 参考文献:

- [1] 何友,修建娟,张晶炜,关欣.雷达数据处理及应用(第二版)[M].北京:电子工业出版社,2009.  
HE You, XIU Jianjuan, ZHANG Jingwei, GUAN Xin. Radar Data Processing With Applications(Second Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [2] 何友,王国宏,关欣.信息融合理论及应用[M].北京:电子工业出版社,2010.  
HE You, WANG Guohong, GUAN Xin. Information Fusion Theory With Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)
- [3] 刘慧霞,梁彦,陈绪元,等.一种自适应天波超视距雷达航迹融合算法[J].电子学报,2009,37(6):1348-1352.  
LIU Hui-xia, LIANG Yan, CHEN Xu-yuan, et al. An adaptive OTHR multipath track fusion algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(6):1348-1352. (in Chinese)
- [4] 何友,彭应宁,陆大金.分布式多传感器数据融合中的双门限航迹相关算法[J].电子科学学刊,1997,(6):721-728.  
HE You, PENG Yingning, LU Dajin. Binary track correlation algorithms in a distributed multisensor data fusion system[J]. Journal of Electronics, 1997, (6):721-728. (in Chinese)
- [5] HE You, ZHANG Jingwei. New track correlation algorithms in distributed system[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(4):1359-1371.
- [6] BAR-SHALOM Y. On the sequential track correlation algorithm in a multisensor data fusion system [J]. Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(1):396.
- [7] 衣晓,何友,关欣.多目标跟踪的动态多维分配算法[J].电子学报,2005,33(6):1120-1123.  
YI Xiao, HE You, GUAN Xin. Dynamic multidimensional assignment algorithm for multitarget tracking[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6):1120-1123. (in Chinese)
- [8] 熊伟,张晶炜,何友.基于多维分配和灰色理论的航迹关联算法[J].电子与信息学报,2010,32(4):898-901.  
XIONG Wei, ZHANG Jingwei, HE You. Track correlation algorithm based on multi-dimension assignment and gray theory [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(4):898-901. (in Chinese)
- [9] 何友,陆大金,彭应宁.多目标多传感器模糊双门限航迹相关算法[J].电子学报,1998,(3):15-19.

HE You, LU Da-jin, PENG Ying-ning. Fuzzy correlation algorithms for multitarget and multisensor tracking[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, (3):15-19. (in Chinese)

- [10] ZHENG Z, ZHU Y. New least squares registration algorithm for data fusion [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(4):1410-1416.
- [11] LIN X, BAR-SHALOM Y, KIRUBARAJAN T. Multisensor-multitarget bias estimation for general asynchronous sensors [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(3):899-921.
- [12] HERMAN S M, POORE A B. Nonlinear least-squares estimation for sensor and navigation biases [A]. Proceedings of the SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets [C]. Orlando: SPIE, 2006. 1-18.
- [13] QI Yongqing, JING Zhongliang, HU Shiqiang, et al. New methods for dynamic bias estimation gaussian mean shift registration [J]. Optical Engineering, 2008, 47(2):1-8.
- [14] DEANS S R. The Radon Transform and Some of Its Applications [M]. New York: John Wiley & Sons, 1983.
- [15] CHEN Qin-sheng, DEFRISE Michel. Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-mellin transforms for image registration and recognition [J]. IEEE Trans on PAMI, 1994, 16(12):1156-1168.

## 作者简介:



何 友 男,1956年10月出生于吉林磐石,博士,现为海军航空工程学院教授,博士生导师.主要研究方向:雷达自适应检测方法、多传感器信息融合、多目标跟踪、分布检测理论及应用、系统仿真与作战模拟等.



宋 强 男,1983年9月出生于江西宜春,硕士,现为海军航空工程学院博士研究生.主要研究方向:雷达组网技术、系统误差配准、多目标跟踪.

E-mail: songqiang8@sina.com



熊 伟 男,1977年1月出生于江西南昌,博士,现为海军航空工程学院副教授,硕士生导师.主要研究方向:信息融合、指挥自动化.