基于相互测距信息的机群组网协同定位技术

刘俊成 张京娟 冯培德

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在网络中心战条件下,针对无 GPS(Global Positioning System)时如何提高机群的导航定位精度问题,构建了以机载数据链和惯导系统为核心的协同定位系统,设计了协同定位系统的测距方案,分析了协同定位过程中的时间同步问题,提出了一种基于机间相互测距信息的机群组网协同定位方法. 该方法利用几何图形平移旋转来估计机群各飞机的惯导系统定位误差. 仿真表明:该方法可以用于长时间估计惯导位置误差,有效延缓惯导位置误差的发散速度,当 5 架飞机协同定位时,机群惯导位置精度将提高 2 倍左右.

关 键 词: 协同定位; 机群; 相互测距; 数据链; 惯导系统; 导航系统; 几何图形平移旋转

中图分类号: V 249.32

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)04-0541-05

Swarming aircraft collaborative localization based on mutual rangings

Liu Juncheng Zhang Jingjuan Feng Peide

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In the environment of net-centric war, collaborative localization based on mutual rangings is proposed to improve the inertial positioning accuracy of the swarming aircraft when global positioning system (GPS) is unbelievable. The collaborative localization system, which was mainly composed of the inter-flight data link and the inertial system, was designed and the ranging scheme as well as the time synchronization problem were analyzed. The polygon translation-rotation method was applied to estimate the inertial positioning errors. Simulation results show that the polygon translation-rotation method slows down the divergence speed of the inertial positioning errors effectively and the inertial navigation accuracy is about 2 times of the original level with the help of collaborative localization for the five aircraft swarming.

Key words: collaborative localization; swarming aircraft; mutual ranging; data link; inertial system; navigation system; polygon translation-rotation method

现代战争的作战模式已经由以平台为中心的单独对抗发展成以网络为中心的体系对抗[1-2],近年的局部战争,如海湾战争、伊拉克战争等已经证明现代战争是以信息化为主要特征的一体化程度很高的战争,敌我双方的较量不再仅仅是人与人、武器与武器的对抗,而是体系与体系之间的对抗. 因此,在网络中心战条件下,为了提高整体作战效能,实现资源优化配置,降低战争成本,作战飞机将会成群出动[3],组成机群网络共同执行任务,机群组网将成为空中行动的一种工作模式.

机群组网、协同空战的关键技术之一是机群的精确定位技术[3]. 目前使用的方法主要是惯导/GPS(Global Positioning System)组合定位方法,因为 GPS 易受干扰且战时不能依赖,所以,在无 GPS 条件下如何提高机群导航定位精度成为亟待解决的问题. 文献[4]中利用相互测距和测向信息进行惯导水平位置误差(简称为惯导位置误差)估计,文献[2,5]用基于机间相互测距信息

收稿日期: 2011-03-30; **网络出版时间**: 2012-04-20 09:18

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120420.0918.014.html

基金项目: 航空科学基金重点实验室类资助项目(20095551026)

作者简介: 刘俊成(1981-),男,山东武城人,博士生,liujuncheng_wo@aspe.buaa.edu.cn.

的 Kalman 滤波方法来解决这一问题,这个方法存在两个不足:① 当惯导位置误差和机间距离数量级相当或者惯导位置误差大于机间距离时,量测方程线性化误差过大,导致无法估计惯导位置误差;② 滤波的状态方程认为惯导位置误差不变,不能用于长时间估计惯导位置误差. 为了解决这两个问题,本文提出了一种基于相互测距信息的几何图形平移旋转的协同定位方法.

1 机群组网协同定位原理

考虑到惯导系统的定位误差服从正态分布这一特征,工作在同一位置的多套惯导通过对输出取加权平均的办法可明显提高其定位精度,但是,由于受惯导体积、重量及成本的限制,在多数情况下一架飞机仅装 1 ~2 套惯导,加权平均的思路很难实施. 将上述思路应用到一个机群,为每个节点配置一套机载数据链,利用机载数据链实时测量并相互通报各惯导的位置和它们之间的距离,利用距离信息和惯导提供的位置信息,采用几何图形平移旋转的协同定位方法来估计每套惯导的位置误差,这样可以达到与加权平均类似的效果.

定义由惯导系统输出的各节点水平位置组成的多边形为惯导多边形,定义由测距值计算确定的各节点水平位置组成的多边形为量测多边形.

由于测距值的精度远高于惯导定位精度,所以量测多边形可以较准确地反映各节点在空间中的相对位置,根据测边秩亏自由网基准理论[6],将量测多边形的形心平移至惯导多边形的形心,然后按照 D 最小这一原则使量测多边形旋转一定角度,所得量测多边形各节点位置即为飞机的估计位置,其中 D 的表达式为

$$D = \sum_{i=1}^{n} (- y_i^{\mathrm{I}} \Delta \hat{x}_i^{\mathrm{I}} + x_i^{\mathrm{I}} \Delta \hat{y}_i^{\mathrm{I}}) \tag{1}$$

式中,n 为节点数;$\{x_i^{\mathrm{I}}, y_i^{\mathrm{I}}\}$ $(i = 1,2,\cdots,n)$ 为节点 i 的惯导系统(下面称为惯导 i)输出的水平位置;$\{\Delta x_i^{\mathrm{I}}, \Delta y_i^{\mathrm{I}}\}$ 为惯导 i 的位置误差估计值. 结合惯导位置输出即可估计惯导位置误差.

2 机群组网协同定位系统构成

2.1 机群组网协同定位系统的硬件构成

机群中的每架飞机称为一个节点,每个节点的协同定位系统都由一套机载数据链、一套惯导系统和一套组网计算机组成.

协同定位过程中,选取当地地理坐标系为导航系,3 轴的方向分别为东向、北向和天向,本节点的惯导数据传送给机载数据链,传输的惯导数据包括经度 λ、纬度 φ、高度 h、状态字和帧号,机载数据链具备实时测距和通信功能,利用无线电测量得到机群内各节点两两之间距离 d_{ij}^{m} $(i = 1, 2,\cdots,n, i \neq j)$,同时利用无线电通信实时相互通报惯导数据和测距信息,最后,所有节点惯导数据和测距信息全部传送至组网计算机,进行协同定位计算. 节点协同定位系统构成如图 1 所示.

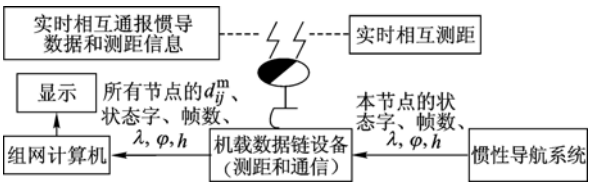

图 1 节点协同定位系统构成

作为系统的核心设备之一的机载数据链是基于数据链技术的链路设备,可以构成点对点、一点对多点的数据链路和网状数据链路. 美军和北约集团自 20 世纪 60 年代初开始研制数据链,根据不同时期的作战需要和技术水平,开发了一系列数据链[7-8]:Link-4, Link-10, Link-11, JTIDS(Joint Tactical Information Distribution System), Link-22 以及 IFDL(Inter/Intra-Flight Data Link)等,其中 JTIDS 和 IFDL 具有实时测距和通信功能. 美国主战机型全部配备有机载数据链设备. 国内数据链的研究工作起步较晚,但发展很快,西安导航研究所等诸多院所都对数据链进行了研究. 2005 年中俄联合军演中,我军首次对外公开了天上、水面和水下的数据链系统.

2.2 测距方案

机群到指定空域集结之后,根据飞机的时间系统,机群的数据链在某个指定的时刻开机,开始测距. 无线电测距常用的有 3 种方式:单程测距法、双向双程测距法和双向单程测距法. 单程测距法需要昂贵的高精度晶振,双向双程测距设备复杂,且难以进行多机同时测距,因此协同定位系统采用双向单程测距法,原理如下.

节点 i 配备的数据链设备(下面称为设备 i)发射单程测距信号,同时接收其他设备的单程测距信号,以设备 i 和 j 之间的相互测距为例,设 Δt_{ij} 为设备 i 和 j 的时钟之间的时间不同步值,t_{ij} 为设备 i 和 j 之间的无线电信号传播时间,T_1 为设备 i 测得的信号传播时间,T_2 为设备 j 测得的信号传播时间,则有

$$T_1 = t_{ij} + \Delta t_{ij} \tag{2}$$

$$T_2 = t_{ij} - \Delta t_{ij} \tag{3}$$

测距过程中,设备 i 和 j 工作机制完全相同,以设备 i 为例,设备 i 测得 T_1,同时接收设备 j 传

输过来 T_2,则由式(2)和式(3)计算可得

$$t_{ij} = (T_1 + T_2)/2 \tag{4}$$

$$\Delta t_{ij} = (T_1 - T_2)/2 \tag{5}$$

t_{ij}乘以光速即可得设备 i 和 j 的测距值. 由此可见,双向单程测距法可以计算出机间距离,同时也可以计算出机载数据链设备时钟之间的时间不同步值,利于多机同时测距.

2.3　协同定位过程中的时间同步问题

机群组网协同定位过程的时间同步问题是:

1) 各节点的机载数据链时钟之间时间同步问题. 机载数据链要实现同步相互测距必须有统一时标,但各机载数据链开机时刻无法做到精确的时间同步,因而它们的时标之间存在时间不同步值. 在双向单程测距方法中,根据式(5)可以计算出时钟之间的时间不同步值. 以某台机载数据链设备时钟为参考基准,调整所有设备时钟即可以实现时间同步;

2) 节点 i 的惯导与机载数据链设备之间的时间同步问题. 因为机载数据链 i 的同步测距时刻不一定是惯导 i 的测量时刻,所以机载数据链设备 i 和惯导 i 之间存在时间不同步值 ΔT_i. ΔT_i 是随机常数,如果采用 100 Hz 输出的惯导系统,则 ΔT_i 在 ±5 ms 以内,假设飞机航速为 280 m/s,则 ΔT_i 造成的距离误差在 ±1.4 m 以内,这个值相对惯导位置误差来说可以忽略,因此在协同定位计算过程中可以认为机载数据链和各惯导系统之间时间同步.

3　机群组网协同定位算法

3.1　机群组网协同定位算法

3.1.1　确定量测多边形各节点的概略坐标

设机群由 n 个节点组成,$\{x_i, y_i, z_i\}$ $(i = 1, 2, \cdots, n)$为节点 i 的实际位置,$\{x_i^{\mathrm{I}}, y_i^{\mathrm{I}}, z_i^{\mathrm{I}}\}$ $(i = 1, 2, \cdots, n)$为惯导 i 的输出位置,$\{x_i^{\mathrm{m0}}, y_i^{\mathrm{m0}}\}$ $(i = 1, 2, \cdots, n)$为测距值确定的节点 i 的概略坐标,在机载数据链中获得 p 个同步测距值.

1) 由节点间的三维测距值计算节点间的概略水平距离. 节点 i 和节点 j 之间的相互测距值 d_{ij}^{m}可以表示为

$$d_{ij}^{\mathrm{m}} = \sqrt{(d_{ij}^{m\,*} - v_{ij}^{*}) + (z_i - z_j)^2} + v_{ij} \tag{6}$$

式中 $d_{ij}^{\mathrm{m}*}$ 为机间水平距离;v_{ij}^{*} 为水平距离误差;v_{ij} 为测距误差,$v_{ij} \sim N(0, \sigma_{\mathrm{r}}^2)$,$\sigma_{\mathrm{r}}^2$ 为测距方差. 因为高度值 z_i^{I} 相对水平位置误差要小的多,所以可用 z_i^{I} 代替 z_i 进行计算,则机间水平距离可以表示为

$$d_{ij}^{\mathrm{m}*} = \sqrt{d_{ij}^{\mathrm{m}} - (z_i^{\mathrm{I}} - z_i^{\mathrm{I}})^2} + v_{ij}^{*} \tag{7}$$

2) 任意给定一个起算点和起算方向,根据水平距离计算量测多边形各节点概略坐标.

令$\{x_1^{\mathrm{m0}}, y_1^{\mathrm{m0}}\} = \{x_1^{\mathrm{I}}, y_1^{\mathrm{I}}\}$,以$\{x_1^{\mathrm{m0}}, y_1^{\mathrm{m0}}\}$为起算点,以$\{x_1^{\mathrm{m0}}, y_1^{\mathrm{m0}}\}$指向$\{x_2^{\mathrm{I}}, y_2^{\mathrm{I}}\}$的连线方向为起算方向,根据 $d_{i1}^{\mathrm{m}*}$ 和 $d_{i2}^{\mathrm{m}*}$ 计算$\{x_i^{\mathrm{m0}}, y_i^{\mathrm{m0}}\}$ $(i = 2, 3, \cdots, n)$. 可看出,协同定位最少需要 $2n - 3$ 个测距值.

在确定节点 $i(i = 3, 4, \cdots, n)$的概略坐标的过程中,需要确定节点 i 在起算方向的左侧还是右侧,此信息从先验的机群队形知识中获得.

3.1.2　利用间接平差法确定量测多边形

在概略坐标基础上,利用三维边角网间接平差法[6]对测距值进行平差计算,平差后水平位置即为量测多边形各节点准确坐标. 设量测多边形各节点经平差计算后的坐标为$\{x_i^{\mathrm{ml}}, y_i^{\mathrm{ml}}\}$ $(i = 1, 2, \cdots, n)$,各节点概略坐标相对平差后坐标的误差为$\{\Delta x_i^{\mathrm{m}}, \Delta y_i^{\mathrm{m}}\}$,取各节点高度的概略坐标为 z_i^{I},记为 z_i^{m0},其误差为 Δz_i^{m},平差后坐标为 z_i^{ml}.

$\{x_i^{\mathrm{ml}}, y_i^{\mathrm{ml}}, z_i^{\mathrm{ml}}\}$可以表示为

$$\left.\begin{aligned} x_i^{\mathrm{ml}} &= x_i^{\mathrm{m0}} + \Delta x_i^{\mathrm{m}} \\ y_i^{\mathrm{ml}} &= y_i^{\mathrm{m0}} + \Delta y_i^{\mathrm{m}} \\ z_i^{\mathrm{ml}} &= z_i^{\mathrm{m0}} + \Delta z_i^{\mathrm{m}} \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

d_{ij}^{m}还可以表示为

$$d_{ij}^{\mathrm{m}} = \sqrt{(x_i^{\mathrm{ml}} - x_j^{\mathrm{ml}})^2 + (y_i^{\mathrm{ml}} - y_j^{\mathrm{ml}})^2 + (z_i^{\mathrm{ml}} - z_j^{\mathrm{ml}})^2} + v_{ij} \tag{9}$$

将式(8)代入式(9),并将式(9)线性化,写为

$$\boldsymbol{L}^{\mathrm{m}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\Delta} + \boldsymbol{V} \tag{10}$$

式中,$\boldsymbol{\Delta} = [\Delta x_1^{\mathrm{m}}, \Delta y_1^{\mathrm{m}}, \Delta z_1^{\mathrm{m}}, \cdots, \Delta x_n^{\mathrm{m}}, \Delta y_n^{\mathrm{m}}, \Delta z_n^{\mathrm{m}}]$;$\boldsymbol{L}^{m}$ 为 $p \times 1$ 维矩阵;$\boldsymbol{A}$ 为 $P \times 3n$ 维量测矩阵;$\boldsymbol{V}$ 为量测噪声矩阵. 根据广义测量平差原理[6]可得

$$\boldsymbol{\Delta} = \boldsymbol{A}^{+}\boldsymbol{L}^{\mathrm{m}} \tag{11}$$

式中,$\boldsymbol{A}^{+}$为 $\boldsymbol{A}$ 的 Moore-Penrose 逆.

根据 $\boldsymbol{\Delta}$ 求解$\{x_i^{\mathrm{ml}}, y_i^{\mathrm{ml}}\}$:

$$\left.\begin{aligned} x_i^{\mathrm{ml}} &= x_i^{\mathrm{m0}} + \Delta x_i^{\mathrm{m}} \\ y_i^{\mathrm{ml}} &= y_i^{\mathrm{m0}} + \Delta y_i^{\mathrm{m}} \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

3.1.3　几何图形平移旋转法估计惯导位置误差

量测多边形表示机群各节点比较精确的相对位置,其起算点和起算方向是任意给定的,因此,量测多边形不包含各节点绝对位置信息. 要利用量测多边形和惯导多边形来估计惯导位置误差,必须建立基准.

1) 根据测边秩亏自由网基准理论[6],建立基准实质上是建立相对各节点近似坐标的基准,保证自由网中的重心坐标保持不变. 惯导多边形表示各节点近似坐标,保证自由网中的重心坐标保

持不变即是平移量测多边形,使其形心 O_m 与惯导多边形形心 O_c 重合,如图 2,1 ~5 为飞机编号.

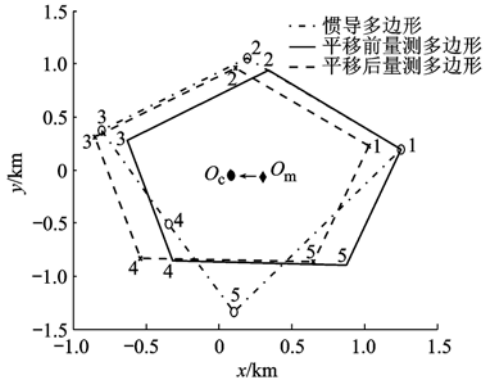

图 2 几何图形平移

2) 旋转量测多边形,使 D 最小,如图 3 所示. D 的表达式为

$$D = \sum_{i=1}^{n}(-y_i^{\mathrm{I}}\Delta\hat{x}_i^{\mathrm{I}} + x_i^{\mathrm{I}}\Delta\hat{y}_i^{\mathrm{I}}) = \sum_{i=1}^{n}[-y_i^{\mathrm{I}}(x_i^{\mathrm{I}} - x_i^{\mathrm{m2}}) + x_i^{\mathrm{I}}(y_i^{\mathrm{I}} - y_i^{\mathrm{m2}})] = \sum_{i=1}^{n}(y_i^{\mathrm{I}}x_i^{\mathrm{m2}} - x_i^{\mathrm{I}}y_i^{\mathrm{m2}}) \quad (13)$$

式中,$\{x_i^{\mathrm{m2}}, y_i^{\mathrm{m2}}\}$ 为平移旋转后量测多边形各节点位置.

3) 计算惯导位置误差 $\{\Delta x_i^{\mathrm{I}}, \Delta y_i^{\mathrm{I}}\}$ 的估计值 $\{\Delta\hat{x}_i^{\mathrm{I}}, \Delta\hat{y}_i^{\mathrm{I}}\}$:

$$\left.\begin{aligned}\Delta\hat{x}_i^{\mathrm{I}} &= x_i^{\mathrm{I}} - x_i^{\mathrm{m2}}\\ \Delta\hat{y}_i^{\mathrm{I}} &= y_i^{\mathrm{I}} - y_i^{\mathrm{m2}}\end{aligned}\right\} \quad (14)$$

3.2 仿真分析

仿真条件设置如下:组网节点数为 5,且各飞机初始位置均匀分布在以坐标原点为中心,以 1 km为半径的圆平面上,机群飞行高度为 7 km,高度误差的标准差为 20 m,机群一直北飞,航速为 280 m/s,航向角 ψ 为 0. 机载数据链输出同一时刻测距值,测距值误差的标准差为 10 m. 惯导 i 的东向和北向位置误差由短时间内位置误差模型生成,如式(15)所示.

$$\left.\begin{aligned}\Delta x_i^{\mathrm{I}}(t) &= a_{x_i}(t_0) + b_{x_i}\sin\omega_s t + c_{x_i}(1-\cos\omega_s t) + d_{x_i}\left(t - \frac{1}{\omega_s}\sin\omega_s t\right) + e_{x_i}S_{y_i}(t)\\ \Delta y_i^{\mathrm{I}}(t) &= a_{y_i}(t_0) + b_{y_i}\sin\omega_s t + c_{y_i}(1-\cos\omega_s t) + d_{y_i}\left(t - \frac{1}{\omega_s}\sin\omega_s t\right) + e_{y_i}S_{x_i}(t)\end{aligned}\right\} \quad (15)$$

式中,$a_{x_i}, b_{x_i}, \cdots, d_{x_i}, e_{x_i}$ 和 $a_{y_i}, b_{y_i}, \cdots, d_{y_i}, e_{y_i}$ 分别为惯导系统位置误差模型中与初始位置误差、初始速度误差、加计零偏、陀螺常值漂移、方位偏角有关的误差系数,$e_{x_i} = -e_{y_i}$;ω_s 为舒拉频率;t_0 为惯导系统开机之后转入导航状态的时刻;t 为距离 t_0 时刻的时间差;S_{x_i} 和 S_{y_i} 分别为东向和北向飞行距离. 假定在 $t_k = 600$ s 开始协同定位计算,$a_{x_i}(t_0) + e_{x_i}S_{y_i}(t_k)$ 和 $a_{y_i}(t_0) - e_{x_i}S_{x_i}(t_k)$ 的标准差为 200 m;b_{x_I} 和 b_{y_i} 的标准差为 50 m/s;c_{x_i} 和 c_{y_i} 标准差为 500 m/s;d_{x_i} 和 d_{y_i} 标准差为 0. 5 m/s,e_{x_i} 标准差为 0. 004 rad. 协同定位的计算周期取为 0. 1 s. 仿真计算流程图如图 4 所示.

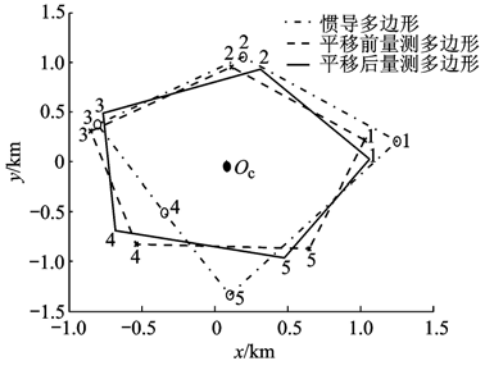

图 3 几何图形旋转

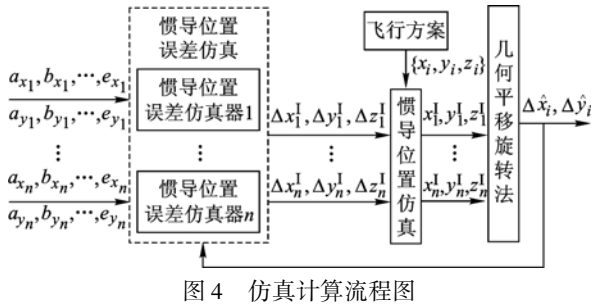

图 4 仿真计算流程图

用修正前和修正后的惯导位置误差的标准差 r 和 r' 评价定位效果,表达式为

$$\left.\begin{aligned}r &= \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}r_i^2}\\ r_i &= \sqrt{(\Delta x_i^{\mathrm{I}})^2 + (\Delta y_i^{\mathrm{I}})^2}\end{aligned}\right\} \quad (16)$$

$$\left.\begin{aligned}r' &= \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta r'^2{}_i}\\ r'_i &= \sqrt{(\Delta\tilde{x}_i^{\mathrm{I}})^2 + (\Delta\tilde{y}_i^{\mathrm{I}})^2}\end{aligned}\right\} \quad (17)$$

式中,$\Delta\tilde{x}_i^{\mathrm{I}}$ 和 $\Delta\tilde{y}_i^{\mathrm{I}}$ 为节点 i 修正后位置误差.

仿真结果如表 1 和图 5,其中表 1 为 t 为 600. 1 s时的机群组网协同定位结果. 图 5 为 t 从 600 s开始,惯导 1 协同定位 15 min 的定位结果.

表 1 协同定位结果 m

惯导	Δx_i^{I}	$\Delta\tilde{x}_i^{\mathrm{I}}$	Δy_i^{I}	$\Delta\tilde{y}_i^{\mathrm{I}}$
1	253.2334	63.2394	198.6745	27.8902
2	-110.311	6.9018	99.3422	-21.7543
3	5.5092	44.3514	-217.9580	-105.4427
4	465.7416	128.2517	82.2188	-104.1442
5	-202.5359	168.8408	-381.4679	-15.6239

从表 1 中可以看出,协同定位算法经过一个周期的计算就可以估算出惯导位置误差,算法有

效地提高了惯导的定位精度,由式(16)和式(17)计算得修正前后惯导位置误差的标准差 r 和 r' 分别为 341.580 4 m,122.007 4 m,惯导精度提高了 2.7997 倍. 进行 300 次仿真,利用蒙特卡罗方法分析表明:5 架飞机进行协同定位时,惯导位置精度提高 2.568 9 倍(置信水平为 0.95,估计误差绝对值小于 0.353 2). 图 5 中,东向和北向位置误差均值 $\Delta\bar{x}^{\mathrm{I}}$,$\Delta\bar{y}^{\mathrm{I}}$ 分别为

$$\Delta\bar{x}^{\mathrm{I}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta x_i^{\mathrm{I}} \tag{18}$$

$$\Delta\bar{y}^{\mathrm{I}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta y_i^{\mathrm{I}} \tag{19}$$

从图 5 可看出,协同定位算法有效延缓了惯导位置误差的发散速度,惯导东向和北向位置修正值分别随东向和北向位置误差均值的变化而变化. 如果惯导系统的输出位置出现同向的误差,例如东向位置误差均为正误差,则东向位置误差均值为正误差,此时协同定位算法无法修正此误差.

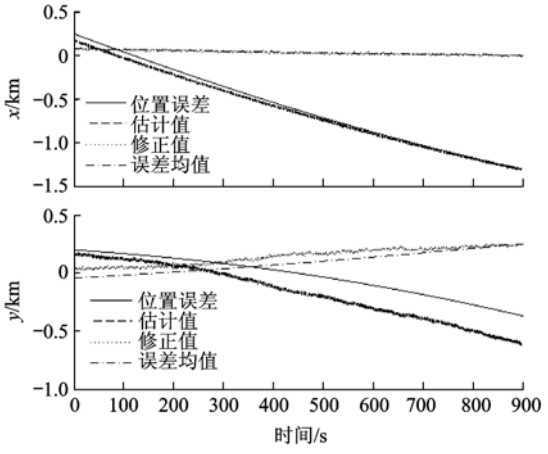

图 5　惯导 1 的协同定位结果(15 min)

4　结　论

1) 几何平移旋转协同定位技术结合导航技术和测量平差理论,从机群“网络”层面出发,解决了当惯导位置误差和机间距离数量级相当或者惯导位置误差大于机间距离时,文献[2,5]中 Kalman 滤波方法无法估计惯导位置误差的问题,前提是需要有机群队形的先验知识;

2) 几何平移旋转协同定位技术可用于长时间估计惯导位置误差,有效延缓了惯导位置误差的发散速度,惯导位置修正值随位置误差均值的变化而变化;

3) 如果 5 架飞机组网定位,测距误差标准差为 10 m,几何平移旋转协同定位技术可以使机群惯导位置精度将提高 2 倍左右;

4) 机载数据链的造价数十万,与升级惯导系统本身提高同样倍数精度所需要的投入相比,数十万的花费相对比较低廉,因此机群组网协同定位技术达到了提高精度和降低成本的双重目标.

参考文献 (References)

[1] Yao Yong, Li Zhi. Research of information dissemination model based on network-centric warfare[C]// Yao Yong. Proceedings 2010 IEEE International Conference on Information Theory and Information Security. Beijing: IEEE Computer Society, 2010: 962 – 965

[2] 谢淑香. 基于相互测距信息的机群组网定位技术[D]. 北京:北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院,2007
Xie Shuxiang. New approach for swarming aircraft positioning via network information[D]. Beijing: School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese)

[3] 蓝伟华,喻蓉. 多机编队协同空战的概念及关键技术[J]. 电光与控制,2005,12(6):12 – 15
Lan Weihua, Yu Rong. Concept and critical techno-logies in co-operative air combat for airplane formation[J]. Electronics Optics & Control, 2005, 12(6): 12 – 15(in Chinese)

[4] 张共愿,程咏梅,程承,等. 基于相对导航的多平台 INS 误差联合修正方法[J]. 航空学报,2011,32(2):271 – 280
Zhang Gongyuan, Cheng Yongmei, Cheng Cheng, et al. A joint correcting method of multi-platform INS error based on relative navigation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(2): 271 – 280(in Chinese)

[5] 冯培德,谢淑香,张京娟. 机群组网定位的一种新途径[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(11):1263 – 1267
Feng Peide, Xie Shuxiang, Zhang Jingjuan. New approach for swarming aircraft positioning via network information[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11): 1263 – 1267(in Chinese)

[6] 崔希璋. 广义测量平差[M]. 武汉:武汉大学出版社,2009: 20 – 190
Cui Xizhang. General Adjustment[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009: 20 – 190(in Chinese)

[7] Edward K L. Air-to-ground targeting UAVs, data links and interoperability (project extender)[J]. Aeronautical Journal, 2004, 108(1088): 493 – 504

[8] 李宏智. 战术数据链的发展与作战应用[J]. 舰船电子工程,2010(4):1 – 5
Li Hongzhi. Development and operational application of tactical data links[J]. Ship Electronic Engineering, 2010(4): 1 – 5(in Chinese)

[9] Abusali P A M, Tapley B D, Schutz B E. Autonomous navigation of global position system satellites using cross-link measurements[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1998, 21(2): 321 – 327

[10] Lin Yiming, Chu Haibin, Qin Zizeng. GNSS autonomous navigation integrity weighted technique base on crosslink[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(5): 49 – 54

[11] Qian Yingjing, Jing Wuxing, Gao Shangsheng. Autonomous navigation method for multi-satellites mission[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(5): 705 – 709

(编　辑:刘登敏)