

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007098

复杂环境下 GNSS/INS/UWB 紧组合的 无人机协同导航算法*

陈红梅¹, 常林江¹, 徐振方¹, 叶文², 吴才章¹

(1. 河南工业大学电气工程学院 郑州 450001; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029)

摘要:针对多无人机系统在复杂环境下卫星信号易受到干扰的问题,提出了一种基于环路和积算法的协同导航方法。根据传感器的特点,设计了基于 GNSS/INS 紧组合的绝对导航和 UWB 辅助的卫星双差紧组合相对导航,然后使用各个平台自身的绝对导航信息和平台间的相对导航信息,构建协同导航滤波器,基于环路和积算法,设计了消息传递规则,减少了平台间的流量,计算任务在各个平台上分布运行,减小了计算压力。最后对不同复杂场景进行了仿真和物理实验,结果表明该方案的协同导航精度明显优于不进行协同导航的结果,且随着可观测信息的增多,该方法导航精度越来越高。

关键词: 协同导航; 环路和积算法; GNSS/INS/UWB 紧组合

中图分类号: TP391.4 TH39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

UAV collaborative navigation algorithm based on tight combination of GNSS/INS/UWB in complex environment

Chen Hongmei¹, Chang Linjiang¹, Xu Zhenfang¹, Ye Wen², Wu Caizhang¹

(1. School of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
2. National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China)

Abstract: The satellite signals of multi-UAV systems are susceptible to interference in complex environments. To address this issue, a cooperative navigation method based on loop sum-product algorithm is proposed. According to sensor's characteristics, the absolute navigation based on the GNSS/INS tight combination and UWB-assisted satellite double-difference tight combined relative navigation are designed. Each platform's absolute navigation information and relative navigation information between platforms are used to construct a collaborative navigation filter. Message transmission rules are designed to reduce the flow between platforms based on loop sum-product algorithm. Calculation tasks are distributed and run on each platform, which reduces calculation pressure. Finally, simulation and UAV experiments are carried out for different complex scenes. Results show that this scheme's cooperative navigation accuracy is significantly better than the result without cooperative navigation. With the increase of observable information, this method's navigation accuracy is getting higher and higher.

Keywords: collaborative navigation; loop sum-product algorithm; GNSS/INS/UWB tightly integrated navigation

0 引言

无人机(unmanned air vehicles, UAV)技术受到军事、民用等各个行业的关注^[1-2],其中多无人机协同系统已成为重点研究方向之一。多无人机协同作业能够完成单体

无人机无法完成的复杂任务^[3-4],同时效率更高,可靠性更好,具有广阔的应用前景。为保证无人机协同作业效果,以及路径规划和控制精度,必须获得准确的导航信息。

低成本或消费级的无人机一般使用全球导航卫星系统(global navigation satellite systems, GNSS)和惯性导航系统(inertial navigation systems, INS)的集成系统^[5-6],但

收稿日期:2020-11-10 Received Date: 2020-11-10

* 基金项目:国家自然科学基金(U1804161,61901431)、中国博士后科学基金(2020T130625)、河南省科学技术协会基金(HNKJZK-2021-23C)、河南工业大学创新基金支持计划(2020ZKCJ31)、河南工业大学青年骨干教师培育计划项目资助

其定位精度无法达到近距离编队飞行及作业的要求。为得到更高精度的导航信息,一般结合地面控制站来进行作业,但地面控制站设立成本高,不能大规模覆盖工作区域。协同导航技术起步于自主水下航行器(autonomous undersea vehicle, AUV)领域^[7-8],由于 UAV 与 AUV 有许多相似之处,协同导航技术也逐渐应用于无人机领域^[9-10]。通过协同网络中的通讯链路,充分利用网络中所有传感器的观测数据,结合平台间的空间关系,可进一步提高导航精度。

无人机可以工作在城市、田野、森林中,场景复杂多变,可能会存在卫星可见数不足的情况,从而导致卫星接收机无法正常工作,Sivoneri 等^[11]提出了一种 GNSS 挑战环境下的协同导航算法,卫星信号受干扰的平台利用地面上未受干扰的平台进行导航,但无法摆脱地面控制站的束缚。Xiong 等^[12]提出了一种基于消息传递的协同导航算法,但其更依赖于主从式架构,一旦长机的状态受到影响,与其进行协同导航的所有平台精度都会受到影响;Savic 等^[13]使用非参数变量置信传播算法(nonparametric belief propagation, NBP),可实现对等平台间的协同定位,但由于使用粒子逼近状态的后验概率密度分布,计算量大,更适用于数据后处理,无法实时应用;Hlinka 等^[14]提出了一种西格玛点置信传播(Sigma point belief propagation, SPBP)算法,利用采样点表征状态,可快速进行协同导航,然而该方法更适用于室内导航,且未考虑到卫星等量测信息的使用,当进行协同导航的无人机数量较多时,仍然存在计算负荷大的问题。

针对上述情况,本文提出了一种复杂环境下的协同导航方案,基于 GNSS/INS 绝对导航和 UWB/卫星双差相对导航,利用环路和积算法在平台间进行协同,各平台无主从区别,既可脱离地面控制站通讯范围,又可在部分卫星信号丢失的情况下正常运行。通过设计多平台总体导航方案,突破多无人机/地面站协同导航技术、系统同步感知与数据融合方法等关键技术,最终实现多无人机协同平台集成与实验验证。

1 问题描述

本文无人机协同导航系统如图 1 所示,所有无人机及其地面控制站形成无线网络,无人机携带有惯性元件、卫星接收机和 UWB 模块,地面控制站装备有卫星接收机和 UWB 模块,网络内所有节点可向通信范围内邻平台发送信息,具有 UWB 模块的平台在量测范围内的任意两平台可互相测距。

在作业过程中,无人机可能会飞出地面控制站的通讯范围,卫星信号也可能受到遮挡导致卫星可见数小于 4 而无法正常工作。

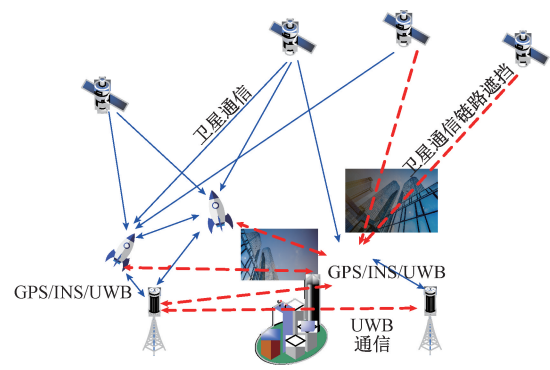


图 1 无人机协同导航系统

Fig. 1 UAV collaborative navigation system

本文提出协同导航主要由 3 阶段构成,如图 2 所示,第 1 阶段,每架无人机通过 GNSS 和 INS 的紧耦合来进行绝对导航,获取自身的导航信息 x_{abs}^i , i 为平台编号;第 2 阶段,每架无人机利用 UWB 元件和卫星差分,以及周围平台的第 1 阶段的绝对导航信息进行相对导航,获取与周围平台及地面控制站间的相对运动关系 $x_{rel}^{i,j}$, $x_{rel}^{i,j}$ 为平台 i 与平台 j 间的相对导航信息;第 3 阶段,平台间通过通信链路信息交互,构造协同滤波器,利用环路和积算法,进一步优化导航结果,得出协同导航结果 x_{coo}^i 。其中,第 1 阶段为第 2 阶段的基础,前两个阶段为第 3 个阶段的基础,本文的主要创新点为第 3 阶段,利用环路和积算法将绝对导航与相对导航融合起来。以下将分 3 部分将分别介绍 3 个阶段的详细过程。

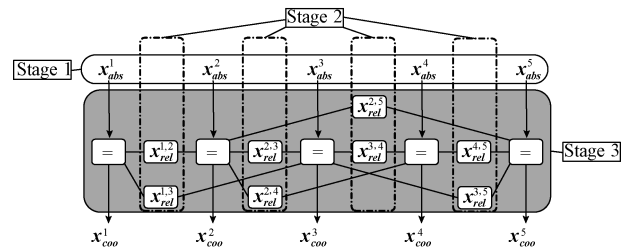


图 2 协同导航框架

Fig. 2 Architecture for UAV collaborative navigation

2 GNSS/INS 绝对导航

本方案的绝对导航采用了 GNSS 和 INS 组合导航,其中 INS 短时间内精度高,其误差来源主要是惯性元件的漂移误差,由于积分导致误差累积,随时间增长误差会越来越大;GNSS 精度略低,但可长时间工作,其提供的导航误差不随时间累积。二者特性互补,通过组合导航可充分发挥它们的优点^[15]。

常规的组网导航使用松耦合,要求 GNSS 一直处于定位状态,即卫星可见数大于等于 4 颗,在城市峡谷等环境下,卫星信号易受遮挡,使得 GNSS 无法输出导航信息,因此这里采用紧耦合组网导航,直接采用卫星接收机的量测进行组网导航,可克服卫星可见数小于 4 颗的情况。

紧耦合组网导航在惯性导航的基础上,利用卫星接收机接收到的伪距和伪距率信息,估计出惯性导航的误差,并反馈修正惯性导航,重置采样周期内由于积分积累的惯性导航误差。状态值采用误差模型,主要导航误差包括 INS 元件误差和 GNSS 元件误差:

$$\mathbf{X}^i = [\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U, \delta v_E, \delta v_N, \delta v_U, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \delta t_u, \delta t_{ru}]^T_{17 \times 1} \quad (1)$$

式中: $\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U$ 为东北天 3 个方向的平台误差角; $\delta v_E, \delta v_N, \delta v_U$ 和 $\delta L, \delta \lambda, \delta h$ 为 3 个方向的速度和位置误差; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 和 $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ 陀螺仪和加速度计在三个方向的偏置误差; δt_u 为时钟误差等效的测距误差; δt_{ru} 为时钟频率误差等效的距离变化率。

量测量为卫星接收机测得的 4 颗卫星的伪距和伪距率,量测方程可写作:

$$\mathbf{Z}_{abs}^i = [\rho^1, \rho^2, \dots, \dot{\rho}^1, \dot{\rho}^2, \dots]^T \quad (2)$$

其中 ρ^j 为伪距测量,具体展开如下:

$$\rho^j = \sqrt{(x_s^j - x)^2 + (y_s^j - y)^2 + (z_s^j - z)^2} + \delta t_u + v_\rho \quad (3)$$

式中: x_s^j, y_s^j, z_s^j 为卫星 j 在地心地球固连 (Earth-centered earth-fixed, ECEF) 坐标系下各方向位置,下角标 s 代表卫星,上角标 j 为卫星编号, x, y, z 为平台在 ECEF 坐标系下各方向位置, v_ρ 为伪距测量噪声。

$\dot{\rho}^j$ 为伪距率测量,具体展开如下:

$$\dot{\rho}^j = \frac{(x - x_s^j)(\dot{x} - \dot{x}_s^j) + (y - y_s^j)(\dot{y} - \dot{y}_s^j) + (z - z_s^j)(\dot{z} - \dot{z}_s^j)}{\sqrt{(x_s^j - x)^2 + (y_s^j - y)^2 + (z_s^j - z)^2}} + \delta t_{ru} + v_{\dot{\rho}} \quad (4)$$

式中: $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ 为平台在 ECEF 坐标系下各方向速度; $\dot{x}_s^j, \dot{y}_s^j, \dot{z}_s^j$ 为卫星在 ECEF 坐标系下各方向速度; $v_{\dot{\rho}}$ 为伪距率测量噪声。

有关状态传递方程的内容已有很多文献提及,详细可参见文献[16]。在建立误差模型后,可采用 UKF^[17] 进行解算,详细过程不再赘述。

3 GPS/UWB 相对导航

本方案的相对导航分两种,一种是平台间进行,一种是平台相对于地面控制站。平台间的相对导航是通过两平台交互信息成为一组,如图 3 所示,主要利用短基线

内卫星做双差可消除卫星信号公共误差的特性,辅以 UWB 在平台间的测距测速,以及绝对导航的结果,获得两平台的相对运动状态,即导航信息的差值,下面以平台 i 对平台 j 的相对导航进行说明。

状态变量由 ECEF 坐标系下两平台的相对运动状态构成,首先定义状态变量 $\mathbf{X}$ 为:

$$\mathbf{X}^{i,j} = [\mathbf{r}_{i,j}, \dot{\mathbf{r}}_{i,j}, \ddot{\mathbf{r}}_{i,j}, \delta \mathbf{r}_{i,j}]^T_{12 \times 1} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{r}_{i,j} = [\mathbf{r}_x^{i,j}, \mathbf{r}_y^{i,j}, \mathbf{r}_z^{i,j}]$ 为平台相对位置矢量, $\dot{\mathbf{r}}_{i,j} = [\dot{\mathbf{r}}_x^{i,j}, \dot{\mathbf{r}}_y^{i,j}, \dot{\mathbf{r}}_z^{i,j}]$ 为相对速度矢量, $\ddot{\mathbf{r}}_{i,j} = [\ddot{\mathbf{r}}_x^{i,j}, \ddot{\mathbf{r}}_y^{i,j}, \ddot{\mathbf{r}}_z^{i,j}]$ 为相对加速度矢量, $\delta \mathbf{r}_{i,j} = [\delta \mathbf{r}_x^{i,j}, \delta \mathbf{r}_y^{i,j}, \delta \mathbf{r}_z^{i,j}]$ 为单平台定位误差导致的相对定位误差的补偿量。

对应的状态传递微分方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}_{i,j} \\ \ddot{\mathbf{r}}_{i,j} \\ \dots \\ \mathbf{r}_{i,j} \\ \delta \dot{\mathbf{r}}_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{i,j} \\ \dot{\mathbf{r}}_{i,j} \\ \ddot{\mathbf{r}}_{i,j} \\ \delta \mathbf{r}_{i,j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_p \\ \mathbf{w}_v \\ \mathbf{w}_a \\ \mathbf{w}_{\delta p} \end{bmatrix} \quad (6)$$

量测由 3 部分组成,第 1 部分为卫星双差,以卫星 S_1, S_2 为例,无人机 i 接收到的卫星 S_1 的伪距可表示成如下形式:

$$\rho_i^{S_1} = \mathbf{r}_i^{S_1} + c(\delta t_{r,i} - \delta t_{s_1}) + \varepsilon_{i,iono}^{S_1} + \varepsilon_{i,trop}^{S_1} + \varepsilon_{eph}^{S_1} + \mathbf{n}_i^{S_1} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{r}_i^{S_1}$ 为卫星 S_1 与无人机 i 的真实距离, $\delta t_{r,i}$ 为接收机时钟误差, δt_{s_1} 为卫星时钟误差, $\varepsilon_{i,iono}^{S_1}$ 为电离层误差, $\varepsilon_{i,trop}^{S_1}$ 对流层误差, $\varepsilon_{eph}^{S_1}$ 为卫星星历误差, $\mathbf{n}_i^{S_1}$ 为接收机处理噪声。由以上可知,卫星误差可分 3 类,分别是卫星时钟误差、传播误差和接收机误差。同理可得无人机 j 接收到的卫星 S_1 的伪距:

$$\rho_j^{S_1} = \mathbf{r}_j^{S_1} + c(\delta t_{r,j} - \delta t_{s_1}) + \varepsilon_{j,iono}^{S_1} + \varepsilon_{j,trop}^{S_1} + \varepsilon_{eph}^{S_1} + \mathbf{n}_j^{S_1} \quad (8)$$

无人机 i 和 j 接收到的卫星星历误差相同,且在短基线环境内,同一卫星的卫星信号到达不同接收机的信号传播途径大致相同,即 $\varepsilon_{i,iono}^{S_1} + \varepsilon_{i,trop}^{S_1} = \varepsilon_{j,iono}^{S_1} + \varepsilon_{j,trop}^{S_1}$, 可通过差分法进行消除传播误差和卫星星历误差,得单差表达式:

$$\nabla \rho_{BA}^{S_1} = \rho_A^{S_1} - \rho_B^{S_1} = (\mathbf{r}_A^{S_1} - \mathbf{r}_B^{S_1}) + c(\delta t_{r,j} - \delta t_{r,i}) + \mathbf{n}_{ij}^{S_1} \quad (9)$$

由于无人机都是近距离伴飞,基线长度远小于卫星高度,卫星 S_1 到无人机 AB 的方向余弦向量差值很小,则有:

$$\mathbf{r}_i^{S_1} - \mathbf{r}_j^{S_1} \approx \mathbf{e}^{S_1} \mathbf{r}_{i,j} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{e}^{S_1}$ 为卫星 S_1 到两台无人机连线中点的单位向量。

有了如上假设,卫星 S_1 的单差就可化简成如下形式:

$$\nabla \rho_{i,j}^{s_1} = \rho_i^{s_1} - \rho_j^{s_1} = \mathbf{e}^{s_1} \mathbf{r}_{i,j} + c(\delta t_{r,j} - \delta t_{r,i}) + \mathbf{n}_{i,j}^{s_1} \quad (11)$$

同理,卫星 S_2 的单差为:

$$\nabla \rho_{i,j}^{s_2} = \rho_i^{s_2} - \rho_j^{s_2} = \mathbf{e}^{s_2} \mathbf{r}_{i,j} + c(\delta t_{r,j} - \delta t_{r,i}) + \mathbf{n}_{i,j}^{s_2} \quad (12)$$

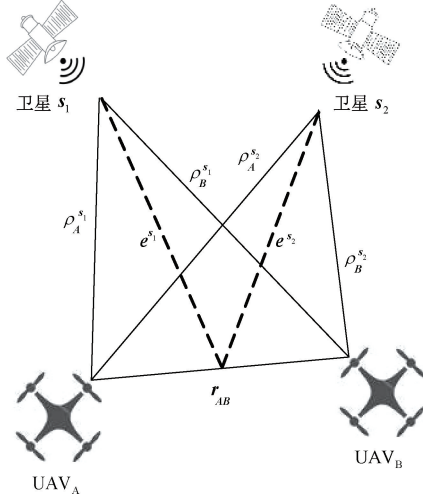


图 3 伪距双差示意图

Fig. 3 Sketch diagram for pseudorange double difference

可以观察到, S_1, S_2 的单差中都有 $c(\delta t_{r,j} - \delta t_{r,i})$ 这一项,将二者再次差分,可消去接收机误差,得双差表达式:

$$\Delta \nabla \rho_{i,j}^{s_1 s_2} = \nabla \rho_{i,j}^{s_2} - \nabla \rho_{i,j}^{s_1} = (\mathbf{e}^{s_2} - \mathbf{e}^{s_1}) \mathbf{r}_{i,j} + \mathbf{n}_{i,j}^{s_1 s_2} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{n}_{i,j}^{s_1 s_2}$ 为计算伪距双差中存在的噪声。

为满足相对速度估计,同理可得伪距率双差:

$$\Delta \nabla \dot{\rho}_{i,j}^{s_1 s_2} = (\mathbf{e}^{s_1} - \mathbf{e}^{s_2}) \dot{\mathbf{r}}_{i,j} + (\dot{\mathbf{e}}^{s_1} - \dot{\mathbf{e}}^{s_2}) \mathbf{r}_{i,j} + \mathbf{n}_{i,j}^{s_1 s_2} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{n}_{i,j}^{s_1 s_2}$ 为计算双差变化率中存在的噪声。

量测的第 2 部分为 UWB 测距测速,卫星可见数不足时,卫星双差的组数会相应的减少,导致可观性变低,而由于空中飞行场景开阔,平台间无遮挡,UWB 可稳定工作,所以加入 UWB 进行辅助。

UWB 测得的距离为平台 i 和 j 的直线相对距离,为标量,其与状态量的关系如下:

$$\mathbf{r}_{UWB} = \|\mathbf{r}_{i,j}\| + \mathbf{n}_{p_uwb} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{n}_{p_uwb}$ 为 UWB 测距噪声。

由 UWB 所测距离差分可得相对速度,其与状态量的关系如下:

$$\dot{\mathbf{r}}_{UWB} = \frac{\mathbf{r}_{i,j} \cdot \dot{\mathbf{r}}_{i,j}}{\|\mathbf{r}_{i,j}\|} + \mathbf{n}_{v_uwb} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{n}_{v_uwb}$ 为 UWB 测速噪声。

量测的第 3 部分,为绝对导航作差,这部分由平台自身绝对导航解算出的位置速度直接作差分所得,其与相

对导航状态值的关系如下:

$$\Delta \mathbf{abs}_{i,j} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{abs,ecef}^i - \mathbf{p}_{abs,ecef}^j \\ \mathbf{v}_{abs,ecef}^i - \mathbf{v}_{abs,ecef}^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{i,j} + \delta \mathbf{r}_{i,j} + \mathbf{n}_{p_abs} \\ \mathbf{r}_{i,j} + \mathbf{n}_{v_abs} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{p}_{abs,ecef}^i, \mathbf{v}_{abs,ecef}^i$ 为 i 平台绝对导航解算所得 ECEF 坐标系下的位置速度, $\mathbf{n}_{p_abs}, \mathbf{n}_{v_abs}$ 为单平台绝对导航误差所引起的相对定位误差。

综上可得相对导航的量测值为:

$$\mathbf{z}^{i,j} = [\Delta \nabla \rho_{i,j}^{s_1 s_2} \cdots \Delta \nabla \rho_{i,j}^{s_1 s_2} \cdots \mathbf{r}_{UWB}, \dot{\mathbf{r}}_{UWB}, \Delta \mathbf{abs}_{i,j}^T]^T \quad (18)$$

同理,可得到平台与地面控制站的相对导航量测量,区别仅在于量测的第 3 部分用绝对导航作差,其中,平台的速度和位置采用的是绝对导航解算值,地面控制站的坐标和速度都是已知量。构建完状态方程和量测方程后,采用 UKF 进行解算,详细过程不再赘述。

4 基于消息传递的环路和积协同导航

通过第 1 阶段和第 2 阶段获得的信息包括:1) 绝对导航 $\mathbf{P}_{abs} = \{\mathbf{p}(\mathbf{x}_{abs}^i), i \in \mathbf{R}\}$, $\mathbf{R}$ 为系统内的平台编号合集;2) 平台间的相对导航 $\mathbf{P}_{rel} = \{\mathbf{p}(\mathbf{x}_{rel}^{i,j}), i \in \mathbf{R}, j \in \mathbf{N}_i\}$, $\mathbf{N}_i$ 为与平台 i 有量测关系的平台编号合集;3) 平台相对于地面控制站的相对导航 $\mathbf{P}_{rel_N} = \{\mathbf{p}(\mathbf{x}_{rel_N}^{i,k}), i \in \mathbf{R}, k \in \mathbf{M}_i\}$, $\mathbf{M}_i$ 为与平台 i 有通信链路的地面控制站编号合集。

若采用传统的集中滤波器解算 $\mathbf{P}_{coo} = \{\mathbf{p}(\mathbf{x}_{coo}^i), i \in \mathbf{R}\}$, 需要通过网络将所有信息汇集到一个节点,由于平台间并不是全部互相联通的,在传输数据上消耗大量的时间。且所有平台状态的联合解算需要极大的计算力支撑,显然这在有实时性要求的多无人机系统中是不可能实现的。因此需要利用消息传递算法^[18],通过环路和积算法的规划信息传递规则和信息解算方法,将网络中的流量减少到最小,可将计算任务分散到各个平台。

消息传递(置信传播)有两种方式,其中第 1 种如图 4 中顺序传递所示,消息按某个方向单向传递,第 1 个节点发送消息给第二个节点,第 2 个节点在收到消息后进行计算,计算完毕后传递给第 3 个节点,以此类推直至与整个网络交互完毕;第 2 种如图 4 中交互传递所示,每个节点先发送信息给周围节点,然后每个节点接收邻节点发送来的消息,节点在收到信息后进行计算,再将计算出的消息传递给周围节点进行下一轮计算,每经过一轮计算,节点收到的消息都会增多。当网络中有大量节点时,若采用第 1 种方式,将消息传递遍整个网络需要每个节点依次计算一次消息,这些时间并不重叠,会浪费大量

的时间;且协同导航的节点间互相连接,组网方式随节点运动而变化,没有规律可循,再加上因子图为多个环形叠加,无法确定消息传递的起点和终点,更无法确定统一的消息传递方向,因此本文采用第二种环路和积消息传递方式。

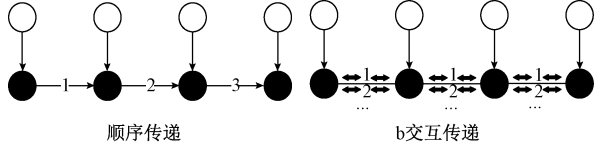


图 4 消息传递方式

Fig. 4 Message schedule for belief propagation

信息传递中,每个平台向友邻平台发送的信息包括:惯导解算的结果,绝对导航估的状态及方差;为了减少网络中的流量,只在网络中传递与位置速度直接相关的状态量,因此定义 $\mathbf{x}_{abs}^i$:

$$\mathbf{x}_{abs}^i = [\delta L^i, \delta \lambda^i, \delta h^i, \delta v_E^i, \delta v_N^i, \delta v_U^i]^T \quad (19)$$

为了减小运算的维度,加快解算的速度,在解算过程中只解算与位置速度直接相关的量,因此: $\mathbf{x}_{rel}^{i,j} \triangleq [\mathbf{r}_{i,j}, \dot{\mathbf{r}}_{i,j}]^T$, $\mathbf{x}_{rel_N}^{i,k} \triangleq [\mathbf{r}_{i,k}, \dot{\mathbf{r}}_{i,k}]^T$ 。

第 1 次信息传递后,平台 i 交互信息包含:自身绝对导航的估出值 $\mathbf{x}_{abs}^i$; 相对导航的估出值 $\{\mathbf{x}_{rel}^{i,j}, j \in N_i\}$; $\{\mathbf{x}_{rel_N}^{i,k}, k \in M_i\}$; 以及邻平台的绝对导航信息 $\{\mathbf{x}_{abs}^j, j \in N_i\}$ 。在解算 i 平台的状态时,可将绝对导航信息看作对应的先验信息,将相对导航信息看作对应的后验信息,就可将求解导航信息转化成求解相应条件下的后验概率密度函数:

$$p(\mathbf{x}_{coo}^i) \propto p(\mathbf{x}_{abs}^i) \prod_{j \in N_i} p(\mathbf{x}_{rel}^{i,j} | \mathbf{x}_{abs}^i, \mathbf{x}_{abs}^j) \prod_{k \in M_i} p(\mathbf{x}_{rel_N}^{i,k} | \mathbf{x}_{abs}^i) \quad (20)$$

式中: $p(\mathbf{x}_{rel}^{i,j} | \mathbf{x}_{abs}^i, \mathbf{x}_{abs}^j) p(\mathbf{x}_{rel_N}^{i,k} | \mathbf{x}_{abs}^i)$ 为似然函数,可由相对导航和绝对导航的关系得出,即相应的量测方程 $\mathbf{h}(\mathbf{x}_{abs}^i, \mathbf{x}_{abs}^j)$ 和 $\mathbf{g}_k(\mathbf{x}_{abs}^i)$, 具体展开如下:

$$\mathbf{x}_{rel}^{i,j} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_{abs}^i, \mathbf{x}_{abs}^j) = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{ecef}^i - \mathbf{p}_{ecef}^j \\ \mathbf{v}_{ecef}^i - \mathbf{v}_{ecef}^j \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{x}_{rel_N}^{i,k} = \mathbf{g}_k(\mathbf{x}_{abs}^i) = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{ecef}^i - \mathbf{p}_{ecef}^k \\ \mathbf{v}_{ecef}^i - \mathbf{v}_{ecef}^k \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中: $\mathbf{p}_{ecef}, \mathbf{v}_{ecef}$ 为 ECEF 坐标系下的位置和速度,由 $L, \lambda, h, v_E, v_N, v_U$ 和 $\delta L, \delta \lambda, \delta h, \delta v_E, \delta v_N, \delta v_U$ 转化而来。

环路和积算法将所有状态扩维 $\bar{\mathbf{x}}^i = \{\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j, j \in N_i\}$, 再联立所有相关量测 $\mathbf{z}^i = \{\mathbf{x}_{rel}^{i,j}, \mathbf{x}_{rel_N}^{i,k}, j \in N_i, k \in M_i\}$; 就可利用贝叶斯公式计算出有关于平台 i 的联合状态为:

$$p(\bar{\mathbf{x}}^i) = \frac{p(\bar{\mathbf{x}}^i) p(\mathbf{z}^i | \bar{\mathbf{x}}^i)}{p(\mathbf{z}^i)} \quad (23)$$

式中: $p(\bar{\mathbf{x}}^i)$ 为先验概率,由所有与平台 i 相关的平台(包括自身)的绝对导航的概率密度函数决定; $p(\mathbf{z}^i)$ 为量测的概率密度函数,由相对导航的概率密度函数决定; $p(\mathbf{z}^i | \bar{\mathbf{x}}^i)$ 为似然函数,由联合状态 $\bar{\mathbf{x}}^i$ 和联合量测 $\mathbf{z}^i$ 的关系得出。

在求出联立状态 $\bar{\mathbf{x}}^i$ 后,进行第 2 次消息传递,用估计值代替第 1 次信息传递时的对应值。

综合上述的消息传递算法,可得协同导航的流程图如图 5 所示,具体步骤如下:

1) 根据所有信息构造协同滤波器

首先构造协同滤波器的初始状态量:

$$\bar{\mathbf{x}}^i = ((\mathbf{x}_{abs}^i)^T (\mathbf{x}_{abs}^{j_1})^T (\mathbf{x}_{abs}^{j_2})^T \cdots (\mathbf{x}_{abs}^{j_m})^T)^T, j \in N_i \quad (24)$$

$$\bar{\mathbf{P}}^i = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{abs}^i & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_{abs}^{j_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{P}_{abs}^{j_m} \end{bmatrix}, j \in N_i \quad (25)$$

式中: $\bar{\mathbf{x}}^i$ 为构造的状态向量初值; $\bar{\mathbf{P}}^i$ 为状态协方差初值,上角标 i, j 代表平台编号; N_i 为与平台 i 有量测关系的编号合集,共 m 个。

构造协同滤波器的量测:

$$\mathbf{Z}^i = ((\mathbf{x}_{rel}^{i,j_1})^T \cdots (\mathbf{x}_{rel}^{i,j_m})^T (\mathbf{x}_{rel_N}^{i,k_1})^T \cdots (\mathbf{x}_{rel_N}^{i,k_m})^T)^T, j \in N_i, k \in M_i \quad (26)$$

构造协同滤波器所需的量测方程 $\mathbf{H}(\bar{\mathbf{x}}^i)$:

$$\mathbf{H}(\bar{\mathbf{x}}^i) \triangleq ((\mathbf{h}(\mathbf{x}_{abs}^i, \mathbf{x}_{abs}^{j_1}))^T \cdots (\mathbf{g}_{k_1}(\mathbf{x}_{abs}^i))^T \cdots)^T, j \in N_i, k \in M_i \quad (27)$$

2) 对进行 $\bar{\mathbf{x}}^i, \bar{\mathbf{P}}^i$ 初始采样

通过对 $\bar{\mathbf{x}}^i, \bar{\mathbf{P}}^i$ 利用 UT 变换求取积分点集 (ξ_l, ω_l^a) , $l = 0: 2n$, 其中, ξ_l 为积分点集, ω_l 为对应的积分权值, n 为协同滤波器的状态 $\bar{\mathbf{x}}^i$ 的维数。

3) 观测方程传播积分点

$$\theta_l^i = \mathbf{H}(\xi_l^i), l = 0: 2n \quad (28)$$

$$\hat{\mathbf{z}}^i = \sum_{l=0}^{2n} \omega_l^m \theta_l^i \quad (29)$$

4) 计算 $\hat{\bar{\mathbf{x}}}^i, \hat{\bar{\mathbf{P}}}^i$

$$\hat{\bar{\mathbf{P}}}^{i,zz} = \sum_{k=0}^{2n} \omega_l^c \theta_l^i (\theta_l^i)^T - \hat{\mathbf{z}}^i (\hat{\mathbf{z}}^i)^T + \mathbf{R}^i \quad (30)$$

$$\hat{\bar{\mathbf{P}}}^{i,xz} = \sum_{l=0}^{2n} \omega_l^c \xi_l^i (\theta_l^i)^T - \hat{\bar{\mathbf{x}}}^i (\hat{\mathbf{z}}^i)^T \quad (31)$$

$$\hat{\mathbf{K}}_k^i = \hat{\bar{\mathbf{P}}}^{i,xz} (\hat{\bar{\mathbf{P}}}^{i,zz})^{-1} \quad (32)$$

$$\hat{\bar{\mathbf{x}}}^i = \hat{\bar{\mathbf{x}}}^i + \hat{\mathbf{K}}_k^i (\mathbf{z}^i - \hat{\mathbf{z}}^i) \quad (33)$$

$$\hat{\mathbf{P}}^i = \bar{\mathbf{P}}^i - \hat{\mathbf{K}}_k \hat{\mathbf{P}}^{zz} (\hat{\mathbf{K}}_k)^T \quad (34)$$

5) 所有平台运算完毕后,进行信息交互

首先各平台将估出的 $\hat{\mathbf{x}}^i, \hat{\mathbf{P}}^i$ 按如下公式进行分割:

$$\hat{\mathbf{x}}^i = ((\hat{\mathbf{x}}_{coo}^i)^T (\hat{\mathbf{x}}_{coo}^{i,j_2})^T \cdots (\hat{\mathbf{x}}_{coo}^{i,j_m})^T)^T, j \in N_i \quad (35)$$

$$\hat{\mathbf{P}}^i = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{P}}_{coo}^i & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \hat{\mathbf{P}}_{coo}^{i,j_1} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \cdots & \hat{\mathbf{P}}_{coo}^{i,j_m} \end{bmatrix}, j \in N_i \quad (36)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_{coo}^i$ 与 $\hat{\mathbf{x}}_{abs}^i$ 维数相同; $\hat{\mathbf{P}}_{coo}^i$ 与 $\hat{\mathbf{P}}_{abs}^i$ 维数相同。

再将各平台将估出的 $\hat{\mathbf{x}}_{coo}^i, \hat{\mathbf{P}}_{coo}^i$ 传递给周围平台,同时交互次数加一。

6) 重新构造状态初值,再次进行滤波,详细如下:

所有平台在接收到周围节点传递来的消息后,按下式进行排列组合,生成新的 $\hat{\mathbf{x}}^i$ 与 $\bar{\mathbf{P}}^i$, 重复第 2) 到第 5), 再次进行滤波;

$$\hat{\mathbf{x}}^i = ((\hat{\mathbf{x}}_{coo}^i)^T (\hat{\mathbf{x}}_{coo}^{i,j_1})^T (\hat{\mathbf{x}}_{coo}^{i,j_2})^T \cdots (\hat{\mathbf{x}}_{coo}^{i,j_m})^T)^T, j \in N_i \quad (37)$$

$$\bar{\mathbf{P}}^i = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{P}}_{coo}^i & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \hat{\mathbf{P}}_{coo}^{i,j_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \hat{\mathbf{P}}_{coo}^{i,j_m} \end{bmatrix}, j \in N_i \quad (38)$$

7) 达到设定的交互次数后,输出估计所有平台状态 $\hat{\mathbf{x}}_{coo}^i$, 完成协同导航。

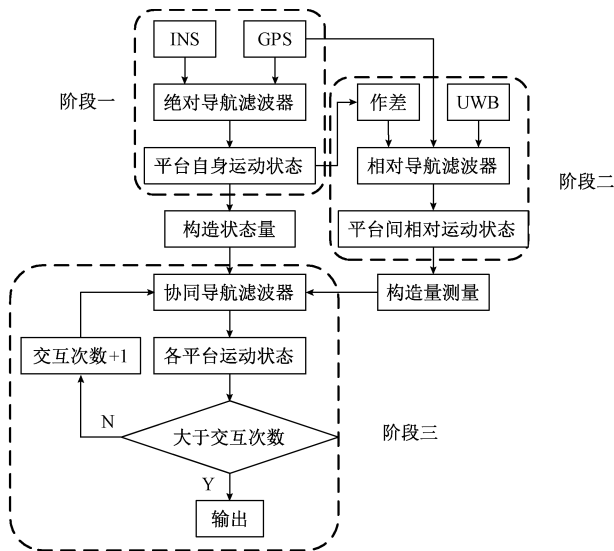


图 5 协同导航流程图

Fig. 5 Flowchart of collaborative navigation

5 实验验证

5.1 仿真实验验证

为验证本文所提方案的有效性,进行了仿真实验验证,采用 5 个平台进行协同导航,设置了以下 6 个场景:

1) 所有平台在地面控制站通信范围外,平台间之间互不通信,无法进行协同导航,即只能进行了第 1 阶段的绝对导航;

2) 所有平台在地面控制站通信范围外,平台间之间互不通信,且 1、2、3 号平台卫星可见数为四,4、5 号平台卫星可见数为三,即只能进行第 1 阶段的绝对导航,且部分平台无法获取足够的卫星量测信息;

3) 所有平台在地面控制站通信范围外,平台之间相互通信,1、2、3 号平台卫星可见数为四,4、5 号平台卫星可见数为三,可以进行 3 个阶段的协同导航,但第 1 阶段部分平台无法获得足够的卫星量测信息,第 2 阶段无法与地面控制站进行相对导航;

4) 所有平台在地面控制站通信范围外,平台之间相互通信,所有平台卫星可见数大于四,可以进行 3 个阶段的协同导航,但第 2 阶段无法与地面控制站进行相对导航;

5) 1、2、3 号平台在地面控制站通信范围内,4、5 号平台在地面控制站通信范围外,平台之间相互通信,所有平台卫星可见数大于四,可以进行 3 个阶段的协同导航,但第 2 阶段只有部分平台可与地面控制站进行相对导航;

6) 所有平台在地面控制站通信范围内,平台之间相互通信,所有平台卫星可见数大于四,可以进行 3 个阶段的协同导航,且没有任何环节丢失。

5 个平台所携带传感器参数一致,传感器参数如表 1 所示。

表 1 传感器参数配置表

Table 1 Sensor parameter configuration

陀螺仪	常漂: $0.1^\circ/\text{h}$, 随机游走 $0.01^\circ/\sqrt{\text{h}}$
加速度计	常漂: $100 \mu\text{g}$, 随机游走 $5 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
卫星	伪距误差 3 m, 伪距率误差 0.03 m/s
UWB	测距误差 0.15 m, 测速误差 0.01 m/s

统计了 5 个平台的 RMSE 误差数据的均值,图 6~11 为仿真结果的相关 RMSE 曲线图,通过场景一二三的对比较,可以观察到,在只进行绝对导航的情况下,卫星可见数不足极大的减小了导航精度,但同样在卫星可见数不足的情况下,场景三中平台间通过协同导航,可达到卫星可见数大于 4 的场景一的精度;通过场景一四五六的对比较,可以观察到,同样在卫星可见数大于四的情况下,进

行协同导航的场景四五六下的精度都高于不进行协同的场景一下的精度,且随着地面控制站的介入,无人机群的整体误差在逐步减小。为进一步观察,图12~14给出场景四五六下各个平台的RMSE统计。

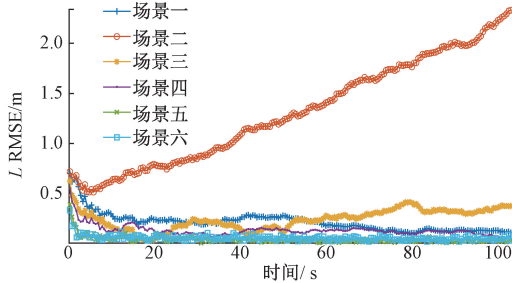


图6 纬度位置误差

Fig. 6 Latitude position error curves

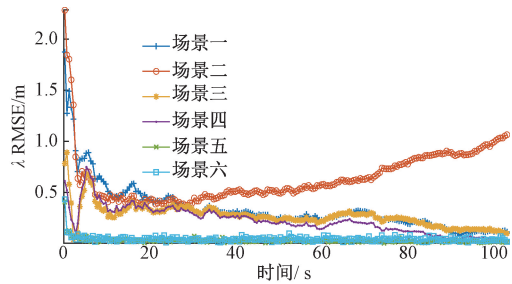


图7 经度位置误差

Fig. 7 Longitude position error curves

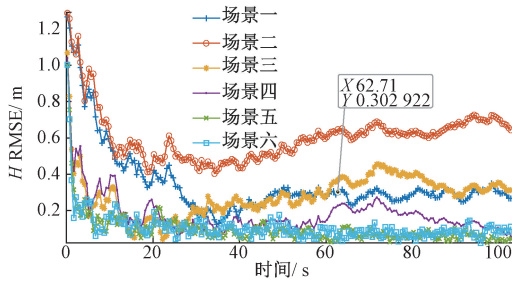


图8 高度位置误差

Fig. 8 Height position error curves

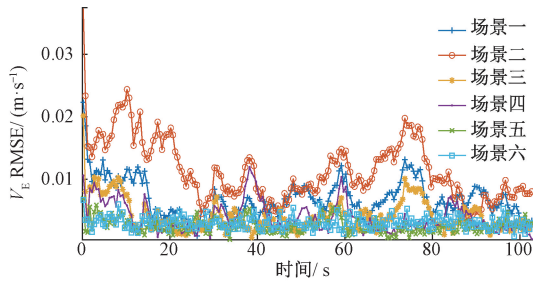


图9 东向速度误差

Fig. 9 East speed error curves

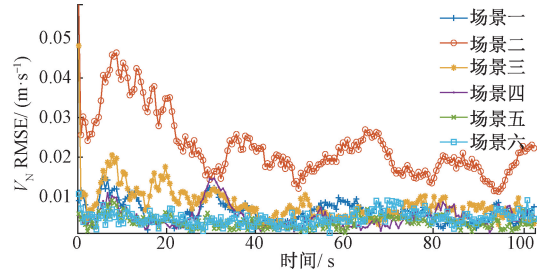


图10 北向速度误差

Fig. 10 North speed error curves

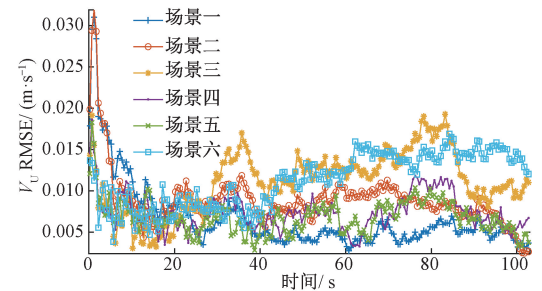


图11 天向速度误差

Fig. 11 Up-direction speed error curves

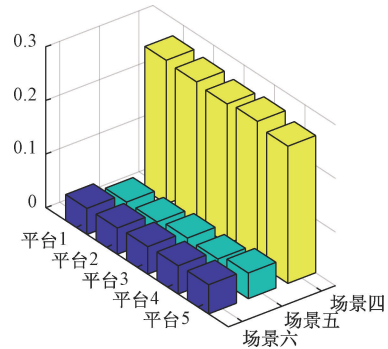


图12 北向位置误差直方图

Fig. 12 Histogram of north position error

从图12~14可以看出,场景五与场景四相比,平台一三二的误差减小了,这是因为场景五中平台一二三在地面控制站通信范围内,但平台四五不在地面控制站通信范围内,它们的误差也得到了大幅降低,达到了场景六的水平。说明通过信息传递,平台四五借由平台一二三的协同作用,有效的利用网络中所有传感器的量测信息,结合平台间的空间关系,进一步提高了导航精度。

5.2 跑车实验验证

为进一步验证本文所提算法,搭建硬件平台进行了实验,由于条件有限,采用地面跑车实验。实验设备采用IMU芯片型号为ICM20602, UWB模块型号为DWM1000。实验模块实物如图15所示。由于UWB功

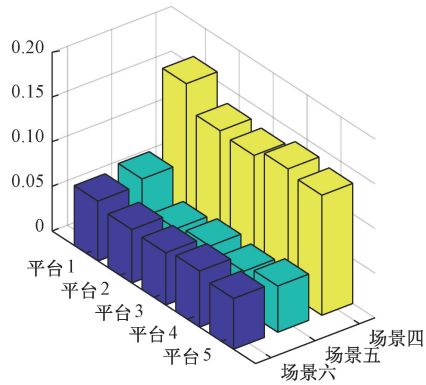


图 13 东向位置误差直方图

Fig. 13 Histogram of east position error

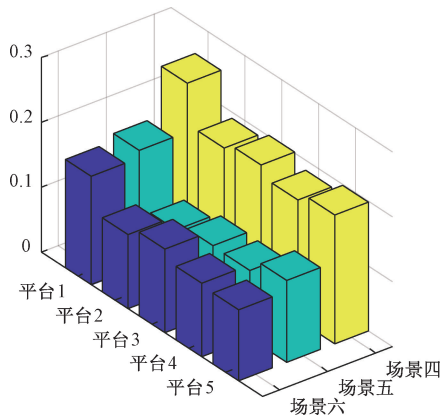


图 14 天向位置误差直方图

Fig. 14 Histogram of up-direction position error

率所限,最多可进行3个模块协同,本实验在3个协同平台上进行了验证。图16~18是每个协同平台用导航模块。



图 15 实验平台用模块

Fig. 15 Experiment equipment

实验过程中3个平台分别搭载精度相同的导航模块,在地面并行运行相同轨迹,由于条件所限没有采用地面基站,依次采用本文的第1阶段的GNSS和INS紧组合导航、第2阶段的UWB辅助的卫星双差紧组合相对导航

和本文所提协同导航算法进行解算,解算出轨迹如图16~18所示。

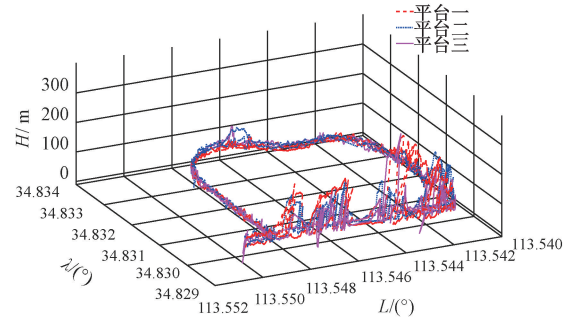


图 16 GNSS 和 INS 紧组合导航

Fig. 16 GNSS and INS navigation

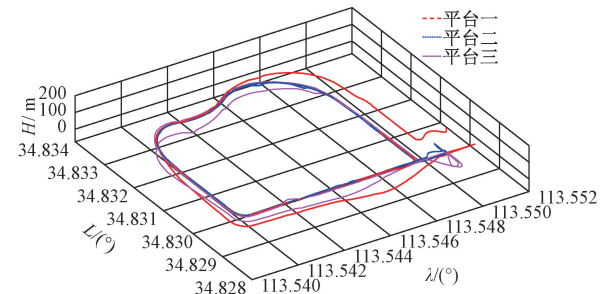


图 17 UWB 辅助的卫星双差紧组合相对导航

Fig. 17 UWB-assisted satellite double-difference tight combined relative navigation

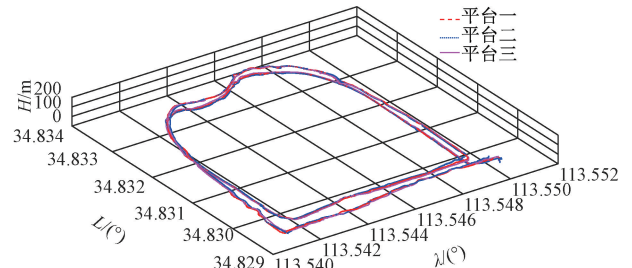


图 18 协同导航解算结果

Fig. 18 Coordinated navigation trajectory

从图中可以看出,图16中第一组实验采用GNSS和INS紧组合解算的效果最差,受建筑物遮挡等原因可见星不足,部分路段完全偏离实际路线。而图17采用UWB辅助的卫星双差紧组合相对导航和图18采用协同导航的两种算法的结果都要优于第一组结果;但图17中3条轨迹并不是完全重合的,可以观察到平台一与三不在一个平面内,高度差高达200 m;而图18的第三组结果表明,平台间互相协同,解算出的轨迹基本位于一个平面内,表明了本文所提协同导航算法的可行性和优越性。

6 结 论

针对无人机工作时由于飞行距离问题,会脱离地面控制站,并可能会出现卫星可见数不足的情况,采用了相应的 INS/GNSS 紧组合绝对导航和 UWB 辅助的相对导航,提出了基于环路和积算法的协同导航算法,通过规划平台间的信息传递规则,以及平台解算信息方法,来减少平台间流量,并提高无人机群的整体定位精度。通过仿真实验和跑车实验验证了本方法的可行性和有效性,该方法适用于多种场景,并随着可观测量的增加而提高导航精度。由于实验条件所限,下一步拟进行飞行实验。

参考文献

- [1] 甄子洋. 舰载无人机自主着舰回收制导与控制研究进展[J]. 自动化学报, 2019, 45(4): 669-681.
ZHEN Z Y. Research development in autonomous carrier-landing/ship-recovery guidance and control of unmanned aerial vehicles [J]. Acta Automatica Sinica. 2019, 45(4): 669-681.
- [2] GONZÁLEZ-GARCÍA J, SWENSON R L, GÓMEZ-ESPINOSA A. Real-time kinematics applied at unmanned aerial vehicles positioning for orthophotography in precision agriculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177: 105695.
- [3] ERDELJ M, KROL M, NATALIZIO E. Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management [J]. Computer Networks, 2017, 124 (SEP. 4): 72-86.
- [4] ZHOU Y, CHENG N, LU N, et al. Multi-UAV-aided networks: Aerial-ground cooperative vehicular networking architecture [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015, 10(4): 36-44.
- [5] WANG G, YU H, JIAN C, et al. A GNSS/INS integrated navigation algorithm based on kalman filter [J]. IFAC-Papers OnLine, 2018, 51 (17): 232-237.
- [6] JBPN A, LCG A, FMO A, et al. An accurate cooperative positioning system for vehicular safety applications [J]. Computers & Electrical Engineering, 2020, 83, 106591.
- [7] SAHOO A, DWIVEDY S K, ROBI P S. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle [J]. Ocean Engineering, 2019, 181 (JUN. 1): 145-160.
- [8] BAHR, ALEXANDER, LEONARD, et al. Cooperative localization for autonomous underwater vehicles [J]. International Journal of Robotics Research, 2009, DOI. org/10. 1007/978-3-540-77457-0_36.
- [9] EL-SHEIMY N, LI Y. Indoor navigation: State of the art and future trends [J]. Satellite Navigation, 2021, 2(1): 7.
- [10] 陈红梅, 常林江, 张会娟, 等. 协同导航不完全量测环路和积数据关联算法 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 136-145.
CHEN H M, CHANG L J, ZHANG H J, et al. Cooperative navigation incomplete measurement loop sum-product algorithm for data association [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 136-145.
- [11] SIVANERI V O, GROSS J N. UGV-to-UAV cooperative ranging for robust navigation in GNSS-challenged environments [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 71: 245-255.
- [12] XIONG J, XIONG Z, CHEONG J W, et al. Cooperative positioning for low-cost close formation flight based on relative estimation and belief propagation [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106068.
- [13] SAVIC V, ZAZO S. Cooperative localization in mobile networks using nonparametric variants of belief propagation [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11 (1): 138-150.
- [14] HLINKA O, MEYER F, HLAWATSCH, et al. Sigma point belief propagation [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(2): 145-149.
- [15] 单斌, 张复建, 杨波, 等. 基于自适应姿态估计的 MIMU/GPS 紧组合导航算法 [J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(6): 760-767.
SHAN B, ZHANG F J, YANG B, et al. High-precision tightly integrated MIMU/GPS navigation algorithm based on adaptive attitude estimation [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(6): 760-767.
- [16] 刘刚, 郭美凤, 张嵘, 等. MIMU 精度对 GNSS/MINS 组合导航系统性能影响仿真分析 [J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(6): 786-791.
LIU G, GUO M F, ZHANG R, et al. MIMU precision's influence on GNSS/MINS integrated navigation system

performance by simulation analysis [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(6): 786-791.

- [17] YANG M, GAO SH SH, ZHONG Y M, et al. Covariance matching based adaptive unscented Kalman filter for direct filtering in INS/GNSS integration [J]. Acta Astronautica, 2016(120): 171-181.
- [18] CUI J H, WANG ZH Y, ZHANG CH Z, et al. Localization algorithm based on factor graph and hybrid message passing for wireless networks [J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(5): 1306-1310.

作者简介



陈红梅, 1999 年于武汉水利电力大学获得学士学位, 2007 年于东南大学获得硕士学位, 2015 年于东南大学获得博士学位, 现为河南工业大学副教授, 主要研究方向为协同导航、组合导航智能算法与系统。

E-mail: chenhongmei_seu@163.com

Chen Hongmei received her B.Sc. degree from Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering in 1999, and received her M.Sc. and Ph.D. degree both from Southeast University in 2007 and 2015, respectively. She is currently an associate professor at Henan University of Technology. Her main research interests include cooperative navigation and location, wireless communication networks, in-particular intelligent algorithms, and systems for such systems.



叶文, 2011 年于洛阳理工学院获学士学位, 2014 年于华北电力大学(北京校部)获硕士学位, 2018 年于北京航空航天大学获博士学位, 现为中国计量科学研究院副研究员, 主要研究方向: 惯性导航, 分布式惯性测量, 惯性测试与计量技术。

E-mail: wenye@buaa.edu.cn

Ye Wen received his B.Sc. degree from Luoyang Institute of Science and Technology in 2011, received his M.Sc. degree from North China Electric Power University in 2014, and received his Ph.D. degree from Beihang University in 2018. He is currently an associate research fellow at National Institute of Metrology, China. His main research includes inertial navigation, distributed inertial measurement, inertial test and metrology.



吴才章(通信作者), 1991 年毕业于信阳师范学院获得学士学位, 1997 年于华中科技大学获得硕士学位, 2005 年于华中科技大学获得博士学位, 现为河南工业大学教授, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: wucaizhang@haut.edu.cn

Wu Caizhang (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Xinyang normal university in 1991, and received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Huazhong University of Science and Technology in 1997 and 2005, respectively. He is currently a professor at Henan University of Technology. His main research interests include detection technology and automatic equipment.