

4-15-2024

Collaborative Navigation Method for 5G Cluster UAV Based on Configuration Optimization

Chao Gao

State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China, gchao@js.sgcc.com.cn

Zheng Huang

State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; JiangSu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China, hz10@vip.qq.com

Xuan Zhao

State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing Power Supply Branch, Nanjing 210017, China

Hongxing Wang

State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; JiangSu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Collaborative Navigation Method for 5G Cluster UAV Based on Configuration Optimization

Abstract

Abstract: The existing range based cooperative navigation methods for clustered UAVs generally ignore the impact of space configuration on positioning and energy determination, which makes it difficult to obtain the accurate navigation and positioning results. In view of this, a collaborative navigation method is proposed for 5G clustered UAVs based on spatial configuration optimization. The relative ranging error model of UAVs based on 5G signals in complex environments is constructed, and the optimization strategy for collaborative navigation nodes is established based on the minimum geometric division of precision(GDOP) criterion to achieve the real-time optimization of collaborative navigation spatial configuration; A collaborative navigation filter based on 5G ranging network is designed to estimate and compensate the UAV navigation information online, so as to improve the collaborative positioning accuracy of clustered UAVs. Simulation results show that through the proposed collaborative navigation method, the slave positioning accuracy is improved by 42.05% on average, which provides an effectively new method for clustered UAVs to achieve autonomous navigation when satellite signals are unavailable.

Keywords

5G ranging, cooperative navigation, UAV, geometric dilution of precision(GDOP), optimal configuration

Authors

Chao Gao, Zheng Huang, Xuan Zhao, Hongxing Wang, and Tao Long

Recommended Citation

Gao Chao, Huang Zheng, Zhao Xuan, et al. Collaborative Navigation Method for 5G Cluster UAV Based on Configuration Optimization[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4): 981-990.

基于构型优选的5G集群无人机协同导航方法

高超¹, 黄郑^{1,3*}, 赵轩², 王红星^{1,3}, 龙涛²

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 2. 国网江苏省电力有限公司 南京供电分公司, 江苏 南京 210017;
3. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对现有基于测距的集群UAV协同导航方法普遍忽略了空间构型对定位定能的影响, 难以获得精确的导航定位结果, 提出一种基于空间构型优选的5G集群UAV协同导航方法。构建了复杂环境下基于5G信号的UAV相对测距误差模型, 基于最小几何精度因子(*geometric dilution of precision*, *GDOP*)准则建立了协同导航节点寻优策略, 实现了协同导航空间构型的实时优选; 设计了基于5G测距网络的协同导航滤波器, 对UAV导航信息进行在线估计和实时补偿, 提高集群UAV的协同定位精度。仿真结果表明: 该方法从机定位精度平均提升了约42.05%, 为集群UAV实现在卫星不可用条件下的自主导航提供了一种有效的新方法。

关键词: 5G测距; 协同导航; 多无人机; GDOP(*geometric dilution of precision*); 最优构型

中图分类号: TP391.9; TP29 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)04-0981-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1472

引用格式: 高超, 黄郑, 赵轩, 等. 基于构型优选的5G集群无人机协同导航方法[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(4): 981-990.

Reference format: Gao Chao, Huang Zheng, Zhao Xuan, et al. Collaborative Navigation Method for 5G Cluster UAV Based on Configuration Optimization[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4): 981-990.

Collaborative Navigation Method for 5G Cluster UAV Based on Configuration Optimization

Gao Chao¹, Huang Zheng^{1,3*}, Zhao Xuan², Wang Hongxing^{1,3}, Long Tao²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing Power Supply Branch, Nanjing 210017, China; 3. JiangSu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: The existing range based cooperative navigation methods for clustered UAVs generally ignore the impact of space configuration on positioning and energy determination, which makes it difficult to obtain the accurate navigation and positioning results. In view of this, a collaborative navigation method is proposed for 5G clustered UAVs based on spatial configuration optimization. The relative ranging error model of UAVs based on 5G signals in complex environments is constructed, and the optimization strategy for collaborative navigation nodes is established based on the minimum geometric division of precision(*GDOP*) criterion to achieve the real-time optimization of collaborative navigation spatial configuration; A collaborative navigation filter based on 5G ranging network is designed to estimate and compensate the UAV navigation information online, so as to improve the collaborative positioning accuracy of clustered UAVs. Simulation results show that through the proposed collaborative navigation method, the slave positioning accuracy is improved by 42.05% on average, which provides an effectively new method for clustered UAVs to achieve autonomous navigation when satellite signals are unavailable.

Keywords: 5G ranging; cooperative navigation; UAV; geometric dilution of precision(*GDOP*); optimal configuration

收稿日期: 2022-12-08

修回日期: 2023-02-09

基金项目: 国网江苏省电力有限公司重点科技(J2021130)

第一作者: 高超(1983-), 男, 高工, 研究方向为无人机智能运检。E-mail: gchao@js.sgcc.com.cn

通讯作者: 黄郑(1990-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为无人机智能巡检。E-mail: hz10@vip.qq.com

0 引言

随着传感器、无线通信等技术的不断发展,无人机性能不断得到提升。无人机凭借自身体积小、航程远的特点,在军事与民生领域都得到了广泛应用,如情报搜集、电子对抗^[1]、城市测绘^[2]、电力巡线^[3]等。受限于无人机载荷、体积、质量等因素的限制,单架无人机任务执行成功率低、系统抗毁伤能力不足等缺陷日渐凸显^[4]。无人机集群通过实时信息共享和资源互补,可有效解决单机的不足,提升任务执行效率与成功率,受到业内研究学者的广泛关注。

高精度导航信息是无人机实现集群协同飞行的关键因素之一。在卫星信号可用的条件下,通过机载惯性导航系统(inertial navigation system, INS)与全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)松/紧组合方式^[5-6],可以为无人机提供连续、高精度的导航信息。考虑到集群无人机所面临的复杂飞行环境,部分无人机的机载卫星接收机可能因外界环境干扰而无法正常运行^[7]。因此,构建不依赖于卫星的集群无人机协同导航方法是研究热点。

很多研究学者基于超宽带(ultra-wide band, UWB)以及数据链通信技术,通过TOA(time of arrival)^[8]/TDOA(time difference of arrival)^[9]等方式开展了大量无人机集群协同导航方面的研究工作。文献[10]通过数据链提供的测距信息作为系统观测,采用扩展卡尔曼滤波实现对状态量的最优估计,提高编队定位的精度。文献[11]采用超宽带通信技术实现无人机之间高精度的相对距离测量,应用通信技术实现机间信息的交换和共享,将GNSS观测信息与无人机间相对测距观测信息融合并引入抗差估计,使无人机位置信息协同结算的可靠性提升。但上述传统的基于超宽带技术、数据链系统实现无人机集群协同定位的研究中,没有考虑到空间构型对无人机定位精度的影响,而空间构型是影响无人机协同定位精度的主要因

素之一。此外,超宽带技术与数据链系统在协同定位应用中还存在待优化的不足之处,如数据链系统体积大、数据传输速率低^[12]、UWB技术占用的带宽高^[13]。

5G作为一种具有超高速率、超低时延和超高密度覆盖优势的无线电通信技术,可以为集群无人机的机间通讯提供可靠保障^[14]。而通过TOA/TDOA等技术,可以实现5G网络下集群无人机间的相对测距。为此,本文旨在5G网络时间同步的前提下,基于机间相对测距的方式,通过最小几何精度因子(geometric dilution of precision, GDOP)准则实时选择最优空间几何构型中的多架领机,实现对从机节点的协同定位解算。推导并构建了协同导航系统状态递推模型及系统观测模型,设计了扩展卡尔曼滤波器对从机惯导系统误差进行实时最优估计与在线补偿,提高从机位置状态估计精度。

1 基于5G网络的相对定位原理及误差分析

高精度导航信息的获取与机间传输是实现集群协同定位的关键。依据测量物理量的不同,位置信息的获取可分为基于测距方式和构建位置指纹库等非测距方式^[15]。5G无线电通信技术具备超高速数据传输频率、低通信延迟特性,为集群无人机协同飞行所需的高频位置数据共享及交互提供了技术支持。

本文针对5G无人机集群协同网络,通过TOA测距模式实现无人机高精度协同定位。协同网络中位置已知的领机节点搭载MEMS(micro-electro-mechanical systems)惯性测量单元、卫星接收机和5G数据通信装置。从机节点仅搭载MEMS惯性测量单元和5G数据通信装置。协同定位过程中,从机节点实时接收领机节点的位置信息以及机间相对测距信息。在不考虑节点时钟非同步误差的条件下,从机节点基于三球交汇原理实现高精度定位。基于相对测距的三球交汇原理示意图如图1所示。

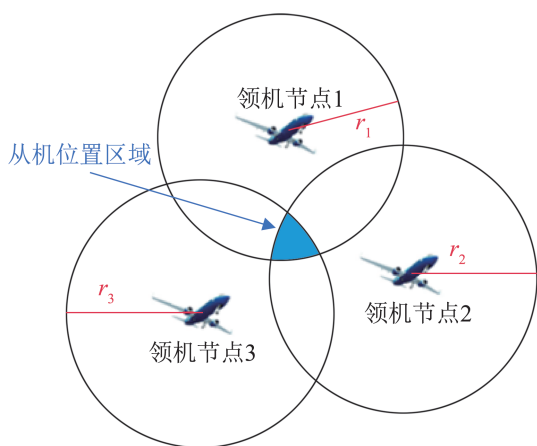


图1 基于相对测距的多无人机协同定位
Fig. 1 Multi-UAV cooperative positioning principle based on relative ranging

以各领机节点为中心, 领机节点与从机节点的相对距离 r 为半径, 通过三球交汇原理(不考虑时钟非同步误差), 得到从机的相对位置。

考虑到无人机集群复杂的飞行环境、机载设备精度等因素的影响, 无人机测距信息会受各类误差影响而产生波动。5G 相对测距信息会存在数据收发装置误差、NLOS(non-line-of-sight)径链路和多路径(multipath)误差、无关基站及用户的信号干扰误差、5G 信号质量乃至盲区的通讯误差等。

可将上述5G相对测距误差建模为

$$D = \bar{d} + \omega_c + \omega_s + \omega_f + \omega_L \quad (1)$$

式中: \bar{d} 为从机节点与领机的测距真值; ω_c 为机载5G数据收发装置的误差; ω_s 为无关基站及用户的影响; ω_f 为网络信号覆盖不足的影响; ω_L 为NLOS径链路和多路径的影响。本文将 ω_c 、 ω_s 、 ω_f 、 ω_L 考虑为高斯白噪声。

2 基于5G网络的无人机集群协同导航方法研究

无人机集群通过形成编队构型以应对不同的作战任务, 构型优选是充分发挥集群优势的关键技术。卫星的几何架构对位置误差的影响称为GDOP, 此参数表示位置误差与测距误差的比率。

一般来说, 在卫星导航定位研究中通过最大失端四面体体积法, 可以实现定位目标时4颗导航卫星的最佳几何配置方案, 本文在无人机协同导航研究中采用最大失端四面体体积法。当无人机集群中4架领机与从机节点构成的空间矢量四面体体积最大, 即精度因子GDOP最小时, 得到领机最佳几何配置, 可有效降低从机定位误差。因此, 本文基于最小GDOP准则, 对领机节点进行实时构型优选, 进而设计5G测距网络下无人机集群协同导航滤波器, 实现无人机集群的协同导航。

2.1 无人机集群最优空间构型策略设计

假设无人机集群协同网络中共有 M 架无人机节点, 其中, N 架为领机节点, 飞行在卫星信号覆盖区域内, $M-N$ 架为待协同定位解算的从机节点。领机通过机载导航系统进行自身导航结果解算, 同时将自身位置信息通过5G广播给从机节点。从机节点实时接收领机节点的位置信息, 并基于TOA的方式实现与领机节点的相对距离测量。根据领机的位置信息及测距信息, 采用最大矢量四面体体积法, 同时实现协同网络中多架次从机节点空间构型的实时优选, 提升多架次从机节点协同定位精度。无人机集群协同网络中领机与部分从机节点空间构型拓扑空间构型四面体如图2所示。

领机与从机节点之间的三维相对距离为

$$\rho = \sqrt{(x - x_{si})^2 + (y - y_{si})^2 + (z - z_{si})^2} \quad (2)$$

式中: (x_{si}, y_{si}, z_{si}) 为领机节点的三维位置, (x, y, z) 为从机节点的三维位置。将式(2)进行一阶线性化泰勒展开可得在 n 架领机节点的情况下, 从机节点协同定位误差方程组为

$$\mathbf{R} - \mathbf{P} = \mathbf{G}_u \cdot \mathbf{X}_u \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ 为从机节点到领机节点的空间几何距离; $\mathbf{P} = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$ 为从机节点到领机节点的三维相对距离测量值; \mathbf{G}_u 为从机节点到领机节点的方向余弦矩阵。

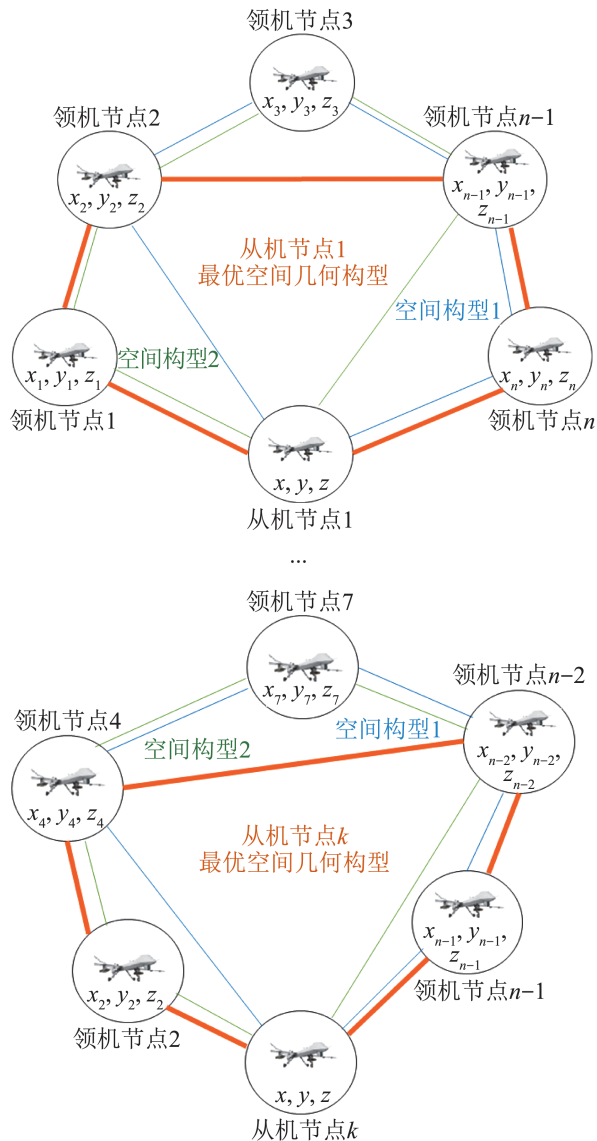


图2 领机与多架次从机节点空间构型四面体
Fig. 2 Tetrahedron of node space configuration of leader and multiple slaves

$$\mathbf{G}_u = \begin{bmatrix} -h_{11} & -h_{12} & -h_{13} \\ -h_{21} & -h_{22} & -h_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -h_{n1} & -h_{n2} & -h_{n3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\mathbf{X}_u = [\delta x, \delta y, \delta z]^T$, 其中, $(\delta x, \delta y, \delta z)$ 为从机节点机载惯导系统位置误差。

通过式(3)采用最小二乘法可得

$$\mathbf{X}_u = [\mathbf{G}_u^T \mathbf{G}_u]^{-1} \mathbf{G}_u^T [\mathbf{R} - \mathbf{P}] \quad (5)$$

误差协方差为

$$\text{cov}(\delta \mathbf{X}_u) = [(\mathbf{G}_u^T \mathbf{G}_u)^{-1} \mathbf{G}_u^T] \times \text{cov}[\delta(\mathbf{R} - \mathbf{P})][(\mathbf{G}_u^T \mathbf{G}_u)^{-1} \mathbf{G}_u^T]^T \quad (6)$$

假设从机节点与各领机相对测距误差为白噪声模型, 且相互独立:

$$\text{cov}(\delta(\mathbf{R} - \mathbf{P})) = \sigma^2 \mathbf{I} \quad (7)$$

将式(7)带入式(6)可得:

$$\text{cov}(\delta \mathbf{X}_u) = (\mathbf{G}_u^T \mathbf{G}_u)^{-1} \sigma^2 \quad (8)$$

令式中

$$(\mathbf{G}_u^T \mathbf{G}_u)^{-1} = \mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

则从机与领机节点空间几何构型 GDOP 误差系数可表示为

$$G_{\text{DOP}} = [\text{Trace}(\mathbf{G}_u^T \mathbf{G}_u)^{-1}]^{1/2} = (g_{11} + g_{22} + g_{33})^{1/2} \quad (10)$$

为了实时获取与从机节点最优空间几何构型的4架领机, 需实时计算当前时刻所有空间构型的 GDOP 值。采用当前时刻 GDOP 值最小的空间几何构型作为优选的领机节点结果:

$$G_{\text{DOP}}(m) = \min(G_{\text{DOP}}) \quad (11)$$

2.2 基于5G相对测距的协同导航滤波器设计

无人机集群协同导航滤波器的总体框架流程如图3所示。首先, 在协同网络时钟同步的基础上, 从机节点通过机载5G数据通信系统实时识别不同领机节点的设备ID并完成相对测距以及导航信息互享, 机载导航计算机结合自身惯导信息以及相对测距信息完成空间坐标系转换。其次, 根据本文提出的空间构型优选方法实时选择出不同时刻与从机节点构成最优空间构型的4架领机节点, 结合无人机运动特性, 构建从机节点5G相对测距误差观测模型及无人机集群状态递推模型。在此基础上设计扩展卡尔曼滤波器^[16], 最终实现系统状态量的在线估计与实时补偿, 达到提高从机节点定位精度的目的。

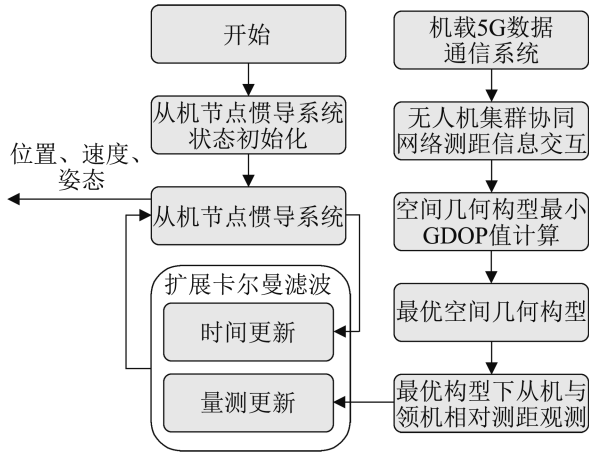


图3 基于空间构型优选的无人机集群协同定位
Fig. 3 UAV cluster collaborative positioning based on spatial configuration optimization

2.2.1 状态方程模型

基于空间构型优选的无人机集群协同定位算法系统状态量为

$$\mathbf{X}(t) = [\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U, \delta v_E, \delta v_N, \delta v_U, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \varepsilon_{bx}, \varepsilon_{by}, \varepsilon_{bz}, \varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z] \quad (12)$$

式中: $\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U$ 为从机节点机载惯导系统平台误差角; $\delta v_E, \delta v_N, \delta v_U$ 为从机节点机载惯导系统速度误差; $\delta L, \delta \lambda, \delta h$ 为从机节点机载惯导系统位置误差; $\varepsilon_{bx}, \varepsilon_{by}, \varepsilon_{bz}$ 为三轴陀螺随机常数; $\varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}$ 为三轴陀螺一阶马尔可夫过程随机噪声; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 为三轴加速度计一阶马尔可夫过程随机噪声。

通过从机节点惯导系统误差微分方程, 构建协同定位算法状态递推方程为

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{W}(t) \quad (13)$$

式中: $\mathbf{G}(t)$ 为系统噪声矩阵; $\mathbf{W}(t)$ 为陀螺和加速度计白噪声; $\mathbf{F}(t)$ 为系统状态转移矩阵。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_N & \mathbf{F}_S \\ \mathbf{0} & \mathbf{F}_M \end{bmatrix}_{18 \times 18} \quad (14)$$

式中: \mathbf{F}_N 为平台误差角、速度误差、位置误差对应的系统矩阵。

$$\mathbf{F}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^n & \dots & \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ & & & \mathbf{C}_b^n \\ & & & \vdots \\ \mathbf{0}_{6 \times 6} & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{9 \times 9} \quad (15)$$

$$\mathbf{F}_M = \text{diag} \left[0, 0, 0, -\frac{1}{T_{gx}}, -\frac{1}{T_{gy}}, -\frac{1}{T_{gz}}, -\frac{1}{T_{ax}}, -\frac{1}{T_{ay}}, -\frac{1}{T_{az}} \right] \quad (16)$$

式中: \mathbf{C}_b^n 为机体坐标系到导航坐标系的姿态矩阵; T_{gx}, T_{gy}, T_{gz} 为三轴陀螺仪相关时间常数; T_{ax}, T_{ay}, T_{az} 为三轴加速度计相关时间常数。

2.2.2 观测方程模型

从机节点与最优空间几何构型下领机节点三维相对距离计算值为

$$\rho_{lsl} = \sqrt{(x_1 - x_{sl})^2 + (y_1 - y_{sl})^2 + (z_1 - z_{sl})^2} \quad (17)$$

式中: (x_1, y_1, z_1) 为从机节点机载惯导系统解算的位置; (x_{sl}, y_{sl}, z_{sl}) 为领机节点三维位置。将式(17)一阶泰勒展开并忽略高次项可得

$$\rho_{lsl} = [(x - x_{sl})^2 + (y - y_{sl})^2 + (z - z_{sl})^2]^{1/2} + \frac{\partial \rho_{lsl}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \rho_{lsl}}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \rho_{lsl}}{\partial z} \delta z = r_i + \frac{\partial \rho_{lsl}}{\partial x} \delta x + \frac{\partial \rho_{lsl}}{\partial y} \delta y + \frac{\partial \rho_{lsl}}{\partial z} \delta z \quad (18)$$

无人机节点之间相对距离计算值在三轴的方向余弦为

$$r_i = [(x - x_{sl})^2 + (y - y_{sl})^2 + (z - z_{sl})^2]^{1/2} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \rho_{lsl}}{\partial x} = \frac{x - x_{sl}}{[(x - x_{sl})^2 + (y - y_{sl})^2 + (z - z_{sl})^2]^{1/2}} = (x - x_{sl})/r_i = e_{i1} \quad (20)$$

$$\frac{\partial \rho_{lsl}}{\partial y} = \frac{y - y_{sl}}{[(x - x_{sl})^2 + (y - y_{sl})^2 + (z - z_{sl})^2]^{1/2}} = (y - y_{sl})/r_i = e_{i2} \quad (21)$$

$$\frac{\partial \rho_{lsl}}{\partial z} = \frac{z - z_{sl}}{[(x - x_{sl})^2 + (y - y_{sl})^2 + (z - z_{sl})^2]^{1/2}} = (z - z_{sl})/r_i = e_{i3} \quad (22)$$

从机节点通过5G网络通讯系统获得最优空间构型下, 领机与从机节点相对距离测量值为

$$\rho_{Dj} = r_j - v_{pj} \quad (23)$$

式中: r_j 为领机与从机节点相对距离真值; v_{pj} 为机载5G系统相对测距误差白噪声。

将式(18)与式(23)作差可得

$$\delta \rho_i = \rho_{lsl} - \rho_{Dj} = e_{i1} \delta x + e_{i2} \delta y + e_{i3} \delta z + v_{pj} \quad (24)$$

取 $i=1, 2, 3$, 则5G网络下相对测距观测方程为

$$\delta \boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \rho_{1s1} - \rho_{D1} \\ \rho_{1s2} - \rho_{D2} \\ \rho_{1s3} - \rho_{D3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{\rho 1} \\ v_{\rho 2} \\ v_{\rho 3} \end{bmatrix} \quad (25)$$

本文选取导航坐标系为东、北、天地理坐标系, 因此, 需要将地心地固直角 (earth-centered earth fixed, ECEF) 坐标系下惯导位置误差转换到地理坐标系下, 两坐标系的空间转换关系为

$$\begin{cases} \delta x = \delta h \cos L \cos \lambda - (R_N + h) \sin L \cos \lambda \delta L - \\ \quad (R_N + h) \cos L \sin \lambda \delta \lambda \\ \delta y = \delta h \cos L \sin \lambda - (R_N + h) \sin L \sin \lambda \delta L + \\ \quad (R_N + h) \cos L \cos \lambda \delta \lambda \\ \delta z = \delta h \sin L + [R_N (1 - f)^2 + h] \cos L \delta L \end{cases} \quad (26)$$

式中: δL 、 $\delta \lambda$ 、 δh 为从机节点的纬度、经度、高度位置误差; L 、 λ 、 h 为解算的从机节点纬度、经度、高度值。 $R_N = R_e (1 + f (\sin L)^2)$, $R_e = 6378137 \text{ m}$, $f = 1/298.257$ 。

将式(26)带入式(25)可得基于空间构型优选的无人机集群协同定位算法系统观测方程:

$$\mathbf{Z}_\rho = \delta \boldsymbol{\rho} = \mathbf{H}_\rho \mathbf{X}_i + \mathbf{V}_\rho \quad (27)$$

$$\mathbf{H}_\rho = [\mathbf{0}_{3 \times 6}, \mathbf{H}_{\rho 1}, \mathbf{0}_{3 \times 9}]$$

$$\mathbf{H}_{\rho 1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{cases} a_{11} = (R_N + h)[-e_{i1} \sin L \cos \lambda - e_{i2} \sin L \sin \lambda] + \\ \quad [R_N (1 - f)^2 + h] e_{i3} \cos L \\ a_{12} = (R_N + h)[e_{i2} \cos L \cos \lambda - e_{i1} \cos L \sin \lambda] \\ a_{13} = e_{i1} \cos L \cos \lambda + e_{i2} \cos L \sin \lambda + e_{i3} \sin L \end{cases} \quad (29)$$

2.2.3 扩展卡尔曼滤波模型

状态方程及观测方程建立后卡尔曼滤波进行时间更新和量测更新的过程如下:

$$\hat{\mathbf{X}}_{i/t-1} = \boldsymbol{\Phi}_{i,t-1} \hat{\mathbf{X}}_{i-1/t-1} \quad (30)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{i/t} = \hat{\mathbf{X}}_{i/t-1} + \mathbf{K}_i (\mathbf{Z}_i - \mathbf{H}_i \hat{\mathbf{X}}_{i/t-1}) \quad (31)$$

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{P}_{i/t-1} \mathbf{H}_i^T (\mathbf{H}_i \mathbf{P}_{i/t-1} \mathbf{H}_i^T + \mathbf{R}_i)^{-1} \quad (32)$$

$$\mathbf{P}_{i/t} = \boldsymbol{\Phi}_{i,t-1} \mathbf{P}_{i-1/t-1} \boldsymbol{\Phi}_{i,t-1}^T + \boldsymbol{\Gamma}_{i,t-1} \mathbf{Q}_{i-1/t-1} \boldsymbol{\Gamma}_{i,t-1}^T \quad (33)$$

$$\mathbf{P}_{i/t} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i) \mathbf{P}_{i/t-1} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i)^T + \mathbf{K}_i \mathbf{R}_i \mathbf{K}_i^T \quad (34)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}_{i/t-1}$ 为 $t-1$ 到 t 时刻的估计状态量; $\boldsymbol{\Phi}_{i,t-1}$ 为 $t-1$ 到 t 时刻的状态转移矩阵; $\hat{\mathbf{X}}_{i-1/t-1}$ 为上一步的估计状态量; $\hat{\mathbf{X}}_{i/t}$ 为本步的估计状态量; \mathbf{K}_i 为系统 t 时刻的滤波增益; \mathbf{Z}_i 为 t 时刻的量测量, 其值根据式(27)中的 \mathbf{H}_ρ 实时变化; \mathbf{H}_i 为系统 t 时刻的量测矩阵, 其值根据式(27)中的 \mathbf{Z}_ρ 实时变化; $\mathbf{P}_{i/t-1}$ 为 $\hat{\mathbf{X}}_{i/t-1}$ 对应的均方误差; \mathbf{R}_i 为系统 t 时刻的量测噪声矩阵; $\mathbf{P}_{i-1/t-1}$ 为上一步的均方误差; $\boldsymbol{\Gamma}_{i,t-1}$ 为 $t-1$ 到 t 时刻的系统输入矩阵; $\mathbf{P}_{i/t}$ 为 $\hat{\mathbf{X}}_{i/t}$ 对应的均方误差; \mathbf{I} 为单位阵。

最终根据建立的卡尔曼滤波时间更新和量测更新方程开展协同导航算法仿真分析部分。

3 仿真分析

为了验证算法的可行性及有效性, 本文通过仿真对算法进行验证分析。仿真时通过航迹发生器分别模拟50架无人机的飞行轨迹, 其中, 40架为飞行在卫星信号覆盖区域下的领机节点, 搭载MEMS惯性测量单元、卫星接收机及5G通信模块, 其他10架为飞行在卫星拒止区域的从机节点仅搭载MEMS惯性测量单元及5G通信模块。在下文仿真中10架从机节点既参与到空间构型优选算法中, 也参与组成10个传统单一构型算法中以作为对照组。传统单一构型中除从机节点外, 用以协同定位的4架领机节点一旦选择, 在整个协同定位中则不再更换。4架领机节点的选择标准保证初始航迹方向互相不同且有别于从机节点即可。

本文进行算法验证的计算机配备 Intel(R) Core(TM) i5-8300H 2.30 GHz CPU 以及 8 GB 机带 RAM, 算法各项调试在 MATLAB2019a 中进行。

仿真时的机载惯导系统采样频率为 50 Hz, 领机机载卫星接收机及 5G 相对测距采样频率为 1 Hz。仿真的机载传感器性能参数设置如表 1 所示。整个仿真时长为 12 min。

表 1 传感器性能参数设置

误差参数类型	设置参数
陀螺仪常值漂移/($^{\circ}$ /h)	[10, 10, 10]
陀螺仪随机漂移/($^{\circ}$ /h)	[10, 10, 10]
加速度计零偏/g	[0.001, 0.001, 0.001]
加速度计随机偏差/g	[0.001, 0.001, 0.001]
领机卫星接收机定位误差/m	[20, 20, 50]
5G 测距误差/m	100

本文在仿真中利用无人机航迹发生器数据分别模拟机载陀螺仪、加速度计、卫星位置数据, 以及 5G 相对测距信息。仿真设计时利用航迹发生器数据模拟集群无人机协同网络导航信息, 如图 4 所示。

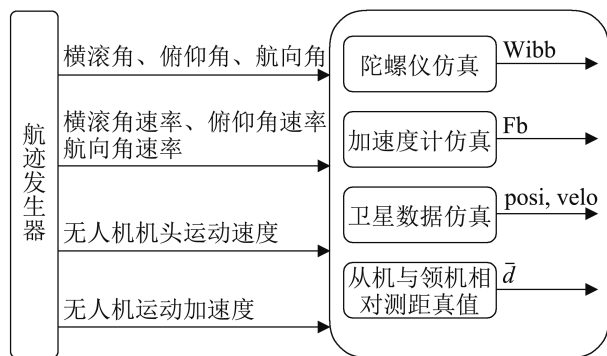


图 4 航迹发生器模拟协同网络导航信息
Fig. 4 Simulation collaborative network navigation information of track generator

通过模拟从机及领机航迹真值、领机 GPS 位置信息、从机所有空间构型结果等信息最终完成扩展卡尔曼滤波器对从机惯导系统误差的实时最优估计与在线补偿。为验证所设计的扩展卡尔曼滤波器的正确性, 以从机节点 1 的仿真为例, 给出从机节点 1 在仿真周期内经卡尔曼滤波后的位置收敛曲线, 如图 5 所示。仿真中部分领机与从机节点 1 的初始飞行参数, 由表 2 给出, 其余领机与从机节点的初始参数设置与表 2 相关参数设置模式类似。

假设在集群无人机起飞前首先通过卫星系统时钟完成协同网络的时钟同步。在协同定位过程中, 领机节点通过惯性/卫星松组合方式得到位置信息, 并通过 5G 通讯模块实时将自身位置及协方差信息传输给从机节点。从机节点接收领机节点

位置信息的同时, 基于 TOA 方式实现与协同节点的相对距离测量。从机节点结合领机位置及相对测距信息, 通过本文提出的基于空间构型优选的协同定位方法实现从机高精度协同定位。

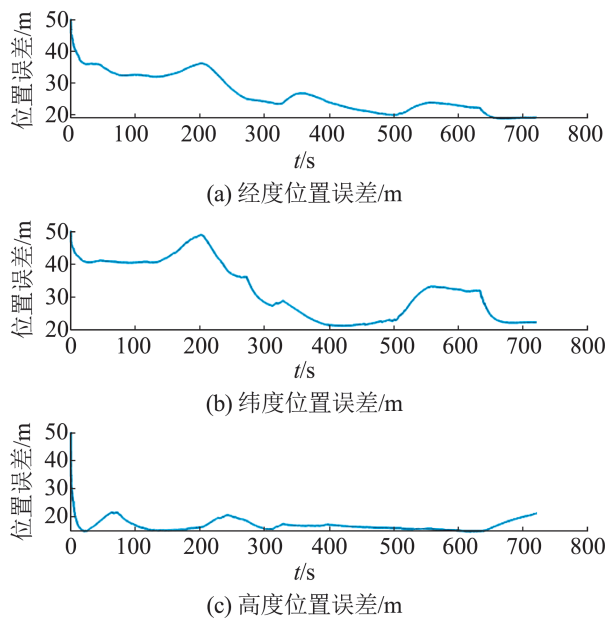


图 5 从机节点 1 经卡尔曼滤波后的位置收敛曲线
Fig. 5 Position convergence curve of slave node 1 after Kalman filtering

表 2 部分领机与从机节点 1 相关参数设置

无人机节点	设置参数
从机节点 1 三维位置/($^{\circ}$)/($^{\circ}$)/m)	[110, 20, 1 000]
从机节点 1 姿态角/ $^{\circ}$)	[0, 0, 45]
领机节点 1 三维位置/($^{\circ}$)/($^{\circ}$)/m)	[109.999 6, 19.999 5, 350]
领机节点 1 姿态角/ $^{\circ}$)	[0, 0, 45]
领机节点 2 三维位置/($^{\circ}$)/($^{\circ}$)/m)	[109.999 7, 19.999 7, 500]
领机节点 2 姿态角/ $^{\circ}$)	[0, 0, 45]

注: 位置参数为经度、纬度、高度; 姿态角参数为横滚角、俯仰角、航向角。

为了验证本文提出的多架次从机节点实时空间构型优选策略, 图 6 给出了从机节点 1 与领机实时构成最优空间几何构型对应的 GDOP 值。

从图 6 可知, 通过本文提出的最小 GDOP 方法, 能够实时从无人机集群协同网络中选择出与从机构成的最优空间几何构型。在此基础上, 可充分利用最优空间几何构型中的领机节点及测距观测对从机进行协同定位解算。

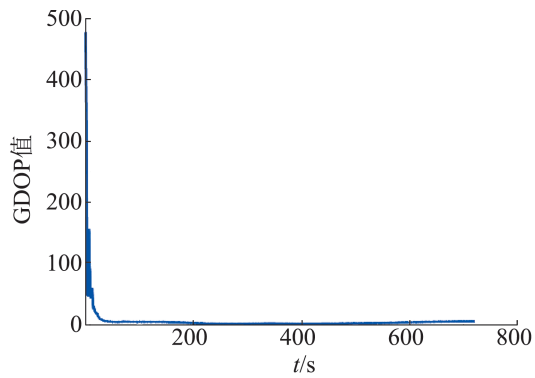


图6 从机节点1最优空间几何构型对应GDOP值
Fig. 6 GDOP value corresponding to optimal spatial geometry of slave node 1

为了验证本文提出的算法对从机节点的协同定位性能,图7给出了采用不同协同定位算法得到的从机节点1的位置轨迹。由图7可知,采用传统单一构型的协同定位算法,从机节点利用领航节点的位置信息以及测距观测可实现较高精度的定位。然而,考虑到空间构型对从机协同定位精度的影响,采用本文算法,从机节点能够获得相对单一构型协同定位算法较高的位置估计性能,位置估计值更接近于真实轨迹。

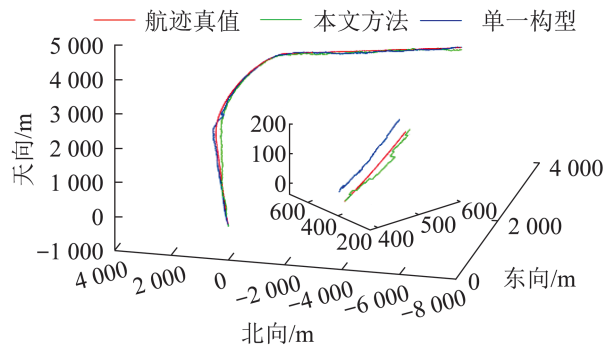


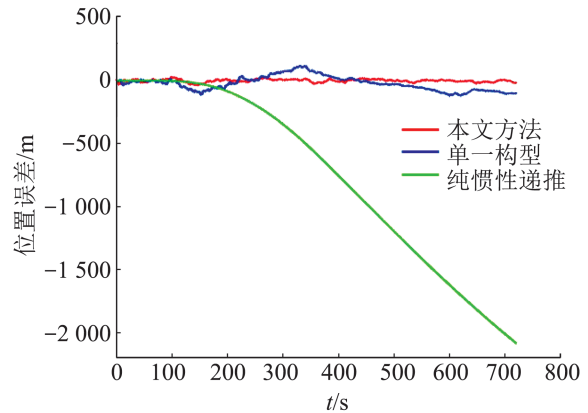
图7 从机节点1航迹真值与估计位置
Fig. 7 Slave node 1 track truth value and estimated position

图8为采用不同算法得到的从机节点1位置误差。由图8可知,相对于从机节点纯惯性位置递推,采用单一构型的协同定位算法能够有效抑制从机节点定位误差的累积发散。然而,本文方法考虑了从机节点与协同节点的空间构型,从机节点能够获得相对于单一构型更好的定位精度。为了定量对比分析本文算法相对于传统单一构型协

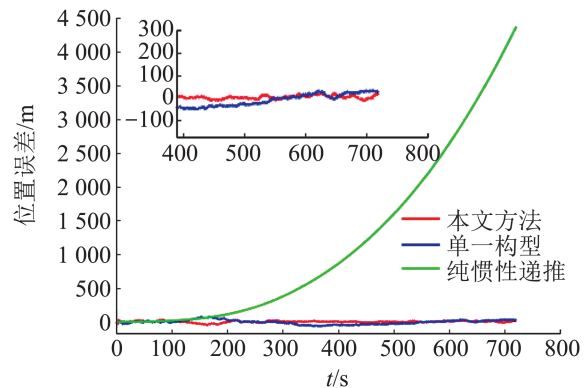
同定位算法性能,表3给出了采用2种算法下从机节点三维位置误差均方根,计算式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{x}_i - \hat{x}_i)^2} \quad (35)$$

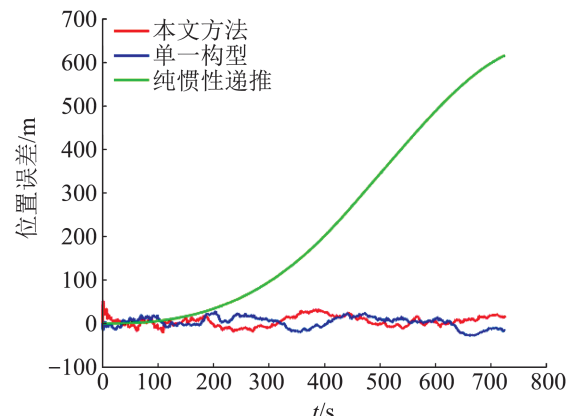
式中: E_{RMS} 为指位置误差均方根RMSE; \bar{x} 为从机节点1位置的真值; \hat{x} 为从机节点位置的估计值; N 为数据个数。



(a) 经度



(b) 纬度



(c) 高度

图8 不同算法从机节点1位置误差
Fig. 8 Position error of slave node 1 of different algorithms

表3 不同构型下从机节点三维位置误差RMSE

Table 3 RMSE of 3D position error of slave node under different configuration

节点	单一构型	最优构型	节点	单一构型	最优构型
1	63.62	38.01	6	90.88	52.95
2	69.47	35.04	7	69.15	37.36
3	62.45	34.06	8	63.48	40.07
4	62.45	39.30	9	64.03	39.34
5	70.69	42.81	10	62.11	33.81

由表3数据可知, 相比传统的单一构型方法, 本文方法可以显著提高从机节点定位精度, 从机节点位置精度平均提升了约42.05%, 进一步验证了本文方法的有效性。

4 结论

基于无线测距信息辅助实现集群无人机协同导航的需求日益增加, 但是传统方法未考虑空间构型对集群无人机协同导航信息的影响。为此, 本文提出了一种基于空间构型优选的5G集群无人机协同导航方法。

(1) 本文首先构建了基于5G信号的相对测距误差模型及基于GDOP的协同导航节点寻优策略以补偿和筛选网络中的协同导航信息。

(2) 本文设计了基于5G的协同导航滤波器, 可以有效抑制惯性测量单元的误差累积, 提升集群无人机的协同定位精度。最终仿真试验结果表明, 基于本文提出的算法可以显著提升从机节点的定位精度, 平均提升了42.05%, 从而有效保证了卫星拒止条件下集群无人机的协同导航性能。

(3) 本文所建立的基于5G信号的相对测距误差模型仍需补偿完善, 以适应更加复杂多变的应用场景。

参考文献:

[1] 冯远博, 王冰切, 赵上. 电子对抗无人机蜂群组建构想[J]. 飞航导弹, 2021(10): 47-51.
[2] 郑期兼. 无人机技术在测绘测量中的应用分析[J]. 科技与创新, 2014(5): 40-41.
Zheng Qijian. Application of UAV Technology in Mapping Measurement[J]. Science and Technology &

Innovation, 2014(5): 40-41.
[3] 徐华东. 无人机电力巡线智能避障方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
Xu Huadong. Research on Intelligent Obstacle Avoidance Methods for Power Lines Inspection with UAVs[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
[4] 邹立岩, 张明智, 荣明. 智能无人机集群概念及主要发展趋势分析[J]. 战术导弹技术, 2019(5): 1-11, 43.
Zou Liyan, Zhang Mingzhi, Rong Ming. Analysis of Intelligent Unmanned Aircraft Systems Swarm Concept and Main Development Trend[J]. Tactical Missile Technology, 2019(5): 1-11, 43.
[5] Rhudy M B, Gu Yu, Napolitano M R. Low-cost Loosely-coupled Dual GPS/INS for Attitude Estimation with Application to a Small UAV[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2013: 1-9.
[6] Hu Gao, Gao Shengeng, Zhong Yongmin. A Derivative UKF for Tightly Coupled INS/GPS Integrated Navigation[J]. ISA Transactions, 2015, 56: 135-144.
[7] 史殿习, 刘聪, 余馥江, 等. GPS拒止环境下基于定位信度的多无人机协同定位方法[J]. 计算机科学, 2022, 49(4): 302-311.
Shi Dianxi, Liu Cong, She Fujiang, et al. Cooperation Localization Method Based on Location Confidence of Multi-UAV in GPS-denied Environment[J]. Computer Science, 2022, 49(4): 302-311.
[8] Ibrahim Yassine Nouali, Zohra Slimane, Abdelhafid Abdelmalek. Change Point Detection-based TOA Estimation in UWB Indoor Ranging Systems[C]//2022 45th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 329-332.
[9] Seong Han Cho, Sang Rae Yeo, Heon Ho Choi, et al. A Design of Synchronization Method for TDOA-based Positioning System[C]//2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 1373-1375.
[10] 袁杰波, 杨峰, 张共愿, 等. 无人机编队飞行导航方法及其仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(11): 64-67.
Yuan Jiebo, Yang Feng, Zhang Gongyuan, et al. A Navigation Method and Its Simulation for UAV Formation Flight[J]. Computer Simulation, 2011, 28(11): 64-67.
[11] 林国泉. 基于GNSS/UWB的无人机群分布式协同定位技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
Lin Guoquan. Research on Distributed Cooperative Localization Technology of Multi-UAVs Based on GNSS/

- UWB[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [12] 常伟明, 李永翔, 徐伯夏, 等. 无人机数据链国内外发展简介及关键技术探究[C]//第八届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集. 北京: 中国高科技产业化研究会, 2014: 34-38, 106.
- [13] 刘琪, 闫丽, 周正. UWB的技术特点及其发展方向[J]. 现代电信科技, 2009, 39(10): 6-10, 18.
Liu Qi, Yan Li, Zhou Zheng. Characteristics and Trends of UWB[J]. Modern Science & Technology of Telecommunications, 2009, 39(10): 6-10, 18.
- [14] 朱珂, 王玮, 杨露彬. "5G+无人机"技术的教与学: 场景、路径与未来应用展望[J]. 远程教育杂志, 2019, 37(4): 33-41.
Zhu Ke, Wang Wei, Yang Lubin. Teaching and Learning of "5G+Drone" Technology: Scene, Path and Future Application Prospect[J]. Journal of Distance Education, 2019, 37(4): 33-41.
- [15] 张平, 陈昊. 面向5G的定位技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5): 1-12.
Zhang Ping, Chen Hao. A Survey of Positioning Technology for 5G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(5): 1-12.
- [16] 朱树云, 姜静. 扩展卡尔曼滤波算法在导航中的应用研究[J]. 自动化应用, 2019(11): 53-54.
Zhu Shuyun, Jiang Jing. Application Research of Extended Kalman Filtering Algorithm in Navigation[J]. Automation Application, 2019(11): 53-54.