# 5G-D2D 增强的无人机集群相对 导航方法



熊骏,解相朋,周峰

南京邮电大学, 江苏 南京 210023

**摘 要:**精确的相对导航状态估计是无人机集群飞行的关键环节。针对传统无人机集群中的相对导航系统在卫星导航可用 性较差时性能下降的问题,本文提出了一种基于5G-D2D增强的无人机相对导航状态估计方案。该方案基于伪距双差量 测、5G-D2D量测特性设计了相对状态滤波器的量测模型,并基于航姿系统的输出特性设计了无人机之间的相对运动模型, 进而采用扩展卡尔曼滤波(EKF)作为估计框架融合所有导航传感信息。仿真结果表明,5G-D2D量测能够有效提升仅依赖 卫星的相对导航系统性能,且在可用卫星数目较少时提升效果更为明显。本文研究能够有效降低无人机相对导航系统对于 卫星导航的依赖,并提升相对导航状态估计精度。

关键词:无人机;相对导航;5G-D2D;伪距;航姿系统

#### 中图分类号:V249.32

#### 文献标识码:A

精确的相对位置、速度信息是无人机集群导航的关键数据,决定了集群轨迹规划<sup>[1]</sup>、协同任务执行<sup>[2]</sup>、机间协作避障等 任务执行的效率与精度。全球卫星导航系统(GNSS)被广泛 应用于无人机相对导航中,基于两架无人机的差分GNSS数据 可获得分米级的实时相对定位精度<sup>[3]</sup>。然而,GNSS易受干扰 和遮蔽等情况影响,信号多径和非视距(NLOS)现象会显著降 低差分GNSS观测的可靠性,甚至进一步放大差分观测误差, 在复杂城市环境、卫星可用数目较少等情况下可用性较差<sup>[4]</sup>。 如何在复杂环境下提升相对导航状态估计的精度与鲁棒性, 是当前无人机集群导航系统亟待解决的关键问题之一。

为提升相对导航系统精度与鲁棒性,采用多传感器融 合提升估计精度成为主流研究方向。利用惯性导航(INS)、 航姿系统(AHRS)、视觉导航(VisNav)<sup>[5]</sup>、超宽带(UWB)<sup>[6]</sup>、 激光雷达(LiDAR)<sup>[7]</sup>等传感信息的互补性,可以有效提升 系统观测冗余度与可用性。文献[8]提出了一种VisNav/ AHRS/GNSS组合的相对导航方案,基于视觉测量信息提供 额外的相对量测辅助,其估计精度优于仅采用AHRS/GNSS 的组合方案。然而该方法受制于视觉量测的可用性,在光 照不足、相邻无人机不在视场内的情况下性能将严重衰减。 文献[9]提出了一种 GNSS/UWB 组合的相对导航系统,当 GNSS数据质量较差时,采用UWB 测距信息辅助 GNSS 整

#### DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2025.03.006

周模糊度的解算,结果表明该方法能够有效提升GNSS的 可靠性,进而提升系统性能。然而,该方法未针对测距信息 的NLOS和LOS情形做模型优化,存在应用局限性。

近年来,采用5G网络设备到设备(5G-D2D)<sup>10-11</sup>通信的 集群定位技术受到了广泛关注,其终端间低时延、高可靠、高 吞吐量的通信和测量特性能够有效辅助现有相对导航系统 以获得性能提升。以此为背景,本文提出了一种5G-D2D测 距信号辅助的无人机集群相对导航方法。以惯导导航系统 (AHRS)构建无人机相对运动模型,以无人机之间的5G-D2D量测、GNSS伪距双差量测建立相对量测模型,从而实 现了5G/GNSS/AHRS组合的相对导航滤波器构建。

# 1 问题定义

如图1所示,本文假设集群内任意无人机均搭载AHRS、 GNSS接收机、5G-D2D信号收发终端。其中AHRS与GNSS 接收机为无人机基本的导航传感器,5G-D2D终端能够实现两 架无人机之间的测距与数据通信。为实现相对导航状态估 计,两架无人机需要彼此通信导航传感信息和估计数据。

# 1.1 观测模型

1.1.1 GNSS 相对差分量测

本文采用GNSS伪距差分作为相对量测,GNSS伪距主

收稿日期: 2024-08-24;退修日期: 2024-11-04;录用日期: 2025-01-06 基金项目:航空科学基金(2022Z0220X9001)

引用格式: Xiong Jun, Xie Xiangpeng, Zhou Feng. 5G-D2D enhanced relative navigation method for UAV swarm[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(03):48-53. 熊骏,解相朋,周峰.5G-D2D 增强的无人机集群相对导航方法[J]. 航空科学技术, 2025, 36(03):48-53.



Fig.1 Relative positioning scenario and sensor configurations

要由两部分组成:无人机与卫星之间的真实距离、来自多种 传播误差源的量测误差。通常可表示为<sup>[12]</sup>

$$\tilde{\rho}_{a,i} = d_{a,i} + b_a + b_i + \varepsilon_{a,i} + \zeta_{a,i} \tag{1}$$

式中, $d_{a,i}$ 为无人机 $\alpha$ 与卫星i之间的真实距离; $b_{\alpha}$ 和 $b_{i}$ 分别为 无人机 $\alpha$ 接收机钟差与卫星i卫星钟差所导致的伪距误差;  $\varepsilon_{a,i}$ 为电离层、对流层传输时延; $\zeta_{a,i}$ 为GNSS接收机处理噪声。

在相对导航中, GNSS 伪距通常采用双差以去除钟差 和传输误差。假设无人机α、β能够同时观测到卫星*i*、*j*, 相 应的GNSS 双差伪距(见图2)可表示为

 $\nabla \Delta \tilde{\rho}_{a\beta,ij} = (\tilde{\rho}_{a,j} - \tilde{\rho}_{\beta,j}) - (\tilde{\rho}_{a,i} - \tilde{\rho}_{\beta,i}) = (e_j - e_i)^{\mathsf{T}} r_{a\beta} + \zeta_{a\beta,ij}$  (2) 式中,  $e_i 和 e_j$ 分别为无人机  $\alpha$ 、 $\beta$  中点相对于卫星 i、j 的方向 余弦矢量;  $r_{a\beta}$ 为无人机  $\alpha$ 、 $\beta$  的真实相对位置矢量;  $\zeta_{a\beta,ij}$ 为双 差过程中无法通过作差消除的 GNSS 噪声。

1.1.2 5G-D2D测距量测

5G-D2D技术是蜂窝通信体制下端到端的无线通信技术,又称Sidelink通信<sup>[10]</sup>,拥有专用授权的通信频段,可在无网络基础设备覆盖区域进行直连通信。出于其低功耗、低时延、高可靠特性,本文选择5G-D2D作为无人机之间相对量测与通信的手段,其量测信息包含时间到达(TOA)与接收信号强度(RSS)两类<sup>[13]</sup>。

(1)TOA测距

假设 D2D 测距信号附带时间戳 t<sub>0.q6</sub>,则 TOA 测量值 t<sub>q6</sub> 可表示为

$$\tilde{t}_{\alpha\beta} = t_{0,\alpha\beta} + \frac{d_{\alpha\beta}}{c} + \delta_{\alpha\beta}$$
(3)

此处, $d_{\alpha\beta} = \| \mathbf{r}_{\alpha\beta} \|$ 为无人机 $\alpha_{\beta}$ 之间的真实相对距离;c为光速; $\delta_{\alpha\beta}$ 为TOA同步误差,服从零均值高斯分布。从而





可获得5G-D2D的TOA测距模型

$$\tilde{d}_{a\beta}^{\text{TOA}} = \left(\tilde{t}_{a\beta} - t_{0,a\beta}\right)c = \left\| \mathbf{r}_{a\beta} \right\| + c\delta_{a\beta}$$
(2)RSS 测距
(4)

由于无人机飞行环境通常处于净空,且相对导航无人 机之间的距离较为接近,因此本文采用无阴影衰落的自由 空间损耗模型<sup>[14]</sup>描述5G-D2D信号强度的损耗

$$PL_{\alpha\beta} = 20\log\left(\tilde{d}_{\alpha\beta}^{RSS}\right) + 32.4 + 20\log\left(f_c\right)$$
(5)

式(5)描述了RSS测距结果 $\tilde{d}_{a\beta}^{RSS}$ 与5G信号路径损失之间的关系,其中 $f_c$ 为信号载波频率。对应的平缓衰落系数 $\kappa_{a\beta}$ 为

$$\kappa_{\alpha\beta} = 10^{-\frac{\mu_{\alpha\beta}}{20}} \tag{6}$$

假设无人机 $\beta$ 向无人机 $\alpha$ 发射信号强度为 $st_{\beta\alpha}$ ,则无人机 $\alpha$ 接收的信号强度 $sr_{a\theta}$ 为

$$sr_{a\beta} = \kappa_{a\beta} st_{\beta a} + n_{a\beta}$$
 (7)  
式中, $n_{a\beta}$ 为零均值高斯白噪声。

基于式(5)~式(7),可获得基于 RSS 信息的 5G-D2D 测距模型。

#### 1.2 相对运动模型

本文采用AHRS作为无人机的姿态和加速度传感器。 以无人机 $\alpha$ 为例,AHRS能够输出姿态 $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_a$ 和比力 $\tilde{\boldsymbol{f}}_b$ 

$$\tilde{\boldsymbol{\Theta}}_{a} = \begin{bmatrix} \varphi_{a} & \theta_{a} & \psi_{a} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \delta \boldsymbol{\Theta}_{a} \tag{8}$$

$$\tilde{\boldsymbol{f}}_{b_a} = \boldsymbol{C}_{n_a}^{b_a} (\boldsymbol{a}_{n_a} + \boldsymbol{g}_{n_a}) + \delta \boldsymbol{f}_a$$
(9)

式中, $\varphi_a$ 、 $\theta_a$ 、 $\psi_a$ 分别为横滚角、俯仰角和航向角; $\delta \Theta_a = [\delta \varphi_a \ \delta \theta_a \ \delta \psi_a]^T$ 为相应的量测误差; $C_{n_a}^{b_a}$ 为导航系 $n_a$ 到机体系 $b_a$ 的转换矩阵; $a_n$ 和 $g_n$ 分别为导航系 $n_a$ 下的机体加

速度和重力加速度; $\delta f_a$ 为相应的比力测量误差。基于式 (9),可获得无人机 $\alpha$ 速度 $v_n$ 与比力之间的微分方程

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{n_a} = \boldsymbol{a}_{n_a} = \boldsymbol{C}_{b_a}^{n_a} \tilde{\boldsymbol{f}}_{b_a} - \boldsymbol{g}_n + \boldsymbol{C}_{b_a}^{n_a} \delta \boldsymbol{f}_a \tag{10}$$

式中,转换矩阵 $C_{b_a}^{n_a}$ 基于姿态计算,将AHRS的姿态观测误 差 $\delta \Theta_a$ 考虑在内,该公式可转换为

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{n_{a}} = \boldsymbol{C}_{b_{a}}^{n_{a}} \boldsymbol{f}_{b_{a}} + \boldsymbol{C}_{b_{a}}^{n_{a}} \Big[ -\boldsymbol{f}_{b_{a}} \times \Big] \begin{bmatrix} \delta \varphi_{a} \\ \delta \theta_{a} \\ \delta \psi_{a} \end{bmatrix} - \boldsymbol{g}_{n_{a}} + \boldsymbol{C}_{b_{a}}^{n_{a}} \delta \boldsymbol{f}_{a}$$
(11)

此处,转换矩阵 $C_{b_{\epsilon}}^{n_{\epsilon}}$ 基于AHRS输出姿态直接计算获得。

式(11)所述速度微分方程对于无人机 $\beta$ 同样成立,将 $\dot{v}_{n_a}$ 与 $\dot{v}_{n_a}$ 作差即可获得无人机相对运动微分方程。则无人机 $\alpha_{\lambda}\beta$ 在地心地固系(ECEF)下的相对速度微分方程为

$$\dot{\boldsymbol{v}}_{\alpha\beta} = \boldsymbol{C}_{n_{\beta}}^{e} \dot{\boldsymbol{v}}_{n_{\beta}} - \boldsymbol{C}_{n_{\alpha}}^{e} \dot{\boldsymbol{v}}_{n_{\alpha}} = \\ \boldsymbol{C}_{b_{\beta}}^{e} \boldsymbol{f}_{b_{\beta}} + \boldsymbol{C}_{b_{\beta}}^{e} \left[ -\boldsymbol{f}_{b_{\beta}} \times \right] \begin{bmatrix} \delta \varphi_{\beta} \\ \delta \theta_{\beta} \\ \delta \psi_{\beta} \end{bmatrix} + \boldsymbol{C}_{b_{\beta}}^{e} \delta \boldsymbol{f}_{\beta} - \\ \boldsymbol{C}_{b_{\alpha}}^{e} \boldsymbol{f}_{b_{\alpha}} - \boldsymbol{C}_{b_{\alpha}}^{e} \left[ -\boldsymbol{f}_{b_{\alpha}} \times \right] \begin{bmatrix} \delta \varphi_{\alpha} \\ \delta \theta_{\alpha} \\ \delta \psi_{\alpha} \end{bmatrix} - \boldsymbol{C}_{b_{\alpha}}^{e} \delta \boldsymbol{f}_{\alpha}$$
(12)

式中,上标e代表ECEF系;无人机之间地理位置靠近,因此 重力加速度相关项可忽略;转换矩阵*C<sup>e</sup><sub>b</sub>*、C<sup>e</sup><sub>b</sub>可基于无人机 单机绝对定位所输出的经度和维度计算。

# 2 5G/GNSS/AHRS 组合的相对导航状态估计 方法

本文提出的相对导航系统基于 5G/GNSS/AHRS 组合 实现,参与相对估计的两架无人机可通过 5G-D2D 通信实 现数据共享,从而完成相对导航状态估计。由于 5G-D2D 量测的非线性特性,本文采用扩展卡尔曼滤波(EKF)框架 融合所有的传感信息。

# 2.1 相对导航状态方程

定义相对导航系统的状态矢量X

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{\alpha\beta}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{r}_{\alpha\beta}^{\mathrm{T}}, \delta \boldsymbol{f}_{\alpha}^{\mathrm{T}}, \delta \boldsymbol{f}_{\beta}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(13)

式中, v<sub>ab</sub>、r<sub>ab</sub>分别为相对速度、位置矢量。

基于式(12)所述相对运动模型,可构建如下相对导航 状态方程

$$\boldsymbol{X}^{(k)} = \boldsymbol{F}^{(k)} \boldsymbol{X}^{(k-1)} + \boldsymbol{B}^{(k)} \boldsymbol{U}^{(k)} + \boldsymbol{G}^{(k)} \boldsymbol{W}^{(k)}$$
(14)

此处,k为滤波周期;F为状态转移矩阵;B为控制系数 矩阵;U为控制量;G为噪声投影矩阵;W为系统噪声。各 项定义如下

$$F = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_{3\times3} & \boldsymbol{\theta}_{3\times3} & -\boldsymbol{C}_{b_a}^{e} & \boldsymbol{C}_{b_{\beta}}^{e} \\ \boldsymbol{\theta}_{3\times3} & \boldsymbol{I}_{3\times3} & \boldsymbol{\theta}_{3\times3} & \boldsymbol{\theta}_{3\times3} \\ \boldsymbol{\theta}_{3\times3} & \boldsymbol{\theta}_{3\times3} & \frac{-1}{\boldsymbol{T}_{a}} & \boldsymbol{\theta}_{3\times3} \\ \boldsymbol{\theta}_{3\times3} & \boldsymbol{\theta}_{3\times3} & \boldsymbol{\theta}_{3\times3} & \frac{-1}{\boldsymbol{T}_{a}} \end{bmatrix}$$
(15)

$$U = C_{b_{\beta}}^{e} \delta f_{\beta} - C_{b_{\alpha}}^{e} \delta f_{\alpha}$$
(16)

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{3\times3} \\ \boldsymbol{\theta}_{9\times3} \end{bmatrix}$$
(17)

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{b_a}^{\mathrm{e}} [-\boldsymbol{f}_{b_a} \times] & \boldsymbol{\theta}_{3\times 3} & \boldsymbol{\theta}_{3\times 6} \\ \boldsymbol{\theta}_{3\times 3} & \boldsymbol{C}_{b_{\beta}}^{\mathrm{e}} [-\boldsymbol{f}_{b_{\beta}} \times] & \boldsymbol{\theta}_{3\times 6} \\ \boldsymbol{\theta}_{3\times 6} & \boldsymbol{I}_{3\times 3} & \boldsymbol{\theta}_{3\times 3} \end{bmatrix}$$
(18)

$$W = \begin{bmatrix} \delta f_{\alpha}^{\mathrm{T}}, \delta f_{\beta}^{\mathrm{T}}, W_{a_{\alpha}}^{\mathrm{T}}, W_{a_{\beta}}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(19)

#### 2.2 相对导航量测方程

基于本文1.1节所述的GNSS双差量测与5G-D2D量 测,可构建如下量测方程

$$\boldsymbol{Z}^{(k)} = \boldsymbol{H}^{(k)} \boldsymbol{X}^{(k)} + \boldsymbol{V}^{(k)}$$
(20)

式中,Z为量测矢量;H为量测矩阵;V为相应的量测噪声。

关于 5G-D2D 的 TOA 与 RSS 量测,两者均为非线性量测,因此需要以初始状态 *X* 为展开点进行泰勒展开处理

$$\bar{d}_{aB}^{\text{TOA}} = \tilde{d}_{aB}^{\text{TOA}} + \boldsymbol{H}_{\text{TOA}} \hat{\boldsymbol{X}} - \hat{d}_{aB}^{\text{TOA}} | \boldsymbol{x} = \hat{\boldsymbol{x}}$$
(21)

$$\bar{d}_{\alpha\beta}^{\rm RSS} = \tilde{d}_{\alpha\beta}^{\rm RSS} + \boldsymbol{H}_{\rm RSS} \hat{\boldsymbol{X}} - \hat{d}_{\alpha\beta}^{\rm RSS} |_{\boldsymbol{X}=\hat{\boldsymbol{X}}}$$
(22)

式中,**H**<sub>TOA</sub>和**H**<sub>RSS</sub>分别为TOA测距值与RSS测距值对应的线 性化量测矩阵;上标-和^分别代表线性化处理值与估计值。

因此,基于式(2)、式(21)和式(22)可构建量测矢量**Z**和 相应的噪声矢量

$$\boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} \cdots, \nabla \Delta \tilde{\rho}_{\alpha\beta, ij}, \cdots, \bar{d}_{\alpha\beta}^{\text{TOA}}, \bar{d}_{\alpha\beta}^{\text{RSS}} \end{bmatrix}^{\text{T}}$$
(23)

$$V = \left[ \cdots, \zeta_{\alpha\beta, ij}, \cdots, V_{\text{TOA}}, V_{\text{RSS}} \right]^{\dagger}$$
(24)

式中, $\zeta_{a\beta,ij}$ 为GNSS双差噪声; $V_{TOA}$ 和 $V_{RSS}$ 分别为5G-D2D的TOA与RSS测距噪声。

相应的量测矩阵为

$$\boldsymbol{H} = \left[\boldsymbol{H}_{dd}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{H}_{\mathrm{TOA}}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{H}_{\mathrm{RSS}}^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}$$
(25)

其中,GNSS 双差量测子矩阵H<sub>dd</sub>为

$$\boldsymbol{H}_{dd} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \boldsymbol{\theta}_{1\times 3} & \boldsymbol{e}_j - \boldsymbol{e}_i & \boldsymbol{\theta}_{1\times 6} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$
(26)

TOA与RSS测距量测子矩阵分别为

$$\boldsymbol{H}_{\text{TOA}} = \left[\boldsymbol{\theta}_{1\times3}, \frac{\partial d_{\alpha\beta}^{\text{TOA}}}{\partial \boldsymbol{r}_{\alpha\beta}}, \boldsymbol{\theta}_{1\times6}\right]$$
(27)

$$\boldsymbol{H}_{\text{RSS}} = \left[\boldsymbol{\theta}_{1\times3}, \frac{\partial d_{\alpha\beta}^{\text{RSS}}}{\partial \boldsymbol{r}_{\alpha\beta}}, \boldsymbol{\theta}_{1\times6}\right]$$
(28)

构建量测方程(20)后,结合状态方程(14),即可采用 EKF框架进行多源融合估计,实现无人相对导航状态解算。

# 3 仿真分析

# 3.1 仿真条件设置

无人机α按照如图3所示轨迹飞行,无人机β对α进行 伴飞,单机采用AHRS/GNSS组合导航定位,轨迹时长 3000s。表1列出了无人机所搭载导航传感器的仿真参数, GNSS与5G-D2D量测噪声均考虑为加性高斯白噪声。

设定两架无人机的可见卫星数为8,所采用的对照组为: (1)5G/GNSS/AHRS:本文所提出的方法,采用5G-D2D量 测、GNSS双差量测构建量测模型;(2)GNSS/AHRS:仅采用 GNSS双差构建相对量测模型,性能优于传统相对差分技 术;(3)5G/AHRS:仅采用5G-D2D量测构建相对量测模型。



表1 传感器参数设置

Table 1 Sensor configurations

传感器	参数	数值
AHRS	姿态白噪声误差	0.5(°)/h
	姿态一阶马尔可夫随机噪声	0.5(°)/h
	姿态一阶马尔科夫相关时间	60s
	加速度一阶马尔科夫零偏误差	0.001g
	加速度一阶马尔科夫相关时间	3600s
GNSS	伪距标准差	3m
TOA	测距噪声标准差	0.1m
RSS	测距噪声标准差	1m

# 3.2 仿真结果与数据分析

图4~图6分别对比了三组算法在ECEF系下X、Y、Z方向的相对位置估计误差。5G-D2D量测辅助的相对导航系统具备最佳相对估计精度,以Y方向位置误差为例,5G/GNSS/AHRS的RMSE为0.17m,优于GNSS/AHRS的0.73m和5G/

AHRS的1.08m;相比于5G-D2D量测,GNSS双差能够提供 更好的可观测性,因此GNSS/AHRS性能优于5G/AHRS。 具体对比数据详见表2。

表2 相对导航精度对比

Table 2 Comparison between relative positioning accuracy

误差	RMSE/m		
(ECEF)	5G/GNSS/AHRS	GNSS/AHRS	5G/AHRS
X方向	0.31	0.41	0.72
Y方向	0.17	0.73	1.08
Z方向	0.30	0.44	2.82



Fig.4 Relative positioning error comparison in X direction





为验证可用卫星较少时,5G-D2D量测对相对导航系 统的提升效果,图7~图9对比了5G/GNSS/AHRS和GNSS/ AHRS两个控制组在4颗可用卫星条件下的性能。数据结 果表明,5G-D2D量测辅助的相对导航状态估计精度显著 优于仅采用GNSS双差量测的情况。由于5G-D2D量测的 存在,所提出的5G/GNSS/AHRS并未出现明显的性能衰 减;GNSS/AHRS则因为量测冗余度的下降出现了明显的 性能降低。相比于无5G-D2D辅助的系统,本文所提出的 5G/GNSS/AHRS组合在*X、Y、Z*三个方向的RMSE精度分别 降低409%、1545%、342%。具体的对比数据详见表3。



Fig.6 Relative positioning error comparison in Z direction

表3 相对导航精度对比(4颗可用卫星)



误差	RMSE/m	
(ECEF)	5G/GNSS/AHRS	GNSS/AHRS
X方向	0.32	1.31
Y方向	0.20	3.09
Z方向	0.38	1.30





Fig.7 Relative positioning error comparison in *X* direction (4 available satellites)











#### 4 结束语

本文提出了一种5G-D2D量测信号辅助的相对导航方案,融合5G-D2D的RSS和TOA量测、GNSS双差量测以及AHRS系统模型以增强传统相对导航系统的性能。仿真结果表明,5G-D2D能够有效提升仅依赖GNSS的相对导航性能,在可用卫星数较少时性能提升更为明显。

相比于AHRS,惯性导航系统在无人机导航系统中应用 更为广泛,后续将进一步研究基于相对惯性模型的相对导航 方法,从而简化系统模型;此外,本文方案仅适用于两架无人 机应用,在多机环境下状态方程的扩维会引入较大计算量, 后续将进一步研究适用于多机场景的相对导航方法。 [AST

# 参考文献

 李家伟,张洪欣,徐瑞林.基于脑机接口的无人机编队控制系 统设计[J]. 航空科学技术, 2023, 34(2): 104-110.
 Li Jiawei, Zhang Hongxin, Xu Ruilin. Design of UAV formation control system based on brain-computer interface

data[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(2): 104-110.(in Chinese)

[2] 卢晓东,王一鸣,王伟.通信约束下UAV集群协同拦截任务 分配算法[J]. 航空科学技术, 2024, 35(4): 18-24.

Lu Xiaodong, Wang Yiming, Wang Wei. Multi-target assignment methods for UAV swarm under communication constraints [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(4): 18-24.(in Chinese)

[3] Wang Jiafu, Yu Xianwen, Guo Shusen. Inversion and characteristics of unmodeled errors in GNSS relative positioning[J]. Measurement, 2022, 195: 111151.

- [4] Wen Weisong, Li-Ta H. 3D LiDAR aided GNSS NLOS mitigation in urban canyons[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(10): 18224-18236.
- [5] 胡启阳,王大轶.采用双目视觉的非合作空间目标相对导航 与惯性参数辨识方法[J]. 宇航学报, 2020,41(11):41.
  Hu Qiyang, Wang Dayi. Relative navigation identification of inertia parameters of non-cooperative space target based on stereo vision[J]. Journal of Astronautics, 2020,41(11):41. (in Chinese)
- [6] Cossette C C, Mohammed S, David S, et al. Relative position estimation between two UWB devices with IMUs[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(3): 4313-4320.
- [7] Pritzl V, Matouš V, Petr S, et al. Cooperative navigation and guidance of a micro-scale aerial vehicle by an accompanying UAV using 3D LiDAR relative localization[C].2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2022: 526-535.
- [8] Wang Xiaogang, Cui Naigang, Guo Jifeng. INS/VisNav/GPS relative navigation system for UAV[J]. Aerospace Science & Technology, 2013, 28(1): 242-248.
- [9] Mohanty A, Asta W, Sriramya B, et al. Precise relative positioning via tight-coupling of GPS carrier phase and

multiple UWBs[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 5757-5762.

[10] 尹婷.面向5G端到端的协同定位技术研究[D].西安:中国科 学院大学,2022.

Yin Ting. Research on cooperative localization technologies for 5G device to device[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)

- Bei Zhou, Liu Zhitao, Su Hongye. 5G networks enabling cooperative autonomous vehicle localization: a survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25 (11): 15291-15313.
- [12] Kaplan E D, Christopher H. Understanding GPS/GNSS: principles and applications[M]. US: Artech House, 2017.
- [13] Khan M A, Nasir S, Arbab W A, et al. Location awareness in 5G networks using RSS measurements for public safety applications[J]. IEEE Access, 2017, 5: 21753-21762.
- [14] Dammann A, Ronald R, Zhang Siwei. On prospects of positioning in 5G[C]. 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), 2015: 1207-1213.

# 5G-D2D Enhanced Relative Navigation Method for UAV Swarm

#### Xiong Jun, Xie Xiangpeng, Zhou Feng

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

**Abstract:** Precise relative navigation state estimation is a key step for unmanned aerial vehicle (UAV) formation flight. To address the performance degradation issue of relative navigation systems in traditional UAV swarms under poor satellite navigation availability, this paper introduces an enhanced UAV relative navigation state estimation method utilizing 5G–D2D communications. The proposed method designs an observation model for the relative state filter, based on double-differenced pseudorange measurements and 5G–D2D measurements. Additionally, a relative motion model between UAVs is constructed based on the characteristics of the attitude and heading reference system (AHRS). Subsequently, an Extended Kalman Filter (EKF) is employed as the estimation framework to integrate all navigation sensor information. Simulation results reveal that 5G–D2D measurements can significantly improve the performance of relative navigation systems that solely rely on satellites, with a more pronounced enhancement when fewer satellites are available. This work can effectively reduce the reliance of UAV relative navigation systems on GNSS and enhance the accuracy of relative navigation estimation.

Key Words: UAV; relative navigation; 5G-D2D; pseudorange; AHRS

Received: 2024-08-24; Revised: 2024-11-04; Accepted: 2025-01-06 Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2022Z0220X9001)