

无人机集群组网高精度测距技术研究

尤星语^{1,2}, 闫朝星², 付林罡², 李世宝¹

(1 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580;

2 北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 针对无人机组网系统机间测距精度受限于时域采样周期时延估计的问题, 本文提出一种联合正交频分复用 (OFDM) 前导序列和导频序列进行高精度测距估计的方法, 利用最大似然估计和双向测距法将参与计算的序列测距估计结果按比例进行加权平均。同时, 仿真分析了联合测距估计方法性能。结果表明: 联合估计方法的前导与导频序列差分自相关间隔长度取典型值时测距精度能达到 0.1 m 以下, 可在较低信噪比下实现厘米级测距精度, 提升了集群组网测距的稳定性。

关键词: OFDM; 测距; 数据联合; 时延估计

中图分类号: TN929.5; V279

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2023)05-0059-05

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230504001

引用格式: 尤星语, 闫朝星, 付林罡, 等. 无人机集群组网高精度测距技术研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(5): 59–63.

Study on highly precise ranging method in UAV cluster network system

YOU Xingyu^{1,2}, YAN Chaoxing², FU Lingang², LI Shibao¹

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Aiming at the problem that the accuracy of ranging within UAV cluster networking system is limited by the time delay estimation of sampling period in time domain, this paper proposes a method of high precision ranging estimation by combining OFDM preamble sequence and pilot sequence. The maximum likelihood estimation and two-way ranging method are used to carry out weighted average of the estimated results of the sequence ranging. At the same time, the performance of joint ranging estimation method is analyzed by simulation. The simulation results show that the ranging accuracy of the joint estimation method can reach below 0.1 m when the typical values of the difference autocorrelation interval length of the preamble and pilot sequences are taken, and the centimeter-level ranging accuracy can be achieved at a low signal-to-noise ratio, which improves the stability of the ranging of the UAV cluster network.

Keywords: OFDM; Ranging; Data joint; Time delay estimation

Citation: YOU Xingyu, YAN Chaoxing, FU Lingang, et al. Study on highly precise ranging method in UAV cluster network system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(5): 59–63.

引 言

无人集群协同任务以高机动、低成本等优势使其在军用和民用领域获得广泛关注^[1]。集群节点间高精度测距采用正交频分复用 (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM) 信号时频估计方法, 具有抗多径和窄带噪声的良好特性^[2]。组网数据链的无线电测距技术能够在导航拒止环境下为网内成员提供测距结果以辅助完成组网定

位, 有效提高了网络的鲁棒性, 其中采用 OFDM 信号的组网系统中, 通过估计信号的时延相位信息获取测距值调整^[3], 包含整数倍采样和小数倍采样率相位偏移估计, 分别在时域和频域估计参数获得测距值。文献[4]设计 OFDM 信号和导航信号的通导融合定位方案, 通导融合体制测距精度可达 0.9 m^[5,6]。文献[7]与文献[8]都利用了迭代的思想来提高测距精度, 文献[9]将神经网络引入测距估计领域; 文献[10]通过每次迭代增大用于估计的连

续自载波采样点数来逼近真实距离; 文献[11]利用最佳轨迹匹配相位噪声补偿算法降低相位噪声对测距的影响, 通过比较分段后系统相位噪声和参考码本对比得到最近似相位噪声估计, 但是最终的测距精度受到相位噪声轨迹量化数量和采样点分段数量的限制, 且算法复杂度高, 工程实现难度大; 文献[12]从速度和距离两个维度, 利用LSW将二维问题转化成一维问题求解最优距离估计, 速度传感器的误差会对最终测距结果造成影响。本文面向无人机集群组网系统高精度测距需求, 提出一种联合OFDM前导与导频序列的时频二维加权测距方法, 仿真表明该方法可有效提升测距精度。

1 OFDM 系统测距

OFDM组网系统中经过 N_s 点的快速逆傅里叶变换IFFT将已调信号映射到基带各子载波上, 得到采样后的时域信号, 在发端OFDM等效基带信号可以表示为

$$x(n) = \sum_{k=1}^{N_s} X_k e^{j2\pi k \Delta f n T_s}, n = -cp, \dots, 0, 1, \dots, N_s - 1 \quad (1)$$

式中, cp 为OFDM符号循环前缀长度, X_k 为第 k 路子载波上的调制数据, N_s 为系统子载波总数, Δf 为子载波间隔, T_s 为采样周期。经由高斯多径信道在接收端的等效基带信号 $r(n)$ 分别表示为

$$r(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l)y(n-\tau-l) + w(n), y(n) = x(n)e^{j2\pi f_c n T_s} \quad (2)$$

其中, $h(l)$ 为信道脉冲响应, L 为信道多径数, τ 为传输时延, $w(n)$ 平均值为0, 方差为 σ^2 的复加性高斯白噪声。

系统OFDM传输帧共包含12个OFDM符号, 其中每帧第一个符号为前导符号。前导符号有效子载波中, 偶数子载波填0, 奇数子载波填入具有良好相关特性的M序列。除前导外的其他符号采用梳状导频结构, 在不携带导频的子载波上传输数据, 导频序列占用的通信资源相对于系统通信总开销的比例可通过调节梳状导频的间隔来改变。

集群组网采用动态时分多址(TDMA)方式, 网内节点按照自身节点号占用相应时隙, 并在自身时隙内完成收发切换, 节点间测距可通过双向飞行时间TW-TOF(Two-way Time of Flight)实现, 信号在收发终端之间往返传播, 通过计算收发时间差得到两节点间距离^[1], 组网时隙结构以及OFDM

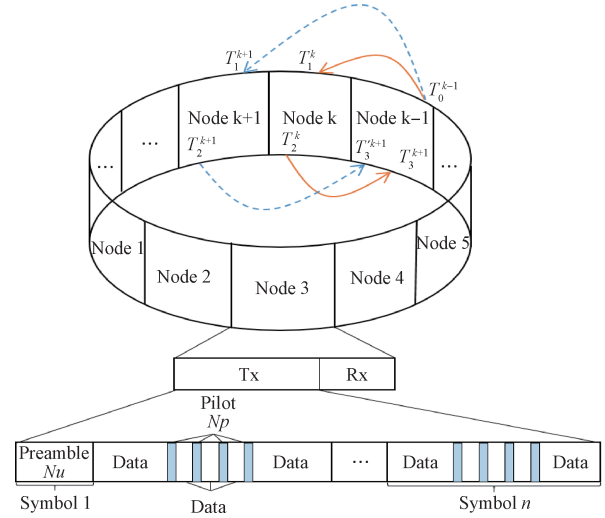


图1 组网时隙及OFDM系统帧结构示意图

Fig.1 Structures of UAV Network time slot and OFDM frame

系统帧结构如图1所示, 图中一组线形相同的往返箭头代表一次测距信号握手。两个节点传输测距申请信号时, 节点A信息帧在 T_0^A 时刻发出, 在 T_1^B 时刻到达节点B, 节点B经过解调, 填充自身数据信息以及组帧调制后在 T_2^B 时刻发出信息帧, 节点A在 T_3^A 时刻收到节点B的回传信息, 此时测距结果可以表达为

$$\hat{d} = \frac{ctT}{2} = \frac{c[(T_3^A - T_0^A) - (T_2^B - T_1^B)]}{2} \quad (3)$$

式中, c 为光速, 取值为 3×10^8 m/s, T 的上标A, B分别代表节点A和节点B的独立参考时钟域。对于OFDM组网信号, 上式传输时延倍数 τ 由整数时延倍数 τ_i 和小数时延倍数 $\tau_f = \tau - \tau_i$ 组成, 整数倍时延可通过检测本地信号和接收信号的相关峰得到, 而小数倍采样率时延的精确估计是高精度测距性能的关键。前导序列作为一个完整的OFDM符号, 占用的有效子载波数较多; 梳状导频结构特性可将 τ_f 系数进行可调倍数放大。故联合两种不同结构的数据可提高系统测距精度。

2 联合OFDM前导与导频的测距方法

OFDM频域信号小数倍时延倍数 τ_f 的估计方法是计算每符号时延量的最大似然(ML)估计, 并将估计结果依据OFDM帧结构中前导与导频序列符号数量关系进行加权得到最终联合估计结果。在接收端经过信道均衡并补偿整数倍时延 $\tau_i T_s$ 后, 整帧基带信号 s 可以表示为

$$s = [x'_1, x'_2, \dots, x'_{N_n}] + V = \sum_{n=1}^{N_s} \left(\sum_{k=1}^{N_s} c_k e^{j2\pi k \Delta f (1 \cdot n + \tau_f) T_s} \right), \dots, \sum_{n=1}^{N_s} \left(\sum_{k=1}^{N_s} c_k e^{j2\pi k \Delta f (N_n \cdot n + \tau_f) T_s} \right) + V \quad (4)$$

式中, $[x'_1, x'_2, \dots, x'_{N_n}]$ 表示含有小数倍时延信息的 OFDM 符号集合, 其中, N_n 表示一帧中包含的符号总数, n 表示采样点数, 采样周期 $T_s = T/N_s$, T 表示 OFDM 符号周期, N_s 表示自载波总数, c_k 表示 QPSK 调制信号, V 表示复高斯白噪声向量, $V = [v_1, v_2, \dots, v_{N_n}]$ 。

包含小数倍时延信息的 OFDM 采样信号在消除调制信息后表示为 $z(n)$, $n=0, 1, \dots, N_s-1$, 再利用 FFT(Fast Fourier Transform, 快速傅里叶变换)转换到频域, 得到含噪声信号的频域表示如下。

$$F_{\text{FFT}}[z(n)] = \sum_{k=1}^{N_s} Z_k e^{-j2\pi k \Delta f n T_s} + \sum_{k=1}^{N_s} v'_k = \sum_{k=1}^{N_s} e^{j2\pi k \Delta f \tau_f T_s} + \sum_{k=1}^{N_s} v'_k \quad (5)$$

式中, $v'_k = v_k c_k^* e^{-j2\pi k \Delta f n T_s}$ 。将小数时延项表示为 $E_k = e^{j2\pi k \Delta f \tau_f T_s}$, 则针对接收信号中每个符号的小数倍时延倍数 $\hat{\tau}_f$ 的最大似然方程可表示为

$$\Lambda(\hat{\tau}_f) \triangleq \sum_{n=1}^{N_s} \arg \left\{ \sum_{k=1}^{N_s} \sup p(E_k | \tau_f) \right\} \triangleq \sum_{n=1}^{N_s} \arg \left\{ \left| \sum_{k=1}^{N_s} E_k e^{-j2\pi k \Delta f \tau_f T_s} \right|^2 \right\} \quad (6)$$

式中, $p(E_k | \tau_f)$ 表示给出 τ_f 的条件下 E_k 的概率密度函数。上述最大似然方程有解的必要条件为

$$\frac{\partial \Lambda(\hat{\tau}_f)}{\partial \tau_f} \bigg|_{\tau_f = (\hat{\tau}_f)_{\text{ML}}} = 0 \quad (7)$$

结合式(6)、(7)可得每组采样数据的最大似然估计应满足

$$\text{Im} \left[\sum_{m=0}^{N_s-1} \hat{R}(m) e^{-j \frac{2\pi m \hat{\tau}_f}{N_s}} \right] = 0 \quad (8)$$

式中, $\hat{R}(m)$ 是 E_k 的共轭差分自相关函数, 令 $v_k = v'_k$, 则 $\hat{R}(m)$ 可表示为

$$\hat{R}(m) = \sum_{k=m+1}^{N_s} (E_k + v_k)(E_{k-m}^* + v_{k-m}^*) \quad (9)$$

忽略上式噪声项, 利用一阶泰勒展开对式(8)的指数项进行线性化处理得到

$$\left\{ \sum_{m=0}^{N_s-1} \text{Im}[\hat{R}(m)] - \sum_{m=0}^{N_s-1} \frac{2\pi m \hat{\tau}_f}{N_s} \text{Re}[\hat{R}(m)] \right\} = 0 \quad (10)$$

在前导与导频数据联合测距估计中, 测距估计结果应综合考虑测距精度和算法复杂度。参与运算的前导和导频符号的数量越多, 相关运算的

序列差分自相关最大长度越长, 测距精度越高, 系统复杂度也会随之增加。因此根据场景选择符号数量和差分相关运算序列长度。

设参与测距估计的前导符号数量为 N_q , 导频符号数量为 N_d ; 前导差分自相关最大间隔长度为 L_q , 导频差分自相关最大间隔长度为 L_d 。假设 $\tau_f \ll 1$ 时, 根据 $\text{Im}[R(m)] \approx \arg[R(m)]$, $\text{Re}[R(m)] \approx 1$, 可将式(10)简化, 得到最终前导与导频联合测距估计算法表达式为

$$\hat{d} = \frac{\hat{\tau}_f c}{2} = \frac{N_s c}{2\pi(N_q + N_d)} \left[\frac{N_q \sum_{m=1}^{L_q} \arg\{\hat{R}_q(m)\}}{\mu_q L_q (L_q + 1)} + \frac{N_d \sum_{m=1}^{L_d} \arg\{\hat{R}_d(m)\}}{\mu_d L_d (L_d + 1)} \right] \quad (11)$$

其中, μ_p , μ_d 分别表示由于前导符号和导频符号的有效自载波排列方式引起的 τ_f 放大倍数。最大间隔长度的选择应兼顾参与计算的符号数量以及系统计算复杂度, 通常将间隔选取在符号总长度的 1/3 至 1/2 的范围内。由上式可得 τ_f 的估计范围应满足 $|\tau_f| < \frac{N_s}{\mu(L+1)}$, 序列有效数据排列间隔和差分间隔长度越大, 小数时延估计范围越小, 因此 μ 和 L 应依据系统性能指标进行选择。

3 性能分析与仿真结果

3.1 差分长度与导频间隔对测距精度影响分析

测距估计结果 $\hat{d}$ 受到前导差分自相关最大间隔长度 L_q 、导频差分自相关最大间隔长度 L_d 及有效数据排列间隔 μ_p , μ_d 的影响, 因此本节通过仿真讨论了以上三种参数对测距 RMSE 的影响。在信噪比分别为 5 dB、10 dB、15 dB 以及 20 dB 条件下, 序列有效数据排列间隔取 $\mu_p=2$, $\mu_d=5$, 保持导频差分自相关最大间隔长度不变, 以步长为 10 增加前导差分自相关间隔长度, 导频序列同理, 结果如图 2 所示, 经仿真验证, 前导与导频的差分自相关最大间隔长度与测距精度均呈现正相关关系, 即差分自相关间隔越大, RMSE 越小。

令两种序列差分自相关长度以及前导有效自载波间隔取固定值, 即分别取 $L_q=180$, $L_d=70$, $\mu_p=2$, 验证不同信噪比下导频有效子载波间隔 μ_d 对测

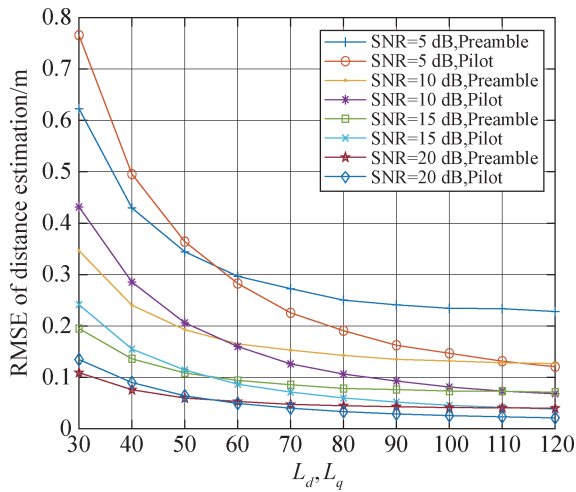


图2 差分自相关间隔长度对测距RMSE影响示意图
Fig.2 Diagram of the influence of difference length on ranging RMSE

距结果的影响。如图3所示,在相同信噪比下,导频间隔取值5的时候联合估计测距性能最优,且相比于低信噪比时,高信噪比时曲线斜率取值更大,即导频间隔的改变对测距精度的影响更大。

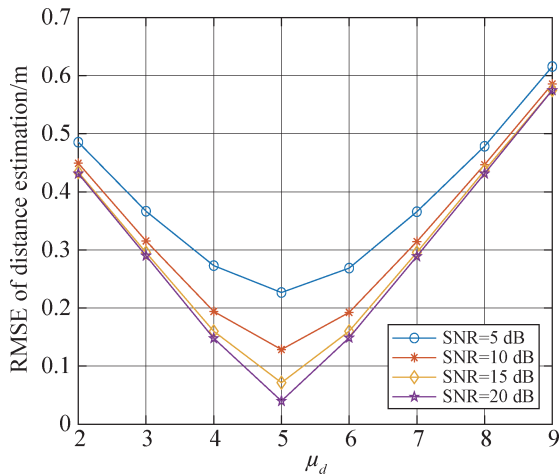


图3 导频间隔 μ_d 对测距RMSE影响示意图
Fig.3 Diagram of the influence of pilot gap on ranging RMSE

3.2 联合估计性能仿真实验结果

前导导频联合测距估计仿真参数如表1所示,OFDM前导有效自载波数 N_u 为360,结构上间隔分布;依据上节的分析导频间隔取值5,有效自载波数 N_p 为144;整帧OFDM信号共包含11个符号,其中第一个符号为前导符号,其他符号插入梳状导频结构。前导与导频联合估计的差分间隔最大长度(L_q, L_d)分别取三组典型值(120, 45), (144, 58),

(180, 70)进行验证。

表1 仿真参数表

Table 1 Simulation parameter table

参数名称	符号表示	参数取值或范围
OFDM 总载波数	N_s	1 024
前导有效载波数	N_u	360
导频有效自载波数	N_p	144
自载波间隔	Δf	15 kHz
采样频率	f_s	15.36 MHz
采样率小数倍时延	τ_f	0.08

图4所示为差分最大间隔长度为120的前导和差分最大间隔长度为45的导频两单一序列测距结果,以及三种不同差分间隔长度的前导导频联合估计的测距结果对比示意图,序列有效数据排列间隔取 $\mu_p=2, \mu_d=5$ 。由图可知,前导导频联合估计的测距性能较单一序列测距性能均有提升,且信噪比越低,联合估计的性能提升越显著。5 dB场景下联合估计较单一前导序列提升约0.2 m,较单一导频序列提升约0.1 m。

当两种序列的差分相关最大间隔长度大于等于前导序列间隔120,导频序列间隔45时,在所示信噪比范围内测距精度均能达到0.1 m以下,随着差分相关间隔的增大,测距精度提高。在信噪比较低的5 dB环境中,三种差分间隔长度组合的测距RMSE分别可以达到0.088 m, 0.078 m, 0.077 m;在15 dB的高信噪比良好通信环境下,测距RMSE分别可以达到0.042 m, 0.036 m, 0.032 m。

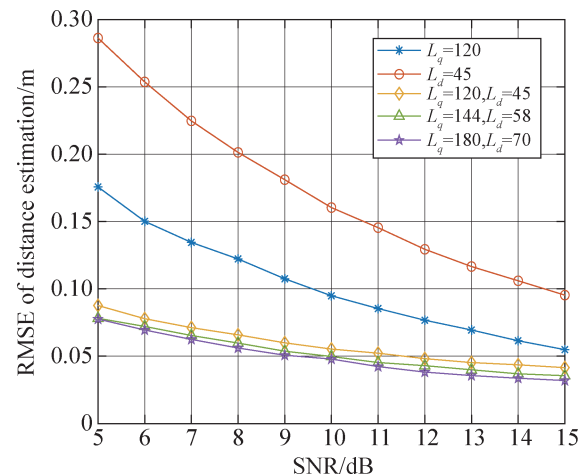


图4 单一序列与联合估计RMSE对比示意图
Fig.4 Comparison of ranging estimation RMSE between single sequence and joint sequences

在测距精度约 0.1 m 时, 差分间隔(L_q, L_d)=(120, 45)的联合估计方法较前导序列在同性能下信噪比提升约 6 dB, 较同性能导频序列信噪比提升超 10 dB, 且随着序列差分间隔的增大, 相同测距性能时的信噪比提升也随之增大, 因此, 对前导与导频的联合测距估计方法有助于提升机间测距系统在较低信噪比环境下的稳定性。

4 结束语

本文提出一种利用 OFDM 符号结构中前导与导频数据联合加权平均对小数倍采样率时延进行测距精估计的方法, 在不增加额外计算优化模块的基础上提高系统测距性能。仿真结果表明: 本方法在联合数据差分自相关最大间隔长度典型取值时, 测距精度能达到 0.1 m 以下, 在同测距性能下本方法信噪比提升大于 6 dB, 能够在较低信噪比下实现厘米级测距精度。

参考文献

- [1] 王鹏宇. 飞行器编队网络测距技术研究[J]. 遥测遥控, 2019, 40(2): 22-30.
WANG Pengyu. Research on ranging technique for spacecraft formation flying network[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(2): 22-30.
- [2] 黄明周, 过传龙, 付林罡, 等. OFDM 子载波相位差 TOA 测距方法的抗多径性能[J]. 信息通信, 2018(11): 72-75.
HUAN Mingzhou, GUO Chuanlong, QI Wangdong, et al. The multipath mitigation performance of OFDM subcarrier phase difference TOA ranging method[J]. Information & Communications, 2018(11): 72-75.
- [3] 闫朝星, 马云思, 付林罡, 等. 一种多速率 OFDM 测控系统的测距方法[J]. 遥测遥控, 2017, 38(2): 1-6.
YAN Chaoxing, MA Yunsi, FU Lingang, et al. A ranging method for multi-rate OFDM tt&c system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017, 38(2): 1-6.
- [4] 邓中亮, 王翰华, 刘京融. 通信导航融合定位技术发展综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 15-25.
DENG Zhongliang, WANG Hanhua, LIU Jingrong. Status and trend of communication-navigation integrated positioning technology[J]. Navigation Positioning & Timing, 2022, 9(2): 15-25.
- [5] 苏静芳, 苏佳, 易卿武. TC-OFDM 体制下梳状导频通导融合测距算法[C]//第十三届中国卫星导航年会, 北京, 2022.
- [6] 苏静芳, 苏佳, 易卿武, 等. 基于梳状导频的通导融合测距优化配置方法[J]. 无线电工程, 2022, 52(3): 492-498.
SU Jingfang, SU Jia, YI Qingwu, et al. Optimal configuration methods of comb-type pilot based integrated communication and navigation ranging[J]. Radio Engineering, 2022, 52(3): 492-498.
- [7] 孙垂强. OFDM 测距技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [8] 白云. 多载波测距系统与 TOA 估计算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [9] 袁江伟. OFDM 高精度测距中相位噪声补偿技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [10] 秦娟. 无人机目标定位与位置部署算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [11] 李晓辉, 谢羿, 石潇竹, 等. OFDM 测距中的最佳轨迹匹配相噪补偿算法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(3): 704-710.
LI X H, XIE Y, SHI X Z, et al. Phase noise compensation algorithm based on trajectory matching in OFDM ranging[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(3): 704-710.
- [12] WANG X, ZHANG Z, NAJAFABADI H E. Range and velocity estimation for multi-symbol OFDM-based integrated radar and communications systems[C]//Proceedings of the 2021 CIE International Conference on Radar (Radar), 2021.

[作者简介]

- 尤星语 1999 年生, 硕士研究生。
闫朝星 1985 年生, 博士, 研究员。
付林罡 1982 年生, 硕士, 研究员。
李世宝 1978 年生, 硕士, 教授。

(本文编辑: 潘三英)