

# 适用于无人集群的通感一体化测距技术研究

闫朝星<sup>1</sup>, 杨玖文<sup>2</sup>, 尤星语<sup>1</sup>, 付林罡<sup>1</sup>, 刘昊<sup>1</sup>

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076;

2 太原卫星发射中心 太原 030045)

**摘要:** 空天地一体化多接入和通感一体化融合将是 6G (第六代移动通信系统) 的核心关键能力, 针对通信辅助感知时基于通信波形的一体化波形发展需求, 在无人机集群接入网中提出一种 SC-FDE (单载波频域均衡) 通感一体化波形的组帧方法, 以及采用 4 倍过采样和 2 倍过采样时的高精度机间组网测距方法, 用于提升集群组网的协同定位能力。通过仿真分析该通信波形的测距性能, 结果表明: 两种测距方法统计性能可以在信噪比为 10 dB 时达到根均方误差为 0.1 m, 且 2 倍过采样信号测距时比采用 4 倍过采样计算方法的性能更接近理论门限值。

**关键词:** 无人集群; 通感一体; 组网测距; SC-FDE

**中图分类号:** TN929.5; V279

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-1000(2024)02-0037-05

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20230801001

**引用格式:** 闫朝星, 杨玖文, 尤星语, 等. 适用于无人集群的通感一体化测距技术研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(2): 37-41.

## Ranging Method with Integrated Sensing and Communication Signals for UAV Cluster

YAN Chaoxing<sup>1</sup>, YANG Jiuwen<sup>2</sup>, YOU Xingyu<sup>1</sup>, FU Lingang<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030045, China)

**Abstract:** Space-air-ground access integrating, integrated sensing and communication (ISAC) will be the key capabilities in 6G. This paper studies an SC-FDE ISAC signal framing method in UAV networking to meet the requirement of communication-aided sensing based on the communication signals. Additionally, the high-precision ranging methods for UAV clusters with 4 and 2 samples per symbol are proposed to improve the cooperative localization performance in the UAV cluster network. After extensive simulations, we found that these two ranging methods could achieve a performance of RMSE=0.1 m at SNR=10 dB. Furthermore, the 2 samples per symbol ranging method outperforms the 4 samples method, and gets closer to the CRB theoretical performance bound.

**Keywords:** UAV cluster; Integrated sensing and communication; Networked ranging; SC-FDE

**Citation:** YAN Chaoxing, YANG Jiuwen, YOU Xingyu, et al. Ranging Method with Integrated Sensing and Communication Signals for UAV Cluster[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(2): 37-41.

### 0 引言

第五代移动通信系统(5G)通过增强型移动宽带(eMBB)、大规模机器类通信(mMTC)与高可靠低时延通信(uRLLC)这三大突破性技术来实现万物互联的目的。5G通信感知的范畴比较有限, 6G将原生地支持通信、感知和计算服务, 发展“空-天-地”一体化多接入能力、“通-感-算”一体化融合服务

能力和“云-边-端”一体化协同计算能力等关键核心能力, 将支撑 6G 成为未来社会高效可持续发展的网络信息底座<sup>[1]</sup>。通信感知一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)可以根据通信与感知间的相互关系分为通信辅助感知类业务和感知辅助通信类业务, 通信辅助感知时将通信参考信号作为感知信号, 实现目标定位、测速、手势识别等业务; 感知辅助通信时, 通过无线感知

技术对无线通信环境及通信节点进行探测感知, 辅助通信系统对信道估计、均衡、波束管理等模块进行算法选择、算法参数设置及算法优化<sup>[2]</sup>。通信感知一体化技术已经受到 ITU(国际电信联盟)、IEEE(电气与电子工程师协会)、3GPP、中国 IMT-2020 推进组和 IMT-2030 推进组、北美 Next G Alliance、欧盟赞助的 ETSI(欧洲电信标准化协会)和 Hexa-X 等全球多个标准化组织和 6G 研究机构广泛关注。通感一体化业务的通信性能指标主要包含误比特率/误码率、网络覆盖率、时延、数据速率、连接密度、频谱效率、能量效率、可靠性等。感知性能指标包括感知业务时延和刷新频率等感知用例涉及的公共指标, 以及检测类、估计类和识别类各自涉及的指标, 如在置信度 95% 情况下, 定位精度为 0.2 m。

波形设计是通感一体化的一个关键技术, 包含基于通信波形的一体化波形、基于感知波形的一体化波形以及基于全新的通感融合的一体化波形<sup>[3]</sup>。基于感知波形主要有线性调频脉冲信号、调频连续波(FMCW)信号以及步进频率连续波(SFCW)信号等, 存在频谱利用率低、通信效率低的问题。全新的通感一体化波形设计还处于研究初期, 而基于通信波形的设计思路是在保证通信信息传输效率的前提下实现感知功能, 典型的通信波形主要有正交频分复用(OFDM)波形、单载波频域均衡(SC-FDE)波形以及滤波器组多载波(FBMC)波形等<sup>[2]</sup>。中国 IMT-2030 推进组空口技术主要分析了 OFDM 和 OTFS(正交时频空调制)两种典型波形在感知场景下的性能评估, 其中 OTFS 仍处于研究应用初期。若将 OFDM 波形用于通感一体化, 存在感知距离受限、峰均比较高的问题, 需要结合感知的性能指标, 进行一体化设计; SC-FDE 波形用于通感一体化设计, 其峰均比低更适用于需要无人机通信时高功率效率场景。

无人机集群将是 6G 天地一体化的重要接入部分, 需要针对通感一体化需求研究组网通信波形等关键技术。本文针对协同定位需求提出一种 SC-FDE 通感一体化波形及其集群组网高精度机间测距方法, 同时通过仿真进行性能评估。

## 1 无人集群通感一体化测距信号

为了提供全球覆盖, 6G 无线通信网络将从地面移动通信扩展到陆海空天多维立体通信网络,

包括天基卫星通信、空基有人-无人机通信、陆基移动通信、海基通信以及水下通信等<sup>[4]</sup>。空间物联网(IoST)是 6G 的主要突破之一, 主要通过卫星和无人机(UAV)来扩展网络。无人机组网通信作为陆海空天信息网络中临时机动特性最突出的一段, 具有快速网络拓扑变化、网络异构稀疏特性等特点<sup>[5]</sup>。国内无人机自组网技术研究处于快速发展与初步应用中, 大规模无人机组网通信主要以编队控制形式出现。北京遥测技术研究所依据无人机通信信道特性<sup>[6]</sup>, 掌握了基于 COFDM、SC-FDE 的宽带抗多径低时延组网技术, 分档带宽可覆盖 0.1 Mbps~200 Mbps; 开发了基于高速跳扩频的抗干扰窄带自组网技术, 终端跳速大于 1 万跳, 跳频带宽大于 300 MHz, 形成了 U/L/S/C 等频段的一站多机测控与协同组网通信系统, 可应用于超近程、近程与中程等多型飞行器异构分布式智能组网<sup>[7]</sup>。

传统测控系统采用伪随机码测距, 其测量精度依赖码片速率和收发伪码相位差; 采用延迟锁定环的测距方法取决于环路跟踪精度; 而载波相位测距方法的测距精度较高, 但其  $2\pi$  周期使得测距范围较小, 缓解此类相位模糊的测距方法难以完全消除相位模糊<sup>[8,9]</sup>。这些传统测控系统测距方法的多址能力较差, 无法应用到移动通信系统波形中, 也无法同时测量大规模集群组网终端间的距离, 迫切需要开发面向移动通信 OFDM 与 SC-FDE 等信号的集群组网测距技术。文献[8]中西安电子科技大学团队联合多载波 OFDM 信号的时域和频域进行高精度的时延估计。随着 OFDM 信号被 IEEE 802.16、3GPP LTE 等移动通信系统采用为标准体制, 其测距技术研究与应用已较为丰富: 文献[10]针对 OFDM 信号多径问题采用识别主径抑制方法, 解决室内环境非视距定位精度较差问题; 文献[11]进一步分析了 OFDM 测距的多用户干扰消除和多天线测距方法; 文献[12]设计了 OFDM 测控系统基于 FIR 结构的时频域测距方法, 通过接收采样信号的时域定时估计  $\hat{t}_s$ 、频域定时估计  $\hat{t}_f$ , 得到时延估计  $\hat{t} = \hat{t}_f + \hat{t}_s$ , 求得机间距离估计值  $\hat{t} \times c$ ,  $c$  为光速。

目前, SC-FDE 信号高精度测距技术研究尚较少, 其收发信号处理结构与 OFDM 系统非常类似, 也可以开展联合整数倍与小数倍的测距估计。两个系统都使用循环前缀消除块间干扰(ICI), 但原理上却完全不同: 两种技术都采用了 FFT 与 IFFT

模块，但位置和作用不同，OFDM系统的FFT主要是用作调制和解调，SC-FDE系统中FFT用于在频域完成信道均衡。OFDM系统对大的动态范围、载波频偏、带内谱零点等比较敏感。而SC-FDE技术有峰均比低、内在宽带频率分集效果、对载波频偏和时间选择性相对不敏感等优点。集群组网传输的SC-FDE数字基带信号表示为：

$$y(kT_s) = \sum_{n=1}^N s(n)g\left(\frac{kT}{2} - nT - \tau T\right) + z\left(\frac{kT}{2}\right), \quad (1)$$

$1 \leq n \leq N, 1 \leq k \leq 2N$

其中， $T$ 为符号周期， $T_s$ 为采样时钟， $g(t)$ 为滤波器， $\tau T$ 为时延， $z(t)$ 为高斯白噪声， $s(n)$ 为发端数据符号， $1 \leq n \leq N$ ， $s(n)$ 包含长度为 $N_p$ 的前导段 $\{a(1), a(2), \dots, a(N_p)\}$ 、长度为 $N_q$ 的独特字段UW $\{b(2), \dots, b(N_q)\}$ 与长度为 $N_o$ 的数据段 $\{d(1), d(2), \dots,$

$d(N_o)\}$ ，各段总长度为 $N_F$ ： $N_F = N_p + xN_q + N_o$ ，其中 $x$ 表示帧内UW段个数。

针对SC-FDE信号对频域均衡算法的要求，设计连续传输与短时突发两种帧结构，如图1所示。

① 多段连续传输帧，帧结构为“前导+UW+数据+UW+UW+数据+UW……”，用户节点传输多个业务数据段时一般在每段前后各加一段UW，第一段UW作为循环前缀吸收码间干扰、第二段与其他UW构成具有良好自相关特性的周期序列，也作为后续数据段的循环前缀。

② 短时突发帧，帧结构为“前导+UW+UW+数据+UW”，在连续传输模式的前缀UW位置增加一段UW作为循环前缀，相对来说增加了开销。

UW段一般长为 $N_q = 64, 128$ 或 $256$ ，跟业务数据段一起构成 $1024$ 或 $2048$ 长度FFT变换，UW段一般为Frank-Zadoff、Chu序列。

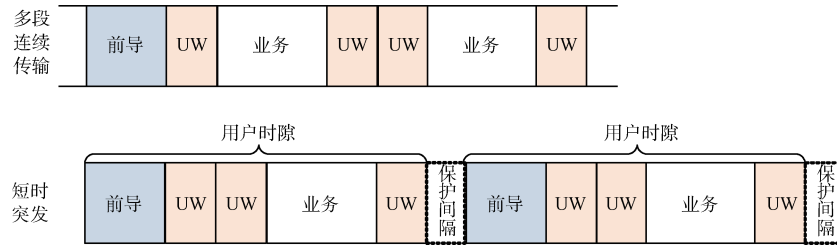


图1 SC-FDE信号连续传输与短时突发帧结构

Fig. 1 Frame structures for SC-FDE signals with continuous and bursty transmission

## 2 集群组网SC-FDE波形融合测距技术

### 2.1 基于SC-FDE波形的机间测距方法

无人机集群作为6G天地一体化的重要接入部分，集群自组网采用SC-FDE信号的传输速率可能达100 Mbps，而小型无人机间的自组网应用需要研制低成本组网通信终端<sup>[13]</sup>。行业内常用的软件无线电芯片AD9361，其通信信号带宽仅支持56 MHz，其采样率限制在122.88 MHz以下<sup>[14]</sup>，即宽带信号在采用芯片AD9361的接收机中仅可获得2~3倍过采样。因此，需要研究2倍采样宽带信号的高效感知方法。这里给出4倍过采样和2倍过采样下的两种联合整数倍与小数倍测距方法。

#### 2.1.1 4倍过采样的测距方法

对于接收机采用 $L=4$ 倍过采样时，计算小数倍时延信息估计 $\hat{\tau}_{j4}$ ：

$$\hat{\tau}_{j4} = \frac{T}{2\pi} \angle \left\{ \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^4 |y(Ln+l)|^2 e^{-j2\pi(l-1)l} \right\} \quad (2)$$

其中， $1 \leq l \leq 4$ ， $\angle$ 为求相位信息。上式小数倍时延信息估计可等效表示为：

$$\hat{\tau}_{j4} = \frac{T}{2\pi} \angle \left\{ \sum_{n=1}^N \left[ |y(4n+1)|^2 + |y(4n+2)|^2 + |y(4n+3)|^2 + |y(4n+4)|^2 \right] \right\} \quad (3)$$

利用前导段 $\{a(1), a(2), \dots, a(N_p)\}$ 计算差分相关，并获得相关度量 $R(n)$ ：

$$R(n) = \frac{\left| \sum_{m=1}^{N_p-1} y^*(n+m-1)y(n+m)a(m-1)a^*(m) \right|^2}{\left( \sum_{m=1}^{N_p} |y(n+m)|^2 \right)^2} \quad (4)$$

然后，通过比较相关度量 $R(n)$ 与门限 $\lambda$ ，来判断前导段 $n_i = \arg\{R(n) \geq \lambda\}$ ， $\arg$ 表示提取满足条件的 $n$ 值，门限 $\lambda$ 在工程中通过仿真分析确定，可获得整数倍时延信息 $n_i T$ ，进而得到时延估计 $\hat{\tau} = \hat{\tau}_{j4} + \hat{\tau}_i$ ，并求得机间距离估计值 $\hat{\tau} \times c$ 。

### 2.1.2 2倍过采样的测距方法

在 SC-FDE 接收机中采用 2 倍过采样时, 利用  $N$  个符号对应的  $2N+1$  个采样数据, 得到小数倍时延信息估计:

$$\hat{\tau}_2 = \frac{T}{2\pi} \angle \left\{ \sum_{k=1}^{2N} |y(k)|^2 e^{-jk\pi} + \text{Re} \{ y(k)y^*(k-1) \} e^{jk-0.5\pi} \right\} \quad (5)$$

上式可进一步等效表示为:

$$\hat{\tau}_2 = \frac{T}{2\pi} \angle \left\{ \sum_{n=1}^N |y(2n)|^2 - |y(2n-1)|^2 + j \text{Re} \{ y(2n)y^*(2n-1) - y(2n-1)y^*(2n-2) \} \right\} \quad (6)$$

类似式(4), 2倍过采样接收同样可以利用前导段获得整数倍时延  $n_i T$ , 进而得到时延估计  $\hat{\tau} = \hat{\tau}_2 + \hat{\tau}_i$ , 并求得机间距离估计值  $\hat{\tau} \times c$ 。下面通过仿真分析两种方法的测距性能。

## 2.2 测距仿真结果分析

仿真评估本文测距方法在不同信噪比下的偏差与方差性能。在计算过程中影响该方法性能的主要因素是小数倍时延估计。整数倍时延仿真时门限  $\lambda$  设定方法参考文献[15], 不同门限  $\lambda$  获得不同的前导段帧同步检测概率性能。工程中用到的信噪比在 5 dB 以上的, 式(4)计算前导段差分相关度量方法的检测性能接近 1, 其性能研究不在本文研究范围内。获取相关度量  $R(n)$  应用于接收机帧同步、小数倍时延估计式(3)和式(6), 并同时用于接收机定时同步, 实现通信与测距一体化设计。本方法在工程实现时占用的资源仅为 1 个加法运算、每节点 1 个计时器存储资源。

考察联合测距方法的偏差与方差性能, 分析其有效性与可靠性。仿真采用 QPSK 调制信号的成形滤波滚降系数为  $\alpha=0.35$ , 接收机过采样为 2 倍和 4 倍, 设短时突发帧 SC-FDE 信号的 FFT 长度为 1 024, UW 段长度  $N_q=128$ , 数据段长度  $N_o=768$ , 符号速率  $1/T=50$  MHz。如图 2 所示为该测距方法的测距偏差值性能仿真结果和根均方误差性能仿真结果, 对应信噪比 SNR 分别为 5 dB、10 dB、30 dB 时的测距偏差为 0.01 m、0.003 m、0.000 5 m, RMSE 性能为 0.14 m、0.07 m、0.01 m。此外, 本文方法在 2 倍采样时比 4 倍采样时的 RMSE 性能有 0.18 m、0.1 m、0.015 m 的较大性能提升, 对比理论门限值  $\sigma_{\text{CRB}}$  如式(7)所示。根据以上分析可见本文测距算法是有效和可靠的。

$$\sigma_{\text{CRB}} = \sqrt{\frac{3c^2 T^2}{2NE_s/N_0} \times \frac{1}{3(\pi^2 - 8)\alpha^2 + \pi^2}} \quad (7)$$

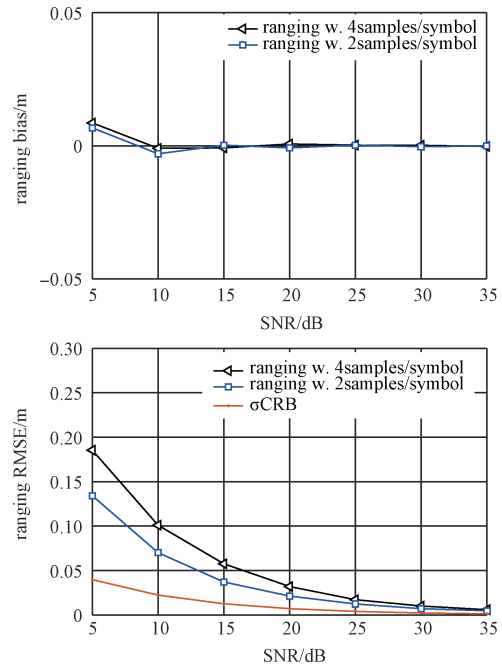


图 2 SC-FDE 信号在 4 采样、2 采样下的测距 RMSE 性能  
Fig. 2 Ranging performance for SC-FDE signals with 4 or 2 samples per symbol

## 3 结束语

无人机集群将是未来 6G 空天地一体化的重要接入部分, 针对通信波形设计实现感知功能需求, 在综合分析 OFDM、SC-FDE、FBMC 和 OTFS 等波形基础上, SC-FDE 将比 OFDM 波形用于通感一体化时有峰均比较低等优势, 对载波频偏和时间选择性相对不敏感等优点, 适用于机载高动态组网系统。本文首先设计 SC-FDE 的连续传输与短时突发两种帧结构, 然后针对无人机集群低成本组网终端中宽带信号接收机难以 4 倍过采样的问题, 设计了 4 倍过采样和 2 倍过采样的两种联合整数倍与小数倍测距方法, 仿真结果表明了其测距估计的有效性和可靠性。

## 参考文献

- [1] ZENG Y, MA Y, SUN S. Joint radar-communication with cyclic prefixed single carrier waveforms[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 4069-4079.
- [2] 全球 6G 技术大会. 通感一体化系统架构与关键技术: WHITE PAPER V9.0B[R/OL]. (2023-03-22) [2023-08-

- 01]. <https://www.g6gconference.com/index/Lists/index.html?id=9>.
- [3] LIU F, CUI Y, MASOUROS C, et al. Integrated sensing and communications: Towards dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1728-1767.
- [4] 闫朝星, 付林罡, 郑雪峰, 等. 基于无人机自组网的空海一体化组网观测技术[J]. *海洋科学*, 2018, 42(1): 21-27.  
YAN Chaoxing, FU Lingang, ZHENG Xuefeng, et al. Air-sea integrating network for over-sea observation systems based on ad hoc networking using an UAV[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(1): 21-27.
- [5] 卓琨, 张衡阳, 郑博, 等. 无人机自组网研究进展综述[J]. *电信科学*, 2015, 31(4): 127-137.  
ZHUO Kun, ZHANG Hengyang, ZHENG Bo, et al. Progress of UAV ad hoc network: A survey[J]. *Telecommunications Science*, 2015, 31(4): 127-137.
- [6] YAN C, FU L, ZHANG J, et al. A comprehensive survey on UAV communication channel modeling[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 107770-107793.
- [7] 翟中英, 闫朝星. 无人机测控通信自组网技术综述[J]. *遥测遥控*, 2018, 39(4): 66-75.  
ZHAI Zhongying, YAN Chaoxing. A survey on UAV TT&C ad hoc networking techniques[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2018, 39(4): 66-75.
- [8] REN G, SUN C, NI H, et al. OFDM-based precise ranging technique in space applications[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(3): 2217-2221.
- [9] RITER S. The effect of background noise on phase ranging measurements in urban vehicle monitoring systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1973, 22(3): 81-85.
- [10] 陈万平, 鲍亚川, 成小彤, 等. 基于多源融合的OFDM室内定位技术研究[J]. *无线电工程*, 2023, 53(5): 1052-1060.
- CHEN Wanping, BAO Yachuan, CHENG Xiaotong, et al. Research on OFDM indoor positioning technology based on multi-source fusion[J]. *Radio Engineering*, 2023, 53(5): 1052-1060.
- [11] 夏玉杰. OFDMA无线接入中的测距系统关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [12] 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.
- [13] 许宁, 惠腾飞, 黄振. 基于AD9361的无人机小型化数据链收发系统设计[J]. *现代导航*, 2017, 8(6): 427-431.  
XU Ning, HUI Tengfei, HUANG Zhen. UAV Small scaled data link transceiver system design based AD9361 [J]. *Modern Navigation*, 2017, 8(6): 427-431.
- [14] 柳井刚. 基于FPGA高速软件无线电模块设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [15] VILLANTI M, SALMI P, CORAZZA G E. Differential post detection integration techniques for robust code acquisition [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(11): 2172-2184.

## [作者简介]

- 闫朝星 1985年生, 博士, 研究员。  
杨玖文 1969年生, 硕士, 研究员。  
尤星语 1999年生, 硕士研究生。  
付林罡 1982年生, 硕士, 研究员。  
刘昊 1976年生, 博士, 研究员。

(本文编辑: 傅杰)