

无人机协同测控中 SC-FDMA 技术设计*

朱铁林^{1,2}, 王 平^{1,2}, 杨 晨^{1,2}

(1 天津航天中为数据系统科技有限公司 天津 300458

2 天津市智能遥感数据处理技术企业重点实验室 天津 300458)

摘要: 针对无人机协同任务测控传输的多机接入问题, 提出基于分布式任务分配模型的高动态 SC-FDMA 技术。通过将贪婪原则、信道动态分配机制和多用户接入技术结合, 利用集中映射方式设计子信道数目可调的映射规则, 配置各无人机节点所占子载波数目。仿真结果表明, 与传统 FDMA、CDMA、TDMA、OFDMA 等相比, 基于 SC-FDMA 设计的一站多机测控链路在峰均比、误码率、频带效率、重构时间等方面具有更均衡的性能, 可改善系统可靠性、实时性、安全性和稳定性, 更加适于无人机空地时变信道星状网互联, 并且有效实现了任务分配、信道环境和链路状态的统一。

关键词: 无人机; 任务分配; 测控传输; 单载波频分多址; 贪婪原则; 信道动态分配

中图分类号: TN925.92 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)01-0007-06

Design of SC-FDMA in UAV cooperative measurement and control transmission

ZHU Tielin^{1,2}, WANG Ping^{1,2}, YANG Chen^{1,2}

(1. Tianjin Zhongwei Aerospace Data System Technology Co., Ltd, Tianjin 300458, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Intelligent Information Processing in Remote Sensing, Tianjin 300458, China)

Abstract: Aiming at the multi access problems of cooperative task measurement and control transmission of UAVs, high-dynamic SC-FDMA technology based on distributed task allocation model is proposed. By combining greedy principle, dynamic channel allocation mechanism and multi-user access technology, a mapping rule with adjustable number of subcarriers is designed by centralized mapping, and the number of subcarriers occupied by each UAV node is configured. The simulation results show that the data link of one-station multi-UAVs based on SC-FDMA has more balanced performance in terms of peak-to-average ratio, bit error rate, band efficiency, and reconstruction time compared to the traditional FDMA, CDMA, TDMA, OFDMA, etc. It can improve the reliability, real-time performance, security and stability of the system, and effectively unify the task allocation, channel environment and link state, which is more suitable for star network interconnection UAVs in air ground time-varying channel.

Key words: Unmanned aerial vehicle; Task allocation; Measurement and control transmission; Single-carrier frequency-division multiple access; Greedy principle; Dynamic channel allocation

引 言

随着现代无人机、物联网、人工智能、大数据等前沿技术的发展进步, 世界各国开始探索全新的作战概念, 以求在广域、复杂、多变的信息战场环境下形成对敌方压倒性军事优势。无人机集群协同作战即为其中之一, 其内涵是将多架功能相对单一、成本相对低廉的无人机按照一定规律或保持一定队形有机组成无人机集群系统, 在战场指挥员的有限介入下协同配合、优势互补完成特定作战任务。与单架无人机单打独斗相比, 具有群智涌现、并行覆盖、机动灵活、全方位、多维度、更高效、更可靠、更稳定、更准确等优势, 可显著提升整个机群的作战效能^[1]。

*基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFB0502600); 天津市科技计划项目 (No. 19YDSSGX00320)

收稿日期: 2020-08-01 收修改稿日期: 2020-12-30

无人机信息化协同作战能力体现在自主决策的水平,而通信技术的发展则赋予无人机集群系统丰富可靠的神经网络,使任务规划在测控技术的支撑下更加智能化。针对无人机协同多任务规划分配问题,文献[2]研究了多架无人机攻击多个目标的武力分配技术;文献[3]建立了异构多无人机、多目标、多任务的分配模型;文献[4]提出一种基于两步分布协同拍卖的多机协同任务分配方法;文献[5]提出一种基于数字多波束相控阵天线的一站多机测控系统;文献[6]设计了上行码分多址 CDMA (Code Division Multiple Access)、下行正交频分多址 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 的多机并行测控/数传体制;文献[7]采用心跳同步时分多址 TDMA (Time Division Multiple Access) 多节点通信方法,解决了无人机集群相同频段遥测数据冲突问题。但上述协同测控体制一方面没有充分与无人机集群任务规划相结合,难以实现多任务操控的无缝衔接;另一方面未能给出传统频分多址 FDMA (Frequency Division Multiple Access) 频率利用效率低、CDMA 存在远近效应并且不适于高速数据传输、OFDMA 技术峰值平均功率比 PAPR (Peak to Average Power Ratio) 较高导致功放效率低,以及 TDMA 时隙同步复杂且重构时间长等问题的有效解决方案。因此,本文将单载波频分多址 SC-FDMA^[8] (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access) 引入一站多机协同测控系统中,结合基于贪婪原则的任务规划策略,提出一种基于集中式映射方式为各无人机配比子载波数目的信道资源动态分配方法,从而根据外部情况和任务需求灵活调整各无人机传输带宽,在随机入网、退网,节点数目和拓扑结构动态变化时保证信道资源的充分利用,并实现网络拓扑的快速重构。

1 基于贪婪原则的无人机任务分配模型

无人机集群协同作战系统中,各无人机分担不同角色,可能平台异构、可能载荷异型,需要根据战场环境和任务阶段,灵活调整分工权重。例如,远程阶段预警无人机传输目标侦察和雷达探测数据,中程阶段侦察无人机传输高清可见光视频、红外视频和三维成像数据,抵近阶段攻击无人机传输激光引导数据和火控数据等。同时,在各个阶段还需要多架同类型无人机梯队配合、全息感知、持续高压、饱和攻击,当无人机集群网络节点规模进一步加大时,集群队形调整及各节点之间任务协调的复杂度和运算量将呈指数级增长,在当前飞控、任控计算机信息处理水平条件下,地面测控站必然难以准确、及时地做出飞行控制和任务控制抉择。因此,本文设计一种基于贪婪准则^[9]的分布式任务调配方法,流程如图 1 所示。

图 1 中,无人机集群任务分配算法的步骤如下^[10]:

①首先各无人机依据贪婪原则逐个领取 $V_j P_{ij}$ (V_j 为第 i 架飞机的速度, P_{ij} 为第 i 架飞机对任务 j 的执行成功概率) 值相对最大的任务,形成集群无人机任务执行初始化方案;集群内无人机节点将自身作战任务通过组网数据链泛洪式播发。

②各无人机节点通过组网数据链接收其它无人机发送的任务分配方案信号,并对信号解析处理。

③在无人机节点 i 从接收信息中发现其它无人机节点集 G_{Ti} 与自身任务一样时,即无人机节点 i 和

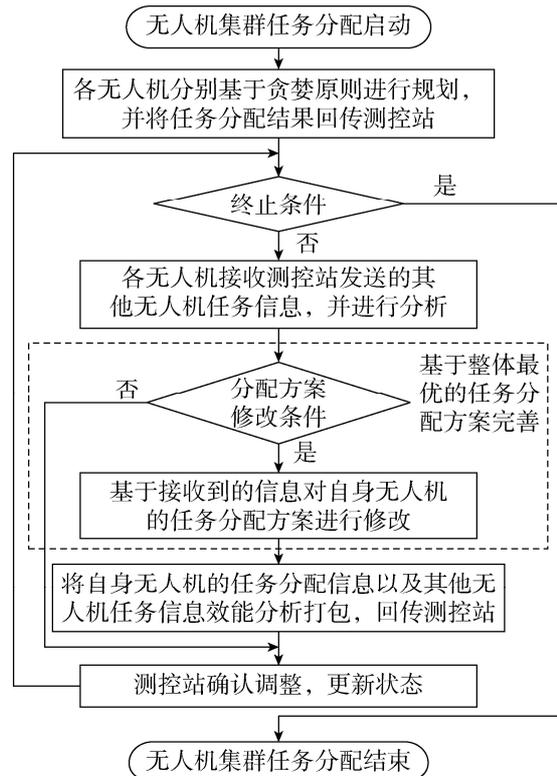


图 1 无人机集群任务分配流程

Fig. 1 Process of task allocation for UAV cluster

无人机节点集 G_{Ti} 均获得了任务 k ，则需要通过图 1 中虚线框内的修改方案对冲突进行处理，详细过程如图 2 所示。

④对无人机集群内所有节点开展步骤③，然后对协同任务调配结果归纳播发。

⑤重新回到步骤②，达到预设条件为止。

2 SC-FDMA 多址技术性能分析

通过构建集群无人机协同任务能力需求模型可以看出，为使集群体系效能最大化，各无人机节点必须实时调整任务分配，从而获取和分发不同类型任务数据，进而需要相应的信道资源予以支撑，因此，有必要将任务动态调配与信道动态分配的多址技术统筹设计。目前，常用的信道多址技术有 FDMA、CDMA、TDMA、OFDMA 等。如前所述，CDMA 存在远近效应并且不适于高速数据传输，TDMA 统一时钟基准易耦合且突发传输时隙同步复杂，OFDMA 技术 PAPR 较高且对频偏十分敏感，因此，本文重点研究适于高速移动、宽带传输且稳定可靠的 SC-FDMA 多址技术。

2.1 SC-FDMA 多址技术

SC-FDMA 主要是针对多用户共享通信资源提出的，其发挥了多载波 OFDMA 和单载波调制的优势，不仅可以抑制多径信道的快衰落，而且具有较高的频谱效率。同时，其能够有效地减小发射端的 PAPR，从而降低对功率放大器的线性范围要求，有利于机载终端控制功耗和重量。SC-FDMA 基本等同于一种经过离散傅里叶变换 DFT (Discrete Fourier Transform) 扩展的 OFDMA，其首先将时域波形通过 DFT 变换映射为频域波形，然后进入 OFDM 系统后续处理，结构原理图如图 3 所示。

SC-FDMA 系统的多址处理实现方法主要有两种，即时域交织频分多址 IFDMA (Interleaved Frequency Division Multiple Access) 和频域的基于 DFT 扩展 OFDMA。由于基于 DFT 扩展 OFDMA 系统具有模块复用和子载波映射灵活的特点，故选其作为 SC-FDMA 系统的多址实现方式。

2.2 SC-FDMA 性能仿真分析

对于协同任务无人机集群多址技术，重点考虑在信道容量 (频谱利用率)、峰均比、误码率等几方面的性能。

2.2.1 信道容量

设置载频为 2GHz，快速傅里叶变换 FFT (Fast Fourier Transform) 点数为 256，循环前缀 CP (Cyclic Prefix) 长度为 32，调制方式为正交相移键控 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)，均衡方式为迫零算法/最小均方误差 ZF/MMSE (Zero-Force/Minimum Mean Squared Error)，在平坦衰落信道和 TU12

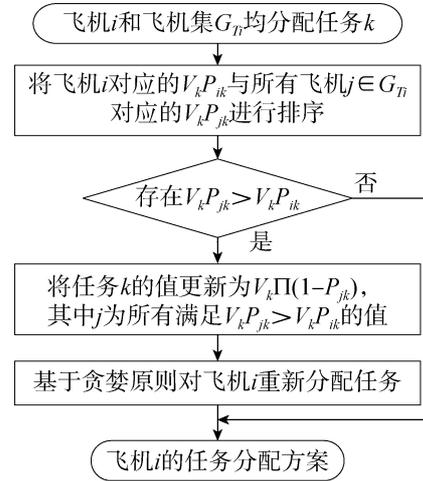


图 2 飞机 i 的任务分配方案流程
Fig. 2 Task allocation plan process of ith aircraft

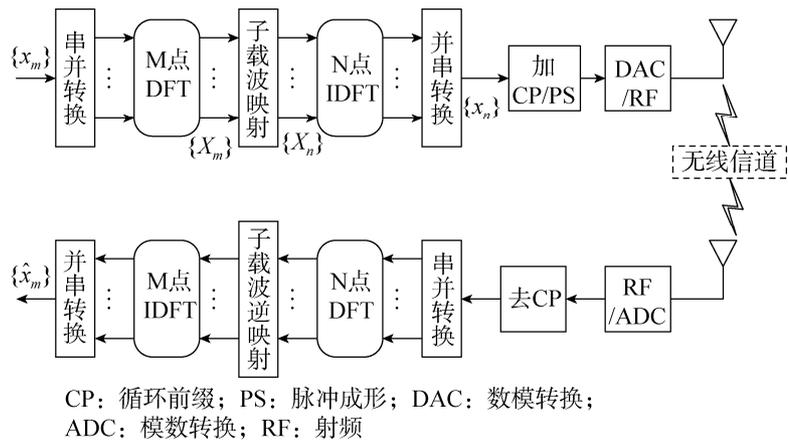


图 3 SC-FDMA 原理图
Fig. 3 Principle diagram of SC-FDMA

CP: 循环前缀; PS: 脉冲成形; DAC: 数模转换; ADC: 模数转换; RF: 射频

信道^[11]下, 得到信道容量对比结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 在信道为平坦衰落的情況下, 两种系统的信道容量相同。而在采用 TU12 信道时, OFDMA 的信道容量要高于 SC-FDMA, 不同信噪比下均要高出 1bit/s/Hz 左右。这说明 SC-FDMA 在信道容量方面略逊于 OFDMA, 其优势主要体现于 PAPR 上。

2.2.2 峰均比

数字化的 OFDMA 系统与 SC-FDMA 系统的 PAPR 值可以表示为

$$PAPR = \frac{\max_{n=0,1,\dots,N-1} |y(n)|^2}{\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{N-1} |y(n)|^2}$$

式中, $y(n)$ 为经过 DFT/IDFT 后产生的数字信号, N 表示每个输出的数据块的大小。OFDMA 与 OFDM 原理相同, 在发射端产生正交子载波, 每个用户占用分配的子载波数目和位置, 然后叠加发射, 频域虽然正交但在某些时刻上数值模增大, 从而具有较高的 PAPR 值; 而 SC-FDMA 保持高速串行传输方式, 在带宽方面与 OFDMA 基本相同, PAPR 值也基本不变, 保持较低水平。设置子载波数目为 512, 滤波器进行 4 倍过采样, 两者的互补累积分布函数 CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) 如图 5 所示。

图 5 中, 在限定 $Pr\{PAPR > PAPR_0\} = 10^{-3}$ 条件下, SC-FDMA 的峰均比均小于 OFDMA 的峰均比, 且 IFDMA 最小, 集中式频分多址 LFDMA (Localized Frequency Division Multiplexing Access) 其次, 分布式频分多址 DFDMA (Distributed Frequency Division Multiplexing Access) 更高, OFDMA 最大, 因此, 通过峰均比仿真结果, 确定本系统选择 IFDMA 或 LFDMA 映射方式。

2.2.3 误码性能

OFDMA 具有高效的频带利用率, 但其紧凑的频谱结构也使其对频率偏移和载波同步要求极为严格, 无人机巡航速度至少在 120km/h, 在此条件下 OFDMA 与 SC-FDMA 相比, 误码性能一般较差。图 6 为 SC-FDMA、SC-FDE 以及 OFDMA 的误符号率曲线。

由图 6 可以看出, LFDMA 具有最优的误符号性能, 其次是 IFDMA, OFDMA 的误符号性能最差, 因此, 进一步通过误码率仿真结果, 确定本系统选择 LFDMA 映射方式。

3 基于任务模型的信道动态分配仿真

采用 SC-FDMA 多址技术可以实现集群无人机测控链路同时同地兼容工作, 并能够通过调整各无人

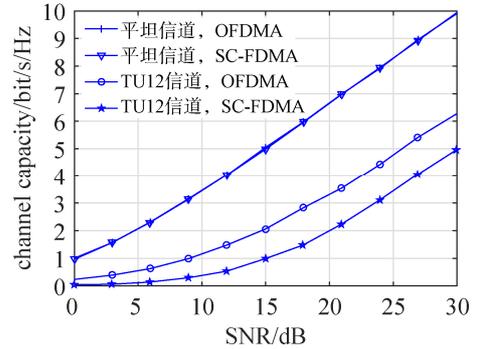


图 4 OFDMA 与 SC-FDMA 系统容量对比
Fig. 4 Capacity comparison of OFDMA and SC-FDMA

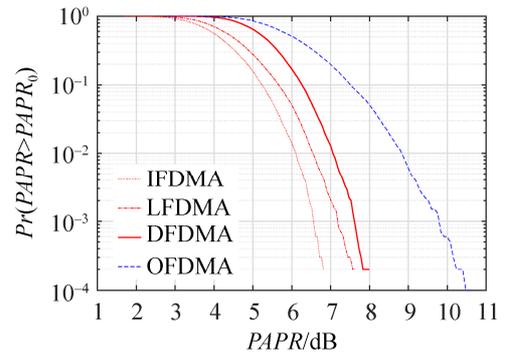


图 5 OFDMA 与 SC-FDMA 的 PAPR 对比
Fig. 5 PAPR comparison of OFDMA and SC-FDMA

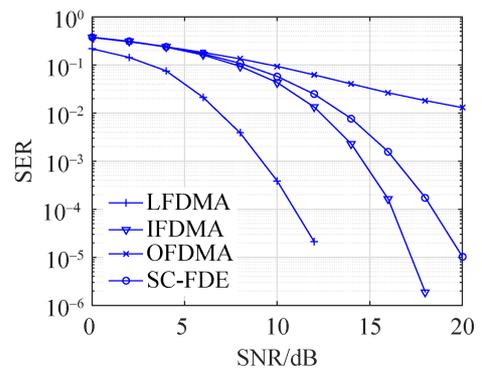


图 6 OFDMA 与 SC-FDMA 误符号率对比
Fig. 6 Symbol error rate comparison of OFDMA and SC-FDMA

机节点所占初始 DFT 点数重新分配通信资源。本文将该动态分配机制与无人机集群任务模式相结合，可分别根据全方位协同侦察、一体化侦察打击以及精细化预警侦察等任务数据交互需求实时调整链路资源分配系数，达到按需分配、效率最优的目的。设置用户数为 4，信道划分为 1024 个子载波，子载波映射方式选择 LFDMA，QPSK 调制方式，对多机任务分配能力进行仿真，如图 7 所示。

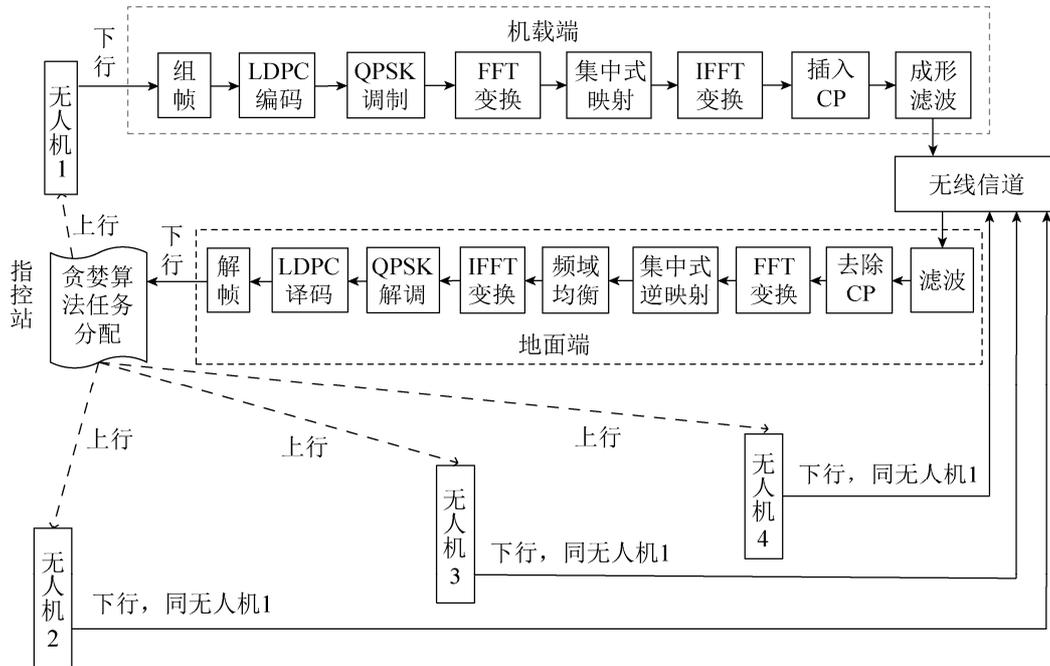


图 7 系统仿真模型
Fig. 7 System simulation model

在图 7 任务模型变化过程中，经贪婪算法得到 4 架飞机的传输数据量。在 4 架飞机均为相同侦察功能以及飞机 1 作为主机侦察、飞机 2 作为从机辅助侦察、飞机 3 和飞机 4 作为攻击力量得到信道分配结果如图 8 所示。

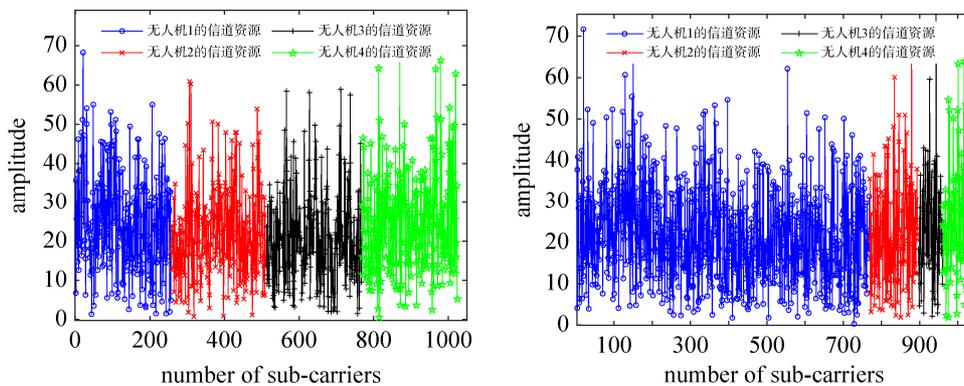


图 8 不同任务模型信道分配仿真
Fig. 8 Simulation of channel allocation for different task models

由图 8 可以看出，在 4 架飞机均为相同侦察功能时，每架飞机各分配 256 个子载波；在 4 架飞机执行不同任务功能时，飞机 1 分配 768 个子载波，飞机 2 分配 128 个子载波，飞机 3 和飞机 4 分别分配 64 个子载波。因此，利用 SC-FDMA 多址技术，能够与任务分配相结合对集群无人机信道进行动态分配，且无需预留保护间隔，有效提高了频谱利用效率。

4 结束语

针对异构无人机集群侦察/打击一体化作战任务分配和协同问题, 结合贪婪算法设计了高效率、高动态、低复杂度的 SC-FDMA 多址方式。通过仿真验证了信道容量、峰均比、误码率等性能, 确定了子载波映射方式等参数。最后建立系统仿真模型, 仿真结果实现了依据作战任务自适应调整信道资源的能力, 提高了无人机集群的灵活性、智能性和自主性, 为协同作战实用化进程提供链路支撑。

参考文献

- [1] JAKARIA A H, RAHMAN M A. Formal analysis of k-resiliency for collaborative UAVs[C]. 2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), 2018: 583–592.
- [2] 马云红, 井哲, 周德云. 一种任务分配问题的快速剪枝优化算法[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(1): 40–43.
MA Yunhong, JING Zhe, ZHOU Deyun. A faster pruning optimization algorithm for task assignment[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(1): 40–43.
- [3] 戚泽昉, 王强, 黄英杰. 多无人机侦察打击任务分配建模仿真[J]. 计算机仿真, 2015, 32(9): 142–146.
QI Zeyang, WANG Qiang, HUANG Yingjie. Task assignment modeling and simulation for cooperative surveillance and strike of multiple unmanned aerial vehicle[J]. Computer Simulation, 2015, 32(9): 142–146.
- [4] 冉华明. 基于两步分布协同拍卖的多机协同任务分配[J]. 电讯技术, 2020, 60(2): 181–188.
RAN Huaming. Cooperative task allocation for multiple aircraft based on two-step decentralized cooperative auction[J]. Telecommunication Engineering, 2020, 60(2): 181–188.
- [5] 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(4): 66–74.
ZHAI Zhongying, YAN Chaoxing. A survey on UAV TT&C Ad hoc networking techniques[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(4): 66–74.
- [6] 杨万君, 崔艳华, 王旭宁. 无人机多机并行测控与数传技术研究[J]. 无线电工程, 2013, 43(8): 16–18.
YANG Wanjun, CUI Yanhua, WANG Xuning. Study on parallel TT&C and data transmission technology for UAVs[J]. Radio Engineering of China, 2013, 43(8): 16–18.
- [7] 刘蓉, 肖颖峰. 一种多机协同无人机测控系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(5): 706–711.
LIU Rong, XIAO Yingfeng. A multi-aircraft cooperative UAV observe and control system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(5): 706–711.
- [8] 林志阳, 王兆晖, 丁洁, 等. 减小 SC-FDMA 与 OFDMA 系统 PAPR 的方法分析[J]. 现代电子技术, 2015, 38(6): 25–27.
LIN Zhiyang, WANG Zhaohui, DING Jie, et al. Analysis methods to reduce PAPR of SC-FDMA and OFDMA system[J]. Modern Electronics Technique, 2015, 38(6): 25–27.
- [9] KOSTENKO V A. Combinatorial optimization algorithms combining greedy strategies with a limited search procedure[J]. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2017, 56(2): 218–226.
- [10] 胡建. 大气层外多拦截器最优目标分配及微分对策协同制导律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
HU Jian. Research on exoatmosphere multiple kill vehicle optimal target assignment and differential game based cooperative guidance law[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [11] 田磊, 张建华. IMT-2020 信道模型标准综述[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5): 62–68.
TIAN Lei, ZHANG Jianhua. Overview on IMT-2020 channel model standard[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(5): 62–68.

[作者简介]

朱铁林 通信作者, 1985 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为无人机测控通信系统设计、信道编码技术、组网多址技术、卫星通信技术等。

王平 1981 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无人机任务规划和智能决策技术、无人机系统集成等。

杨晨 1982 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无人机集群组网协议设计和通信体制设计。