

一种高速跳频无人机自组网终端设计与实现

孙婉莹, 罗翔, 王圆圆, 付林罡
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 随着无人机集群的作战应用日益广泛, 无人机集群实现机间组网和任务协同愈发重要。在战场复杂电磁环境下, 设计具有良好抗干扰性能的网络终端已成为一项重要需求。本文设计了一种基于高速跳频通信体制的无人机自组网终端, 并对研制的终端产品进行了接收灵敏度、抗干扰能力和组网功能测试。测试结果表明: 跳频无人机自组网终端具有良好的灵敏度和抗干扰性能, 具备多节点组网能力, 设备具有高集成度、低功耗、低成本、轻量化的特点。

关键词: 无人机集群; 机间组网; 复杂电磁环境; 高速跳频; 轻量化

中图分类号: TN923; V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)06-0001-10

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230609001

引用格式: 孙婉莹, 罗翔, 王圆圆, 等. 一种高速跳频无人机自组网终端设计与实现[J]. 遥测遥控, 2023, 44(6): 1-10.

Design and reliaization of a frequency-hopping Ad-hoc terminal for UAV

SUN Wanying, LUO Xiang, WANG Yuanyuan, FU Lingang
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: With the wide military application of UAV(Unmanned Aerial Vehicle) cluster, it is necessary to realize inter-machine networking and task coordination among UAVs. Under the condition of complex electromagnetic environment, it is also important to design network with good anti-interference performance. A UAV Ad-hoc network terminal based on high-speed frequency hopping is designed, and the sensitivity, anti-jamming ability and networking function are tested. The test results show that this terminal has good sensitivity, anti- interference performance and multi-node networking capability with high integration, light weight, low power consumption, low cost and lightweight.

Keywords: UAV cluster; Ad-hoc; Complex electromagnetic environment; Frequency hopping; Lightweight

Citation: SUN Wanying, LUO Xiang, WANG Yuanyuan, et al. Design and reliaization of a frequency-hopping Ad-hoc terminal for UAV [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(6): 1-10.

引 言

无人机集群应用已成为国外作战领域的研究热点。美空军发布的《美空军小型无人机系统飞行计划: 2016-2036》中强调, 联合互操作性是小型无人机系统能力发展不可或缺的一环。目前美方典型的无人机集群自组网项目主要有“小精灵”项目、拒止环境中协同作战项目、“山鹑”微型无人机项目、低成本无人机集群技术项目等^[1-3]。俄罗斯已启动基于无人机的协同作战研究, 同时欧洲也启动了“欧洲蜂群”等无人系统研究项目^[4]。2020年10月, 英国Blue Bear系统公司宣布, 利用该公司研发的即插即用的开放式架构和“智能互

联”技术, 实现了20架固定翼无人机协作、异构无人机蜂群的超视距飞行等最新蜂群无人机技术操作的验证^[5]。

国内也在积极开展无人机集群研究。中国电子科学研究院为验证无人机“蜂群”陆上发射、空中投放和对地察打能力, 基于固定翼无人机飞行速度快、续航时间长的优势, 于2020年10月开展了固定翼无人机“蜂群”系统陆空协同试验工作^[6]。西北工业大学提出了一种分布式无人机编队导航定位方案, 实现了无人机编队控制^[7]。中国的“河豚”A2型无人直升机参加土耳其国际防务展, 出色地展示了其自组网智能集群、飞行控制系统以及饱和攻击能力^[8]。为满足无人集群作战应用、

提升其自主协同作战效能, 需要提高无人集群协同抗干扰能力, 保证信息在拒止环境下不被干扰地准确传输^[9]。因此, 无人作战平台复杂电磁环境抗干扰和自适应传输技术成为一个重要的研究方向, 技术途径主要包括: 通过扩跳频通信技术, 提升系统抗跟踪干扰、阻塞干扰等性能^[10,11]; 通过多域联合认知算法感知频谱干扰, 及时调整无线通信资源, 改善对电磁环境的适应能力与抗干扰能力, 增加频谱资源的利用率^[12]; 采用波形抗干扰增强、联合编码等技术, 以适应不同干扰强度下的电磁信道环境, 提高网络吞吐率^[13]等。但无人集群抗干扰组网通信技术的工程化实现水平与实战化应用之间仍存在不小的差距。

本文针对复杂电磁环境条件下无人机间通信易受干扰而中断的问题^[14,15], 设计了一种小型化、低功耗的高速跳频通信体制无人机自组网终端, 并据此完成了设备研制。该终端支持多节点组网, 具备自主同步能力和良好的抗干扰能力, 组网方式灵活, 为无人机集群系统的抗干扰机间通信和机间协同提供了一种可行方案。

1 网络拓扑

分布式控制自组织网是无人机集群的一种重要网络架构。简单的平面网络结构适用于较小规模网络, 分级网络结构则是较大规模网络的首选。对移动自组网而言, 当网络规模较大时, 通常采用分簇结构。基于作战单位的规模和作战任务需求, 进行簇划分和簇管理, 借助网关节点实现同一网络中各簇之间的通信^[16-18]。例如, 美军一类典型战术互联网数字电台网络即采用了分簇结构。该网络分为两级架构, 每个簇由一部 NTDR(Near Term Digital Radio, 近期数字电台)担任簇首; 位于某一簇首无线电覆盖范围内, 且属于同一战斗单位的其它电台作为该簇成员^[19]。当网络规模较小时, 可以采用简单的平面网络结构; 当网络规模较大时, 宜采用分级网络结构。

本文提出的跳频自组织网络架构采用了典型的分级分簇架构, 通过分级分簇的方法来解决自组网的可扩展问题。如图 1 所示, 整个网络划分为若干个簇, 每个簇由簇首节点和普通成员节点构成, 形成第一级低级网络, 这里称为子网。每一个子网都是一个分布式无中心多跳网络, 子网内成员可以实现与邻居节点的一跳通信或非邻居节

点的多跳通信。在两级组网中, 簇首节点也是网关节点, 簇与簇之间依靠网关节点实现簇间通信, 所有网关节点构成第二级高级网络, 这里称为骨干网。骨干网是一个专门用于簇间交换的公共网。

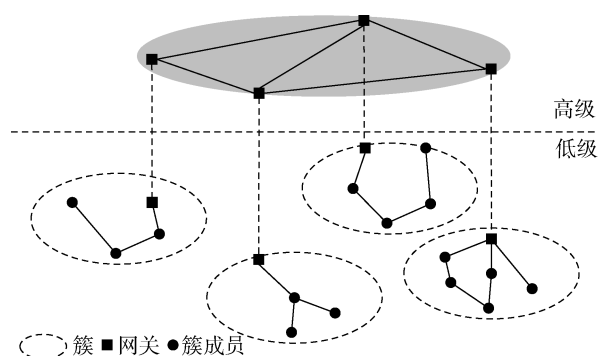


图 1 基于分级分簇的自组织网络架构

Fig.1 Ad-hoc network framework based on hierarchical clustering

这种分级网络结构的优点包括^[20,21]: 一是分级网络结构有较好的可扩展性, 其网络容量或规模可以通过增加簇个数或增加网络级数得到提高; 二是路由信息借由分级结构实现局部控制, 减少了路由协议的开销, 并且容易实现网络的局部同步; 三是节点定位更加简单, 节点位置通过查询相应簇首即可获得, 不需要进行全网查询; 四是分级结构实现了无中心网络和有中心网络的技术优势融合, 簇首承担了簇内协调和控制的角色, 有中心网络中的信道接入、路由管理、网络管理、移动性管理和功率控制等机制可以移植到自组网的相应层级中, 同时簇首由动态选举产生, 具有很强的抗毁性。

2 高速跳频自组网通信体制设计

2.1 协议栈架构

根据无人机自组网的网络特征, 参考 OSI (Open System Interconnection, 开放式系统互联) 七层协议栈模型, 设计无人机自组网通信协议栈如图 2 所示。

无人机自组网协议栈分为五层: 物理层、链路层、网络层、传输层和应用层。传输层和应用层属于自组网应用范畴, 由用户程序来实现。自组网设备完成物理层、链路层和网络层功能, 主要为用户应用提供业务承载通道。物理层主要实

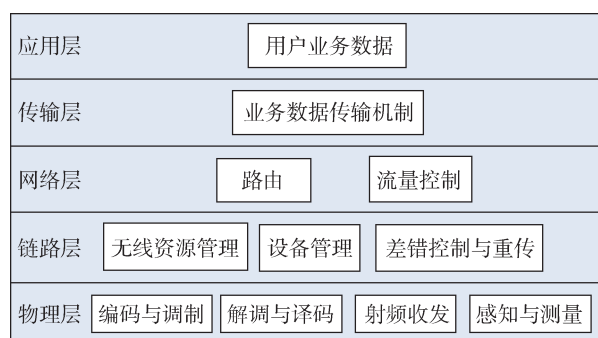


图2 无人机自组网通信协议栈

Fig.2 UAV Ad-hoc communication protocol stack

现物理信道的编码和译码、调制和解调、射频收发、信道监测以及频谱感知等功能，为数据提供空中信号传输通道；链路层负责无线资源管理和设备管理，无线资源管理包括逻辑信道到物理信道的映射、网络时间同步、多址接入控制、优选信道切换等功能，设备管理包括节点身份鉴权、节点组网管理等功能；网络层主要实现网络节点发现与维护、路由表建立与维护、数据传输路由选择、流量控制等功能。

2.2 跳频方案设计

图3所示为跳频通信系统原理框图。在发送端，用时间信息作为输入伪码发生器不断产生伪随机码并用其去控制发射机频率合成器，从而产生不断随机变化的频率，并与基带已调信号混频而获得跳频的变频信号。当收发双方伪随机码实现同步后，即可实现收发双方跳变频率同步，进而混频得到中频信号，经解调后得到接收数据。

所谓的跳频序列指跳频系统的载波频率跳变序列。

2.3 跳频同步策略

为实现跳频信号正确接收，必须实现收发跳

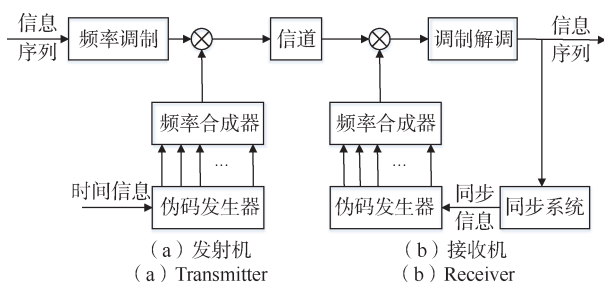


图3 跳频通信系统原理框图

Fig.3 Block diagram of frequency hopping communication system

频同步，这样接收端频率合成器产生的频率与接收信号混频后方可输出正确的中频信号，从而解调出信息。

本文采用一种基于TOD(Time of Day)的同步字头实现同步。相比于其它方法，TOD同步字头法的同步时间快、概率高、随机性好。TOD指跳频终端实时时钟信息(年、月、日、时、分、秒、毫秒、微秒、毫微秒)。TOD最小单位为每一跳时间。收发两端均需要使用高精度频率源，以减少收发时钟误差。

跳频频率随TOD变化的生成原理框图如图4所示。将原始密钥和TOD输入伪随机码发生器，进行非线性相关并得到频率编号。频率合成器合成该编号对应的频率。由于伪随机码的产生方法、原始密钥数据均为收发共享信息，接收端若知道发送端的TOD信息，则双方产生的频率就是一致的。从而通过TOD时间同步实现了跳频同步。



图4 跳频频率合成原理框图

Fig.4 Block diagram of frequency synthesis

网络TOD时间同步策略如图5所示，集群网络中的簇首节点广播同步TOD信息，其它节点接收并将自己的时间同步到簇首节点。这种方式实现简单，可快速完成同步和组网，但需要注意的是，待同步节点和簇首节点之间会引入固定差 ΔT 等于路径传输时延。为了消除 ΔT 的影响，保护时隙需要至少设置为 $2\Delta T$ ，以满足传输距离要求。

2.4 物理层波形设计

高速跳频系统在载波频率快速转换时很难保

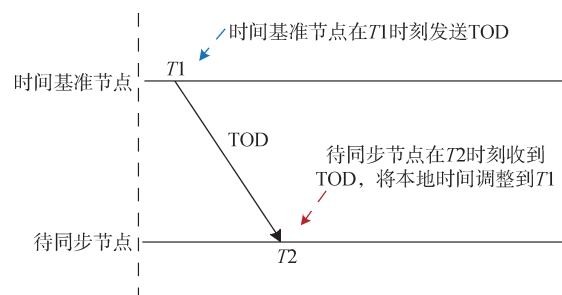


图5 网络同步策略示意图

Fig.5 Schematic diagram of network synchronizaiton strategy

持相位相干性, 接收端实现相位跟踪比较困难; 同时考虑到信道衰落等因素, 使用包络恒定的连续相位调制方式可以使用饱和功放, 有利于提高功放效率、减小信号的非线性失真。最小频移键控(Minimum-Shift Keying, MSK)为恒包络调制, 调制信号包络恒定、相位连续, 容易实现非相干解调, 比较适用于高速跳频系统。MSK的调制信号频谱如图6所示, 频谱主瓣能量集中, 旁瓣滚降衰减快, 频带利用率高。

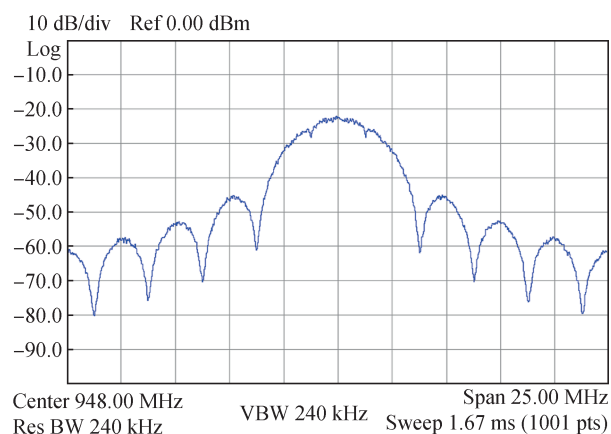


图6 MSK调制信号频谱

Fig.6 Spectrum of MSK modulation signal

高斯滤波最小频移键控(Gaussian Filtered Minimum Shift Keying, GMSK)针对传统MSK调制信号带宽较宽等缺点, 在MSK调制之前对信号进行高斯低通滤波, 得到较平滑的基带波形, 再进行MSK调制, 从而获得更窄的信号带宽、更高的频带利用率和更快的旁瓣衰减速率, 有效抑制了带

外干扰。高斯低通滤波器的冲击响应为:

$$h(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{\alpha} \exp\left[-\left(\frac{\pi}{\alpha} t\right)^2\right] \quad (1)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\ln 2}{2}} \cdot \frac{1}{B} \quad (2)$$

$$H(f) = \exp[-\alpha^2 f^2] \quad (3)$$

采用多符号最大似然检测法完成GMSK基带非相干解调, 不断将接收到的多符号调制信息与本地已知的参考信息进行匹配滤波, 一次性完成多个调制符号的恢复。由于该方法一次性累积了多个符号的能量, 其解调性能与一般的非相干解调方法(如n-bit差分解调)相比有较大提高。

为了提高低信噪环境下的非相干解调性能, 采用多符号检测(Multi-Symbol Detection, MSD)技术进行MSK解调。MSD算法的基本思想是: 接收信号经数字下变频得到GMSK基带信号。设每次检测的码元个数为 N , 则本地参考信息中所包含全部可能的发送信号组合有 2^N 种。将基带信号与本地参考信息的全部组合求共轭复相关, 并比较所有相关模值, 选取相关模值最大的一组本地参考信息作为判决结果。

2.5 链路层帧结构设计

链路层采用时分复用(Time Division Multiple Access, TDMA)方式实现多节点组网通信, 每个节点只在分配给自己的一定时间内发送信号, 其余时间内只接收信号。将系统时间划分为时帧和时隙两个基本单位, 若干个时隙组成一个时帧。TDMA时隙基本结构如图7所示。

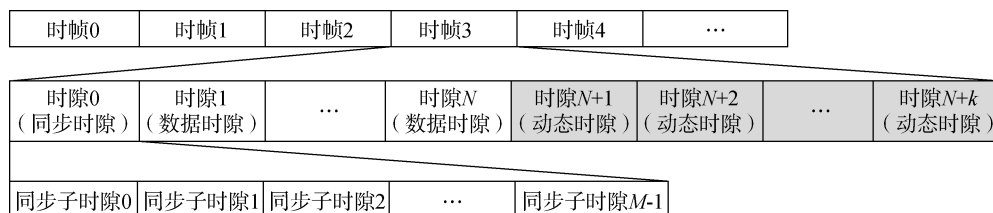


图7 TDMA时隙结构

Fig.7 TDMA timeslots structure

图7中, 时隙类型分为三类: 同步时隙、数据时隙和动态时隙。每个时帧的时隙0为同步时隙, 用于传输跳频同步信息。同步时隙中包含若干个同步子时隙, 同步时隙采用慢速跳频, 跳速为1 000跳/秒。数据时隙动态时隙采用高速跳频, 跳速为10 000跳/秒。

簇首节点固定占用同步时隙发送同步TOD用于全网节点时间同步; N 个节点分别占用时隙1~时隙 N 发送数据, 不发送时隙听其它节点发来的数据; 时隙 $N+1 \sim N+k$ 共 k 个时隙作为动态分配时隙, 所有节点共享, 用于传输节点高速数据或机间中继数据。

2.6 路由策略

本文采用一种表驱动路由协议, 每个节点的网络拓扑信息表进行周期性更新, 更新数据来源于与邻居节点所交换的分组信息。经充分信息交换后, 每个节点即可建立一张到全网各节点的路由表。对于分层的网络架构, 簇内节点之间通过交换分组信息建立本簇的路由表, 簇首节点之间通过交换分组信息建立二级中继路由表。簇内节点通信通过自身维护的路由表传递分组到目的节点; 不同簇之间的节点通信通过簇首和网关节点进行二级中继。这种方式大大降低了全网的路由开销。

机载节点通过接收其它节点的链路状态信息, 建立无人机集群网络各节点之间的链路状态矩阵 S_1 或 S_2 , S_1 为双向链路对称状态矩阵, S_2 为双向链路非对称状态矩阵:

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}, S_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据链路接收状态矩阵 $S(n)$ 、 $S(m)$, 可获得两个节点 (n, m) 之间 2 跳可达候选路由集, 从而得到节点 n 与节点 m 的中继节点集合 $R(1, n, x, m)$:

$$R(1, n, x, m) = S(n) \cap S(m) \quad (5)$$

根据中继节点集 $R(1, n, x, m)$ 中某个候选节点

$R(1, n, k, m)$ 的任务或中继负荷状态 $r_N(k)$ 决定是否由该节点承担中继转发功能。

如果由链路接收状态矩阵计算出的节点 (n, m) 间的 2 跳可达候选路由集为空, 即 $R(1, n, x, m) = \emptyset$, 说明节点 n 与节点 m 之间无法 2 跳中继到达, 则从节点 n 的链路接收状态矩阵 $S(n)$ 中计算出与节点 n 单跳可达且中继状态为可用的节点集合 $V(1, n, x)$, 取 $V(1, n, x)$ 中某一节点 $x = k$ 的链路接收状态矩阵 $S(k)$, 计算 $S(k)$ 与 $S(m)$ 的 2 跳可达候选路由集:

$$R(1, n, x, m) = S(k) \cap S(m) \quad (6)$$

选取节点 $x = j$ 即得到节点 n 到节点 k 、节点 k 到节点 j 、节点 j 到节点 m 的 3 跳中继路由集 $R(2, n, k, j, m)$ 。更多的 4 跳路由, 同理计算可得。

2.7 簇首自动选举策略

在任务中, 当簇首节点由于关机、无线电静默等原因无法正常工作时, 应由其它节点接替簇首。簇首自动选举策略为: ① 如果有副簇首, 优先选择副簇首; ② 若无副簇首, 选择一跳连通节点数最多的节点; ③ 若存在多个满足条件的节点, 则选择 ID 最小的节点。簇首自动选举处理流程如图 8 所示。

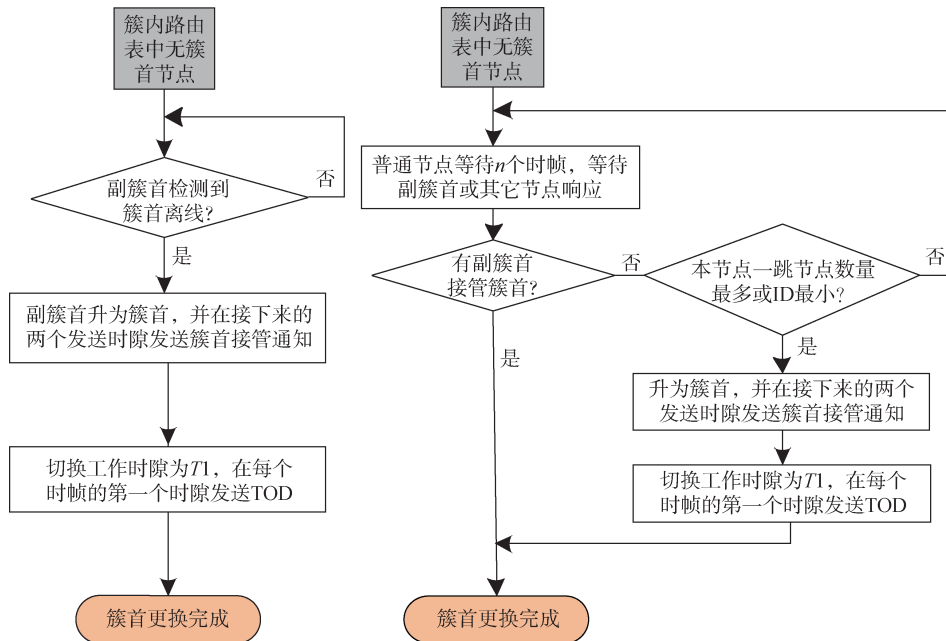


图 8 簇首自动选举流程

Fig.8 Automatic election process of cluster head

3 高速跳频无人机自组网终端实现

3.1 终端实现方案

根据第3章所述方案,设计并实现了一款基于高速跳频的机载自组网终端。机载自组网终端完成机载终端组网、测控信息收发、载荷业务信息回传以及机间任务协同。终端采用高速跳频组网技术,跳速为10 000跳/秒。

终端的原理框图如图9所示。数字基带基于软

件无线电方案设计,包括收发信道组合、射频信号处理单元、数字基带处理单元、接口单元、电源单元和时钟单元等模块。其中,数字基带处理单元是终端的核心,实现网络同步、跳频信号收发处理、网络接入控制以及网络路由等功能。基于通信终端小型化、集成化、软件化的设计思想,将变频信道集成到机载数据终端中,设备复杂度更低、系统集成度和可靠性更高。

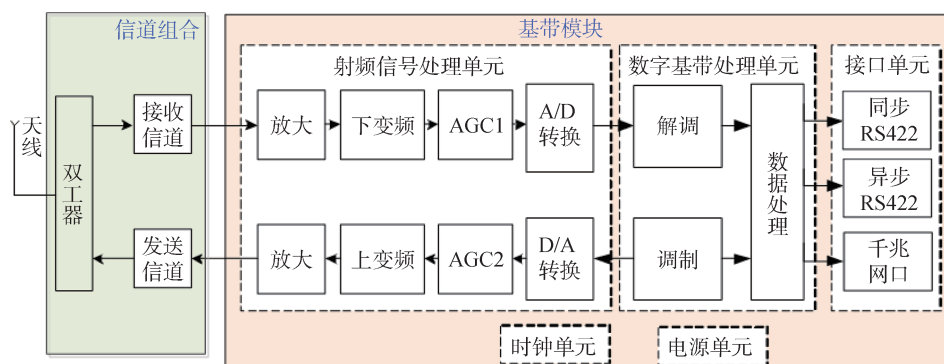


图9 终端原理框图

Fig.9 Block diagram of the terminal

3.2 跳频收发处理流程

跳频发射链路主要完成GMSK信号的调制和跳频等功能,采用全数字射频GMSK调制,处理流程如图10所示。GMSK是针对传统MSK调制信号带宽较宽等缺点,在MSK调制之前对矩形的比特流进行高斯低通滤波(预调滤波),得到一种较平滑的基带波形,然后再进行MSK调制,从而获得更窄的信号带宽、更高的频带利用率和更快的旁瓣衰减速率,有效抑制了带外干扰。

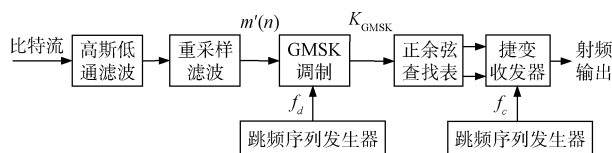


图10 全数字射频GMSK调制流程框图

Fig.10 Flow chart of all-digital radio frequency GMSK modulation

跳频接收链路用于完成接收信号的解跳、重采样滤波、数字AGC、差分鉴相、帧头捕获及跟踪、GMSK解调、跳频同步、解扩以及解码等后续处理,其处理流程如图11所示。

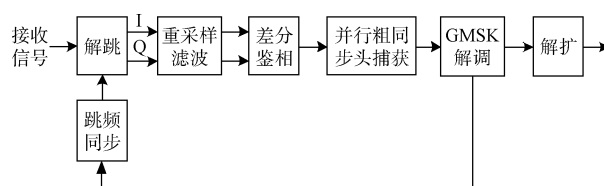


图11 接收解调处理流程框图

Fig.11 Flow chart of receiving and demodulation processing

3.3 跳频频率控制和同步实现方案

预先计算出终端跳频图案中每个频点对应的频率控制字,并存储在终端中,用于查表产生相应的载波频率。

簇首节点跳频控制方案如图12所示。簇首节点跳频控制模块按照跳频图案生成算法,输出相应的载波频率控制字。每个时帧的时隙0采用慢跳频,跳速为1 000跳/秒,选择地址索引2;其他时隙采用正常跳频,跳速为10 000跳/秒,选择地址索引1。

普通节点跳频控制方案如图13所示。普通节点跳频同步模块在提取出簇首节点发送的TOD、时帧计数、同步子时隙计数后,按照相同的算法计算出下一跳的载波频率字,并在本地跳频时隙

脉冲驱动下更新本地 TOD，以对簇首节点的载波频率进行跟跳。

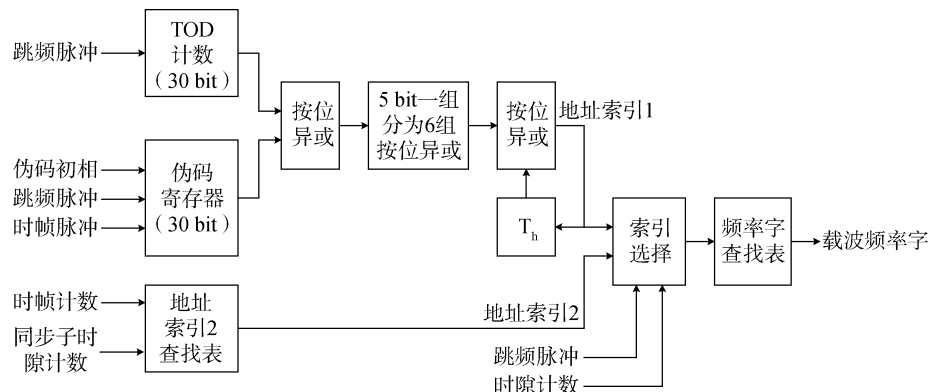


图 12 簇首节点跳频控制方案

Fig.12 Frequency hopping control scheme of cluster head

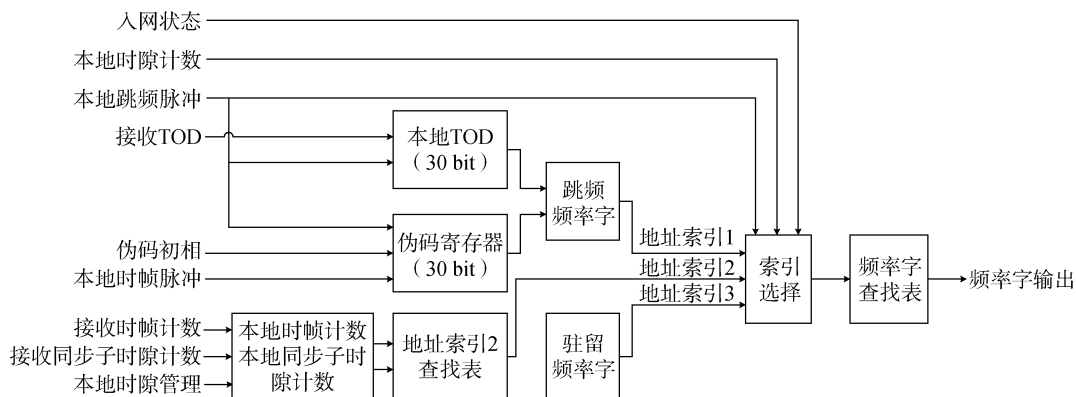


图 13 普通节点跳频控制方案

Fig.13 Frequency Hopping Control Scheme of Normal Node

未入网状态下，从节点在频率索引 k 上进行驻留等待。由于簇首节点每时帧的时隙 0 传输 i 个同步子时隙(选择地址索引 2)，广播慢速跳频图案共 j 个频点，经过 j/i 个时帧就能够遍历 j 个地址索引，因此从节点最长等待 j/i 个时帧，便可接收到簇首节点发送的入网/时间同步信息。入网后普通节点便可在本地相关信息下进行跟跳，直至掉线后，重新进入驻留等待状态。

3.4 终端开机工作流程

终端开机后的同步和入网流程如图 14 所示。终端开机后，簇首节点按照配置的广播跳频图案开始周期性广播发送 TOD 信息。非簇首节点从广播跳频图案中选择一个频点驻留搜索，若搜索到广播 TOD 帧，调整本地计数器进行网络同步。考虑到拒止环境下广播频点被干扰的情况，若驻留 F1 频点在一定时间内未搜索到 TOD 帧，则随机更换一个频点继续搜索。如果已更换 3 个搜索频点仍

未搜索到 TOD，则将自己设为簇首并开始广播 TOD。当网络中所有节点均完成了向簇首节点的时间同步，则全网同步完成。

3.5 测试验证

通过实验室有线和无线测试验证，并结合无人机搭载飞行试验，对高速跳频无人机自组网终端进行了关键技术验证，包括多节点组网能力、接收灵敏度和抗干扰性能。

以 5 台终端组网测试场景为例，终端 ID 分别为 1~5，构成 2 个子网，2 个子网采用正交的跳频图案，子网之间通过簇首节点互联。终端开机入网后，各终端节点在线状态和节点之间的链路连接状态如图 15 所示。终端完成 TOD 同步并入网后，对应 ID 的飞机被点亮。终端之间的无线链路建立后，机间链路状态指示灯变为绿色，例如机间链路状态第 3 行第 1 列指示灯为绿色，表示终端 (ID=3) 到终端 (ID=1) 的链路为连通状态。

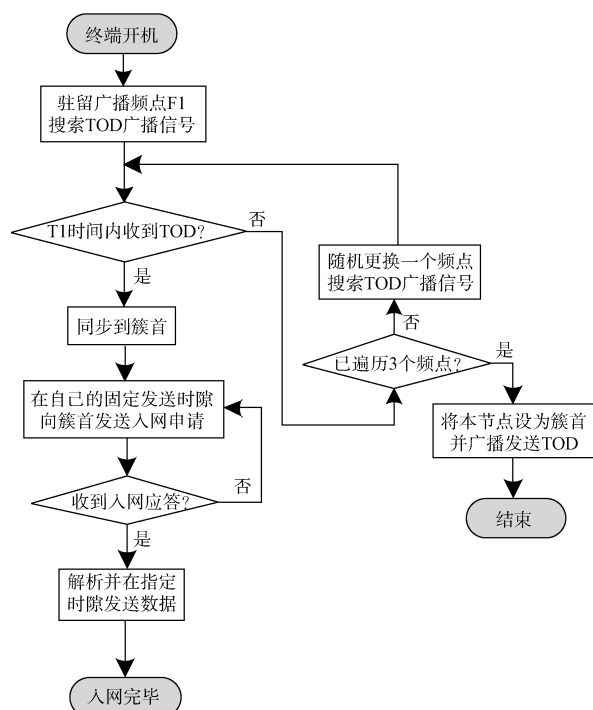


图 14 终端同步和入网流程

Fig.14 Flow Chart of Synchronizaiton and Network Access

在 300 MHz 宽带跳频模式下, 以接收数据误码率优于 10^{-5} 为参考标准, 测试标定 5 台终端的接收灵敏度均优于 -102 dBm, 与理论计算基本一致。

在接收信号为 -102 dBm 时, 通过调整干扰信号电平, 对终端抗干扰性能进行测试, 干扰信号类型包括窄带干扰、宽带干扰和跳频干扰, 干扰信号具体样式见表 1。在几种干扰样式下, 不同干信比下终端的接收误码率测试曲线如图 16 所示。根据测试结果, 在窄带干扰的干信比 40 dB、宽带干扰的干信比 20 dB、跳频干扰的干信比 20 dB 条件下, 误码率优于 10^{-4} , 链路仍具有较高的信息传输质量。

从抗干扰测试结果来看, 跳频组网终端抑制窄带干扰能力突出, 因窄带干扰频点与跳频图案中的频率碰撞的概率较低。宽带干扰由于提高了接收机系统噪声, 跳频干扰频点又与跳频图案重合, 这两种干扰样式对大多数跳频频率均构成了干扰, 降低了接收机的接收性能, 因此, 终端对抗宽带干扰和跳频干扰的能力相比窄带干扰差一些。

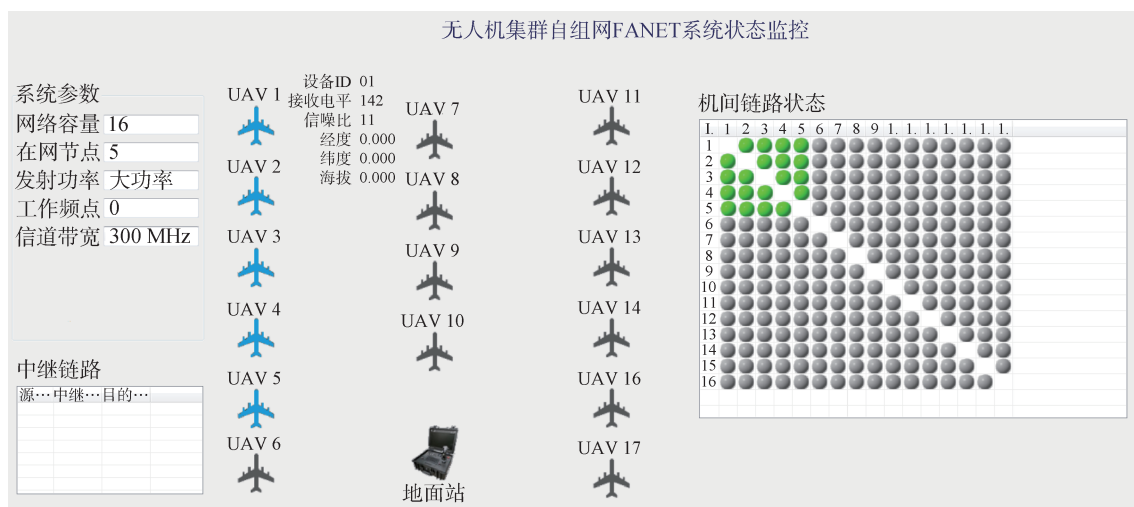


图 15 多节点组网状态监控界面

Fig.15 Network monitoring page

表 1 干扰信号类型

Table 1 Interference signal type

干扰信号类型	干扰信号说明
窄带干扰	干扰信号为单载波, 频率与跳频图案中的频点重合。
宽带干扰	宽带干扰信号频点涵盖 300 MHz 跳频带宽内约一半的跳频频点。
跳频干扰	跳频干扰位于接收信号带宽范围内, 跳频图案与工作信号跳频图案相同, 干扰信号跳速为 2 500 跳/秒。

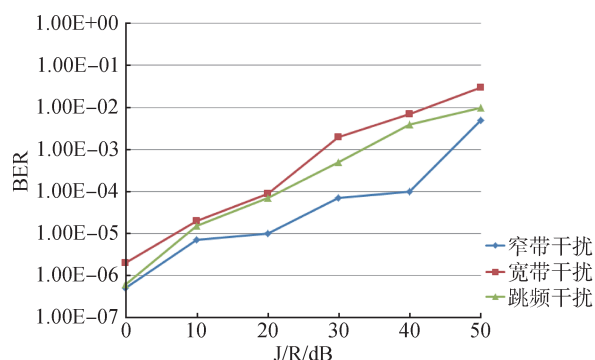


图 16 不同干扰样式下终端接收误码率测试曲线

Fig.16 Bit error ratio curve under different interference types

4 应用场景

高速跳频无人机自组网终端可装备多型小型无人系统形成无人机集群系统,应用于未知区域察打一体化自主作战、反恐和安防等任务,对未知区域敌方的地面目标进行侦察、定位、识别与持续跟踪,确认其威胁程度,并对具有一定威胁的目标进行打击,完成作战任务后,以一定的编队形式返航。

无人机编队从基地出发,以一定编队形式快速飞往地方未知区域,到达地方位置区域后,按照一定队形通过机载载荷对区域进行自主搜索扫描;当无人机搜索到地面目标后,对其进行快速自主识别,将获取的目标信息通信告知所有无人机,集群自动计算派遣无人机对检测出的目标进行跟踪检测;其余无人机继续对剩余未搜索完区域进行搜索,直至覆盖全部的目标区域;当跟踪状态的地面目标发生分离逃逸,此时跟踪无人机通知其他无人机,派遣其余无人机跟踪逃逸目标;当其余无人机完成目标区域的搜索任务后,综合考虑已发现的目标数量和已有的目标跟踪飞机数量而决定飞往的目标;当无人机确认获取跟踪目标的威胁信息后,根据目标的威胁程度,决定对目标进行打击,打击目标任务完成后返回基地。

5 结束语

本文介绍了一种高速跳频无人机自组网终端的设计和工作原理,并进行了多节点组网功能、接收灵敏度和抗干扰性能测试。测试结果表明,高速跳频无人机自组网终端具有良好的灵敏度、

抗干扰性能和多节点组网能力。设备集成度高、重量轻、体积小、功耗低,可作为一种低成本、轻量化的抗干扰无人机数据链产品,在拒止环境下无人机集群组网通信中具有良好的应用前景。

本文采用的分级分簇网络拓扑结构仍有以下待改进之处:一是需要适应网络拓扑变化的分簇算法和簇维护算法,增加了计算复杂度;二是簇间通信都要经过簇首转发,节点之间路由不一定是最优路由,可能会增加报文时延;三是簇首需承担簇内节点的同步、网络管理、簇间路由等工作,负荷较重,若设计不当可能成为网络的瓶颈。因此,优化分簇算法并选取合适的网关节点承担簇间转发功能,进一步提升网络数据传输效率,提高网络健壮性。另外,优化终端接收信道以提高抗宽带干扰性能,采用波形抗干扰增强、联合编码、频谱感知、智能选频等技术,可以进一步提升终端的抗干扰性能。这将是今后需要重点研究的内容。

参考文献

- [1] 黄雷. 美军小精灵无人机群项目发展现状综述[J]. 飞航导弹, 2018, 23(7): 44-47.
- [2] 焦士俊, 王冰切, 刘剑豪, 等. 国内外无人机蜂群研究现状综述[J]. 航天电子对抗, 2019, 35(1): 61-64.
JIAO Shijun, WANG Bingqie, LIU Jianhao, et al. Review of drone swarm research at home and abroad[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2019, 35(1): 61-64.
- [3] 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): 69-74.
ZHAI Zhongying, YAN Chaoxing. A survey on UAV TT&C Ad hoc networking techniques[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(4): 69-74.
- [4] 贾永楠, 田似营, 李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(S1): 723-738.
JIA Yongnan, TIAN Siying, LI Qing. Development of unmanned aerial vehicle swarms[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(S1): 723-738.
- [5] ADVANCE. Blue Bear demos collaborative 20-drone swarm on BVLOS ops[EB/OL]. (2020-10-21) [2020-12-27]. <https://www.adsadvance.co.uk/blue-bear-demos-collaborative-20-drone-swarm-on-bvlos-ops.html>.
- [6] 段海滨, 申燕凯, 赵彦杰, 等. 2020年无人机热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 233-247.
- [7] 王小刚. 非线性滤波方法在无人机相对导航上的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

- [8] 顾旭平, 唐大全, 唐管政. 无人机集群关键技术研究综述[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(4): 21-26, 30.
GU Xuping, TANG Daquan, TANG Guanzheng. Summary of research on key technologies of UAV swarms[J]. Automation & Instrumentation, 2021(4): 21-26, 30.
- [9] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1123-1152.
- [10] 鲁信金, 雷菁, 施育鑫. 基于旋转置乱的索引跳频抗干扰加密方法[J]. 通信学报, 2021, 42(12): 27-34.
LU Xinjin, LEI Jing, SHI Yuxin. Index modulation aided frequency hopping anti-jamming and encryption method based on rotation scrambling[J]. Journal on Communications, 2021, 42(12): 27-34.
- [11] 赵知劲, 朱家晟, 叶学义, 等. 基于多智能体模糊深度强化学习的跳频组网智能抗干扰决策算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(8): 2814-2823.
- [12] 刘春玲, 刘敏提, 丁元明. 基于多域联合的无人机集群认知抗干扰算法[J]. 计算机工程, 2020, 46(12): 193-200.
LIU Chunling, LIN Minti, DING Yuanming. Cognitive anti-jamming algorithm for UAV cluster based on multiple domain combination[J]. Computer Engineering, 2020, 46(12): 193-200.
- [13] 杨君一, 李博, 张钦宇. 基于物理层网络编码的无人机中继网络资源优化[J]. 通信学报, 2021, 42(9): 12-19.
YANG Junyi, LI Bo, ZHANG Qinyu. Resource optimization for UAV relay networks based on physical-layer network coding[J]. Journal on Communications, 2021, 42(9): 12-19.
- [14] 顾凌枫, 何明, 陈国友, 等. 无人机集群系统弹性研究[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 156-162.
GU Lingfeng, HE Ming, CHEN Guoyou, et al. Research on unmanned aerial vehicle swarm system resilience[J]. System Engineering and Electronics, 2021, 43(1): 156-162.
- [15] 崔朝阳, 孙甲琦, 徐松艳, 等. 适用于集群无人机的自组网安全分簇算法[J]. 山东大学学报(理学版), 2018, 53(7): 51-59.
CUI Zhaoyang, SUN Jiaqi, XU Songyan, et al. A secure clustering algorithm of Ad hoc network for colony UAVs[J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2018, 53(7): 51-59.
- [16] CHEN Y, LIANG J H, ZOU S, et al. Research on topology control algorithm of UAV Ad Hoc network[J]. Computer Simulation, 2010, 27: 33-37.
- [17] WEI D, CHAN H A. A survey on cluster schemes in Ad Hoc wireless networks[C]//International Conference on Mobile Technology, 2009.
- [18] MEHTA S, SHARMA P, KOTTECHA K. A survey on various cluster head election algorithms for MANET[C]//Nirma University International Conference on Engineering, 2012.
- [19] 宋福晓. 近期数据无线电台(NTDR)网络仿真系统的设计与实现[C]//中国电子学会电子对抗分会第十七届学术年会, 2011.
- [20] 高雅婷. 基于群组协作的高能效低时延物联网多跳路由技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [21] YETGIN H, CHEUNG K T K, EL-HAJJAR M, et al. A survey of network lifetime maximization techniques in wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 828-854.
- [作者简介]
孙婉莹 1982年生, 硕士, 高级工程师。
罗翔 1991年生, 硕士, 工程师。
王圆圆 1976年生, 硕士, 研究员。
付林罡 1982年生, 硕士, 研究员。
- (本文编辑: 杨秀丽)