

# 机载场景中无线传感器网络系统与时间敏感网络关键技术的融合研究

毛 威 唐小洁 张馨文

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723200

**摘 要:** 机载场景中无线传感器网络 (WSN) 与时间敏感网络 (TSN) 融合意义重大。机载环境有动态拓扑、电磁复杂等特性, 对时间协同、流量调控等有严苛需求。本文剖析WSN的低功耗、自组织等关键技术, 阐述TSN的时间同步等核心机制, 构建分层融合模型与混合组网模式, 实现两者优势互补, 为机载网络稳定运行、高效数据传输提供技术支持。

**关键词:** 机载场景; 无线传感器网络; 时间敏感网络; 融合技术; 分层融合模型

引言: 在航空领域, 机载网络的高效稳定运行至关重要。机载环境独特, 动态拓扑变化频繁、电磁环境复杂、能源与设备约束明显, 对网络的时间协同、流量调控、容错能力等提出极高要求。无线传感器网络 (WSN) 具备灵活部署优势, 时间敏感网络 (TSN) 能保障关键任务实时性。将二者融合, 可充分发挥各自长处, 满足机载场景复杂需求, 推动航空技术发展。

## 1 机载场景特性与关键技术需求分析

### 1.1 机载环境特殊性

机载环境的动态拓扑特性尤为显著。飞行器在巡航、起降等不同阶段需完成姿态调整, 搭载的各类传感器节点随之产生位置与相对距离的实时变化, 导致网络拓扑结构呈现高频次、非周期性的动态重构特征。这一特性对通信链路的自适应能力提出严苛挑战, 相关研究在航空电子网络领域已有明确论述。电磁环境复杂性是另一突出问题<sup>[1]</sup>。机舱内部密集部署的电子设备运行时会产生多频段电磁辐射, 外部空间亦存在雷达、通信等各类电磁信号干扰, 航空频谱资源由国际民航组织严格规划分配, 可用频段范围受限, 频谱资源的高效利用成为核心难题。能源与设备约束同样关键。飞行器的能源供给依赖机载电源系统, 其容量受载重限制存在明确上限, 而传感器、通信模块等设备的能耗直接影响续航能力。与此同时, 航空设备需满足轻量化设计标准以降低机身负载, 材料选型与结构设计均需在性能与重量间实现精准平衡, 这一要求在航空工程设计规范中有着详细界定。

### 1.2 核心需求

时间协同是多传感器数据融合的基础保障。机载雷达、惯性导航、光电探测等多源设备采集的数据需达成

时间基准统一。依据航空电子系统设计标准, 该时间基准偏差需控制在1-5微秒级别, 才能确保数据关联的准确性, 为飞行决策提供可靠支撑。流量调控决定任务执行的稳定性。机载系统中数据类型差异显著, 飞行控制、发动机状态监测等关键任务数据对传输时延与可靠性要求极高。关键任务数据要求传输时延不超过1-10毫秒, 数据传输可靠性需达到99.99%以上, 需通过优先级调度机制保障其传输的确定性, 避免非关键数据挤占带宽, 这一技术方向在航空通信协议研究中已形成成熟理论体系。容错能力是系统安全的核心屏障。机载设备长期处于振动、温度波动等恶劣工况, 单点故障风险客观存在。依据航空安全标准, 系统需具备故障自诊断与自恢复能力, 通过冗余设计与动态重构技术, 在设备异常时快速切换至备用链路或功能模块, 确保整体运行连续性。

## 2 无线传感器网络 (WSN) 关键技术

### 2.1 低功耗设计

在无线传感器网络中, 低功耗设计是保障网络长期稳定运行的关键。传感器节点通常电池供电, 且部署环境复杂, 更换电池难度大, 降低节点能耗是延长网络生命周期的重要手段。能量收集技术为解决节点能源问题提供新思路。振动能量转化技术利用周围环境振动能量, 经特定装置转化为电能供电。在一些工业监测场景, 机器设备振动频率在10 - 100Hz间, 利用该装置可有效收集能量, 为附近节点提供持续电力, 单个节点每天收集能量在10 - 100mWh间。热能转化技术将环境中热能转化为电能, 在温度变化大的环境, 如发动机周围、高温炉附近, 发动机周围温度变化50 - 200℃, 高温炉附近100 - 500℃, 热能转化装置能收集热能并转化, 单个装

置每天转化电能5 - 50mWh, 满足节点部分能源需求<sup>[2]</sup>。动态休眠调度算法也是降低节点功耗的有效方法, 它根据节点任务需求和网络状态, 动态调整工作模式。当节点没有数据采集和传输任务时, 将其切换到休眠状态, 关闭不必要硬件模块以降低能耗; 当有任务触发时, 迅速唤醒节点使其进入工作状态。通过合理设置休眠和唤醒时机, 能在保证网络性能前提下, 最大程度减少节点能耗。

## 2.2 自组织组网

无线传感器网络的自组织组网能力使其能够适应复杂多变的部署环境。基于拓扑控制的动态路由协议是实现自组织组网的核心技术之一。该协议根据网络的拓扑结构, 动态地选择最优的路由路径, 确保数据能够高效、可靠地传输。在网络拓扑发生变化时, 如节点加入、离开或移动等情况, 动态路由协议能够及时调整路由路径, 保证网络的连通性和通信质量。在节点数量为100-1000个的无线传感器网络中, 动态路由协议能够在1-5秒内完成路由路径的调整。多跳中继与链路质量优化也是自组织组网的重要环节。由于传感器节点的通信距离有限, 当数据需要传输到较远的目的节点时, 需要通过多跳中继的方式实现。通过选择合适的中继节点, 可以扩展网络的覆盖范围。在理想环境下, 单个传感器节点的通信距离在10-100米之间, 通过多跳中继, 网络覆盖范围可扩展至1000-10000米。同时对链路质量进行优化, 采用链路质量评估指标, 如信号强度、误码率等, 选择链路质量较好的路径进行数据传输, 能够有效提高数据传输的可靠性和稳定性。

## 2.3 数据融合与压缩

在无线传感器网络中, 大量的传感器节点会采集到海量的数据, 这些数据如潮水般涌来, 若直接传输, 不仅会消耗大量的网络带宽, 让原本有限的网络资源愈发紧张, 还会耗费大量能量, 加速节点电池的损耗, 甚至可能造成网络拥塞, 影响整个网络的正常运行。因此, 数据融合与压缩技术显得尤为重要。分布式滤波算法, 如分布式卡尔曼滤波, 能够对多个传感器节点采集的数据进行融合处理。该算法通过在各个节点上分布式地计算滤波参数, 将多个节点的数据进行融合, 得到更准确的状态估计结果。这种方法不仅能够提高数据的准确性, 让数据更能反映真实情况, 还能减少数据传输量, 减轻网络传输负担。特征提取与冗余数据削减技术则是对采集到的数据进行进一步处理。通过提取数据的关键特征, 去除数据中的冗余信息, 能够在保留数据主要特征的前提下, 大大减少数据量。例如, 在对图像数据进

行处理时, 提取图像的边缘、纹理等特征, 去除图像中的重复像素信息, 可以有效压缩图像数据, 降低数据传输和存储的成本, 提升网络整体性能。

## 3 时间敏感网络 (TSN) 核心机制

### 3.1 时间同步技术

在时间敏感网络应用于机载场景时, 精准的时间同步是保障各类任务有序开展的基础。IEEE1588v2协议原本在通用网络环境中有着广泛应用, 但机载环境具有独特性, 需对其进行适应性改进。机载环境存在动态拓扑变化、电磁干扰等问题, 这些因素会影响时间同步的精度与稳定性。在动态拓扑变化频繁的机载网络中, 未改进的IEEE1588v2协议时间同步误差可能达到100-500微秒。针对这些问题, 研究人员对IEEE1588v2协议进行优化, 例如改进时钟同步算法, 增强协议对网络拓扑动态变化的适应能力, 使其在机载复杂环境下仍能实现高精度时间同步, 满足机载系统对时间一致性的严苛要求。优化后的协议在相同环境下, 时间同步误差可降低至1-10微秒。混合同步策略也是应对机载环境挑战的有效手段<sup>[3]</sup>。机载网络中既存在有线连接, 也有无线通信。有线连接具有稳定性高、抗干扰能力强的特点, 而无线通信则具备灵活部署的优势。混合同步策略充分发挥有线和无线的优势, 通过有线连接为关键节点提供高精度时间基准, 再利用无线通信将时间信息扩展到其他节点, 实现有线与无线的协同同步, 提升整个机载网络时间同步的可靠性和覆盖范围。

### 3.2 流量整形与调度

时间感知整形器 (TAS) 在机载任务流量调度中发挥着关键作用。机载任务种类繁多, 不同任务对实时性的要求差异较大。TAS能够根据任务的优先级, 对网络流量进行整形和调度。例如, 飞行控制、导航等关键任务对实时性要求极高, TAS会为这些任务分配专用的时间槽, 确保关键数据能够在规定时间内准确传输, 保障飞行安全。这种基于时间槽的调度方式可有效避免关键任务数据流之间的冲突, 大幅降低数据传输的端到端延迟。信用积分机制 (CBS) 则侧重于对非关键数据的带宽分配。在机载网络中, 除了关键任务数据, 还存在大量的非关键数据, 如设备状态监测数据等。CBS通过为每个数据流设置信用积分, 根据信用积分的情况动态分配带宽。当数据流的信用积分较高时, 可获得更多的带宽资源进行数据传输; 当信用积分较低时, 则限制其带宽使用, 从而在保证关键任务数据传输的前提下, 合理利用网络带宽资源, 提高网络的整体效率。

### 3.3 资源预留与冗余设计

为确保机载网络在各种情况下都能稳定运行,资源预留与冗余设计必不可少。静态与动态资源预留结合方案是一种有效的资源管理方式。静态资源预留能够为关键任务预先分配固定的网络资源,保证关键任务在任何情况下都有足够的资源可用,即使遭遇突发的网络流量高峰也不会出现资源挤占问题。动态资源预留则根据网络的实际运行情况,实时调整资源分配。当网络负载较轻时,释放部分预留资源供其他任务使用;当网络负载增加时,及时增加预留资源,以满足任务需求。双链路冗余传输路径规划进一步提升了机载网络的可靠性。在机载网络中,为重要数据传输规划两条独立的链路,两条链路采用差异化的路由设计,可有效规避共同的故障风险点。当一条链路出现故障时,数据能够迅速切换到另一条链路进行传输,避免因单点故障导致数据丢失或传输中断,确保机载系统能够持续稳定运行。

#### 4 WSN与TSN融合技术架构

##### 4.1 分层融合模型

在WSN与TSN融合的分层融合模型中,各层均承担着独特且关键的功能。物理层作为整个架构基础,引入5G与TSN无线桥接技术,实现高速稳定数据传输,将无线传感器网络与时间敏感网络无缝连接。同时采用抗干扰调制技术,可有效应对机载等复杂环境的电磁干扰,确保数据传输准确完整,为上层提供可靠物理传输通道。数据链路层聚焦时间同步与流量调度协同。时间敏感网络对时间精度要求极高,无线传感器网络数据传输具动态性。通过建立协同机制,能让两者在时间基准上一致,并根据不同任务需求合理调度流量。例如,为关键任务数据分配优先传输通道,保障及时准确送达,兼顾普通数据传输,提升网络整体效率。网络层负责跨域路由与QoS保障策略。在融合网络中,数据可能需在不同子网间传输,跨域路由技术能智能规划数据传输路径,确保数据快速准确到达目的地。QoS保障策略则根据不同应用需求,为数据提供不同等级服务质量,满足各类应用对网络性能的差异化要求。应用层进行任务协同控制接口设计。该接口为上层应用提供统一操作界面,使不同应用能方便调用融合网络功能,实现任务高效协同控

制,提升整个系统智能化水平。

##### 4.2 混合组网模式

混合组网模式采用有线TSN骨干网与无线WSN终端的异构集成方式。有线TSN骨干网具有高带宽、低延迟、高可靠性的特点,作为融合网络的核心传输通道,承担着大量关键数据的传输任务<sup>[4]</sup>。有线TSN骨干网的带宽可达1-10Gbps,传输延迟在1-10微秒之间。无线WSN终端则具有部署灵活、成本低的优势,能够覆盖有线网络难以到达的区域,实现对环境的全面感知。二者协同还能增强网络容错性,当有线或无线部分出现故障时,另一部分可继续维持部分功能。在混合组网中部署边缘计算节点,并开展数据预处理工作。边缘计算节点靠近数据源,能够对无线传感器网络采集到的数据进行初步处理和分析,提取有价值的信息,减少不必要的数据传输,降低网络负载。边缘计算节点可在1-10毫秒内完成对采集数据的初步处理。边缘计算节点还能根据处理结果,及时做出决策,提高系统的响应速度和实时性。

##### 结束语

机载场景中无线传感器网络与时间敏感网络融合技术的研究,为航空领域网络建设带来新契机。通过构建分层融合模型与混合组网模式,实现两者优势互补,有效应对机载环境挑战,保障网络稳定运行与数据高效传输。该融合技术在提升飞行安全、优化任务执行等方面作用显著,后续可进一步探索优化,以适应航空领域不断发展的需求。

##### 参考文献

- [1]陈燎,孙文慧,李仲兴.机载无线传感器网络的传输可靠性研究[J].电子设计工程,2023,31(24):90-94,99.
- [2]简荣坤,井云鹏,修威国,等.机载无线传感器小型化微带天线设计[J].传感器与微系统,2022,41(8):80-84.
- [3]张磊,王盼盼.时间敏感网络流量整形技术综述[J].微电子学与计算机,2022,39(1):46-53.
- [4]李伟,白杨,祁步仁,等.面向智能变电站的时间敏感网络动态时间窗口划分方法[J].山东电力技术,2025,52(06):75-85+94.