Website：ycyk.brit.com.cn

大规模箭载无线传感网络技术研究

甄　越，彭泳卿，冯红亮，史德生
（北京遥测技术研究所 北京 100076）

摘要：无线传感网络技术是未来火箭测量系统发展的关键技术之一，大规模的箭载无线传感网络技术是箭载测量系统的发展趋势。简单介绍了现有箭载无线传感器网络的应用以及目前国内对于箭载无线传感网络的研究现状，归纳了其技术特点，在此基础上提出了对新一代大规模箭载无线传感器网络设计的思路与相关技术，为进一步实现箭载测量系统的“无缆化”提供参考。

关键词：无线传感网络；箭载测量系统；大规模
中图分类号：TP212.9　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-1000(2023)06-0111-08
DOI：10.12347/j.ycyk.20230726002
引用格式：甄越，彭泳卿，冯红亮，等. 大规模箭载无线传感网络技术研究[J]. 遥测遥控，2023，44(6)：111–118.

Research on large-scale arrow-borne wireless sensor network technology

ZHEN Yue，PENG Yongqing，FENG Hongliang，SHI Desheng
（Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China）

Abstract: Wireless sensor network technology is one of the key technologies for the development of rocket measurement system in the future, and large-scale arrow-borne wireless sensor network technology is the development trend of arrow-borne measurement system. This paper briefly introduces the application of the existing arrow-borne wireless sensor network and the current research status of the domestic arrow-borne wireless sensor network, summarizes its technical characteristics, and proposes a new generation of large-scale arrow-borne wireless sensor network. The design ideas and related technologies provide a reference for future realizing the cableless of arrow-borne measurement system.

Keywords: Wireless sensor network; Arrow-borne measurement system; Large-scale
Citation: ZHEN Yue, PENG Yongqing, FENG Hongliang, et al. Research on large-scale arrow-borne wireless sensor network technology [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(6): 111–118.

引　言

无线传感网络采用灵活、简易的无线通信方式，可以自发完成对监测区域的传感网络覆盖，在信息感知、数据传输中扮演着重要角色[1]。随着技术的发展，大规模的无线传感网络规模更大、测量参数种类更多、节点间交互更密切，可以满足的应用需求也更加丰富，具有监测范围广、网络信息容量大的特点，是无线传感网络发展的新趋势。

传感网络相当于火箭的“感官”和“神经”，是保证任务圆满完成最关键的部分之一。而传统的箭载传感网络都是由电缆相互连接，电缆铺设范围广，占据空间大，严重挤压舱内空间，大幅增加了火箭载荷[2]。大规模无线传感网络为满足对火箭舱内多环境参数的测量，改进上述传统箭载传感网络的缺陷，提供了一个新的解决方案。

1　箭上搭载大规模无线传感网络的技术难点

无线传感网络因其灵活性、低成本、微型化等特点，能有效弥补传统有线传感网络在火箭状态监测应用中的局限性。但火箭舱内的应用环境与民用场景存在较大的差异，在运载火箭舱内布设大规模无线传感网络主要有以下三个技术难点亟待突破。

基金项目：国家重点研发计划（SQ2021YFB3200261）
收稿日期：2023-07-26　**修回日期：**2023-08-11

1.1　数据的可靠采集与传输

箭上搭载的传感网络在采集速率、实时性、传输速率、通信距离等方面都有区别于一般应用要求[3]。首先，由于运载火箭舱内结构复杂，金属设备繁多，可能会对无线信号的传输造成遮挡、反射、多径等干扰，同时由于大规模的无线传感网络节点部署范围广，距离较远的子节点会存在传输信号弱、传输速率低的问题；网络采集数据种类多，不同的参数所需的采样率不同。在箭上搭载大规模无线传感网络，保证网络可以快速可靠地处理大量传感数据的采集与传输工作是关键所在。

1.2　能源挑战

无线传感网络是一个能量受限的网络，子节点多采用电池供电，一旦电池能量耗尽，子节点就无法工作。火箭舱内环境复杂，子节点一经布设便无法更换电池。如何在保证网络的业务质量良好、连通性完整、可靠性高、传输稳定的前提下，更有效地使用节点能源，使整个无线网络的生命更加持久，是箭载应用需要考虑的问题。

1.3　箭载复杂环境下的设备安全

火箭发射与飞行是一个非常复杂的过程，无线传感网络测量系统中既有电池又有无线通信信号，在实际的运载火箭飞行应用中，需要保证电池在恶劣多变的飞行环境状态中的安全与稳定，同时还要充分考虑电池和无线信号对火箭其他系统的正常运行带来的影响。

2　国外航天领域无线传感网络应用现状

美国国家航空航天局(NASA)最早于 1997 年在航天飞机上验证了无线传感技术的可行性。随着技术的逐步完善，其在航天器微重力、振动、冲击、噪声、压力、过载等参数测量中都获得了应用。图 1 所示为 NASA 为监测航天飞机升空和降落过程中机翼结构的运行状态而研制的无线传感和数据智能分析系统。

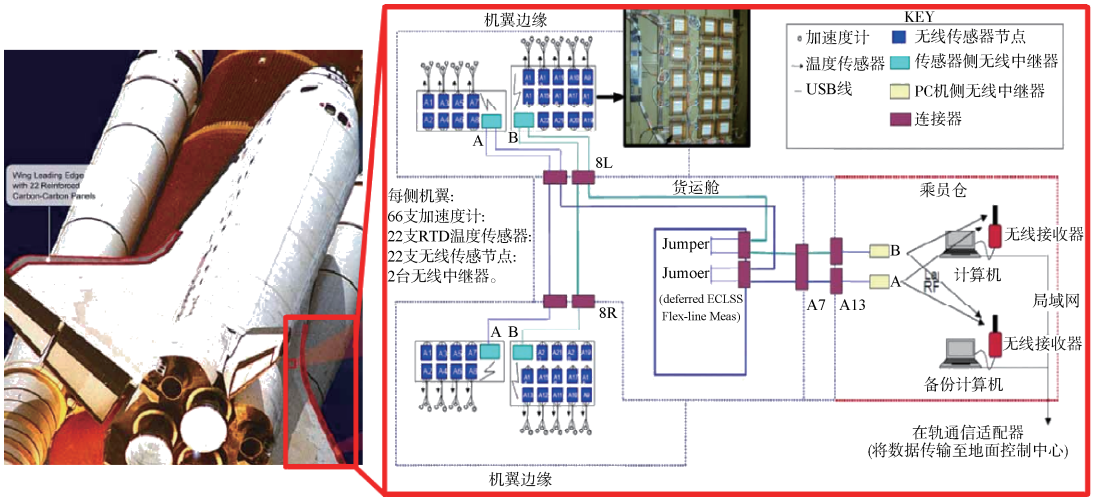

图 1　航天飞机机翼振动、温度参数无线传感和智能数据分析系统

Fig1　Aerospace craft wing unit parameter of temperature and vibration

系统包含 66 支三轴加速度传感器和 22 支温度传感器，测量数据通过无线通信技术传输至中继器，传感器侧的中继器通过 RS-485 总线将数据传输至乘员仓内的中继器，乘员仓侧的中继器再通过无线传输将数据传输至计算机进行分析，实现了数据融合和机翼结构智能健康监测[4]。

国际空间站内无线传感器的应用也相对广泛，其太阳能组件内部关键电子元器件的温度参数由于需要实时监控，使用了无线温度监控系统，如图 2 所示；“Kibo”实验舱内采用了无线微重力测量单元以实现对空间微重力的测量，可实现微 g 量级的测量分辨率。

国际对于无线传感网络在航天领域的研究一直都在进行，例如美国宇航局艾姆斯研究中心(ARC)通过搭建了一套无线传感系统，验证了基于 IEEE 802.16.2 网络架构，航天器搭载 ZigBee 无线传感网络的可行性[5]；日本的可重复使用飞行器实验(RVT)进行了无线传感网络的搭载实验[6]；欧空局基于 IEEE 802.15.4 UWB PHY 标准，进行的超宽带无线协议在航天器有效载荷网络内实现无线

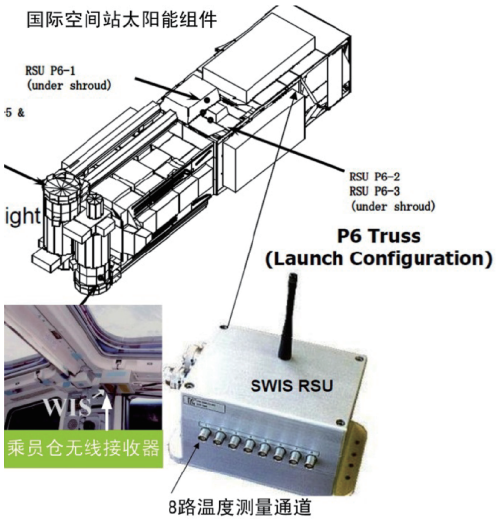

图 2　国际空间站太阳能组件无线温度监控系统

Fig. 2　Wireless temperature monitoring system on ISS

通信的尝试[7]等。

3　国内箭载无线传感网络测量系统的应用现状

3.1　已搭载的火箭用无线传感网络

无线传感网络技术在航天领域还处于起步和探索阶段，目前国内已使用无线传感系统的火箭有长征三号乙火箭、OS-X0 火箭及天行一号火箭[7]。

长征三号乙火箭作为国内最早搭载无线传感网络的运载火箭，共搭载了 8 个用于环境测量的子节点，分别对温度、湿度、压力和高低频振动频率进行了测量，网络协议采用 ZigBee 协议和时分复用技术，使用休眠机制对能源进行了控制。此次对于箭上搭载无线传感网络的尝试具有跨时代的意义，但网络搭载节点数量少，使用的 ZigBee 协议传输速率低，不适用于未来在运载火箭中大规模搭载无线传感网络的趋势。

OS—X0 火箭和天行一号火箭的无线传感网络由同一团队研发设计。网络采用超宽带(Ultra Wideband，UWB)通信技术，验证了其在舱内传输的可靠性，同时定制了专有协议以保证网络的低时延。天行一号系统相较 OS-X0 网络协议可适配多种测量参数。与 ZigBee 协议相比专有协议虽然更加轻量、可靠，但 UWB 技术带宽利用率低，且功耗大，无线子节点仍需用电缆供电，限制了网络的扩展性。

3.2　国内箭载无线传感网络研究现状

国内各高校机构也一直在做箭载无线传感网络的研究。2013 年，北京邮电大学唐斌针对航天器的无线数据采集网络，设计了一个可以自适应星型、树型和链型拓扑结构的网络协议[8]。该协议满足火箭用无线传感网络动态拓扑结构的需求。

2018 年，东南大学王飞设计了一种应用于航天器无线数据采集的网络层协议，该协议基于 uIP 协议栈，实现了星型速变类传感节点网络和最多三跳的网状缓变类传感节点网络的高可靠组网和传输功能[9]；中北大学李慧使用集成 MEMS 加速度计的 CC3100 2.4 GHz Wi-Fi 芯片，实现了对火箭舱内力学监测系统无线传感网络的设计[10]。箭载力学节点内部结构如图 3 所示。

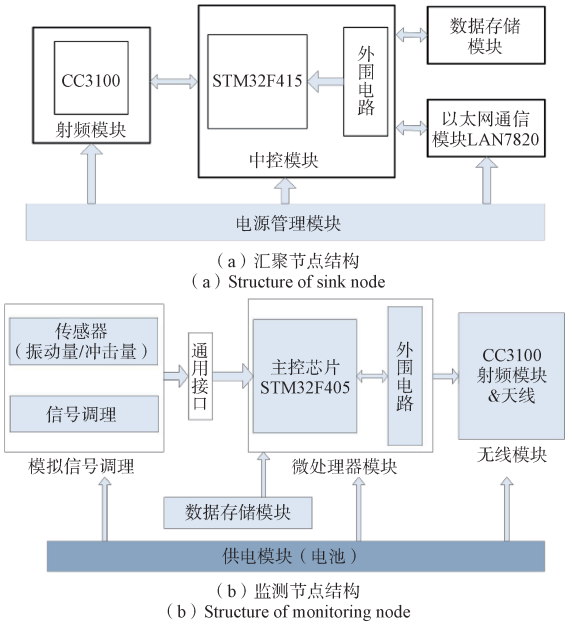

图 3　中北大学箭载力学节点内部结构

Fig. 3　The internal structure of arrow-borne mechanics node by the North University of China

2019 年，北京遥测技术研究所崔思阳等人设计了一种基于 CC430 适用于航天器的星型无线传感网络，利用精准时间同步技术、低功耗侦听技术和休眠技术实现了网络的低功耗温度测量[11]，其箭载无线传感系统如图 4 所示。哈尔滨工业大学李钦鹤利用基于 IEEE 802.15.4 的超宽带技术设计了一种火箭舱内通信网络，传输带宽达到 2.82 Mbps[12]。

2021 年，哈尔滨工业大学罗五江基于 IEEE 802.11 协议，利用 Wi-Fi 技术实现了火箭舱内高速率数据采集技术研究[13]；中北大学朱志斌使用 Sub-

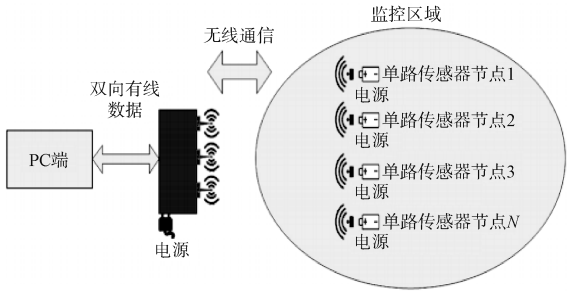

图 4　北京遥测技术研究所箭载无线传感系统

Fig. 4　Arrow-borne wireless sensor system by Beijing Research Institute of Telemetry

GHz技术实现了对火箭舱内多目标参数的监测[14]。

2022年，中北大学李晋芳提出了一种通过修改底层射频参数从而拓展Sub-GHz芯片通信带宽的方法，实现了高速率低功耗的箭载无线传感网络系统设计，网络点对点码速率达2 Mbps[15]；段瑞枫等人基于CC1310芯片，采用频分复用和时分复用的方式实现了箭载多通道无线传感系统的设计[16]，如图5所示。

目前，在对箭载无线传感网络的研究中，上

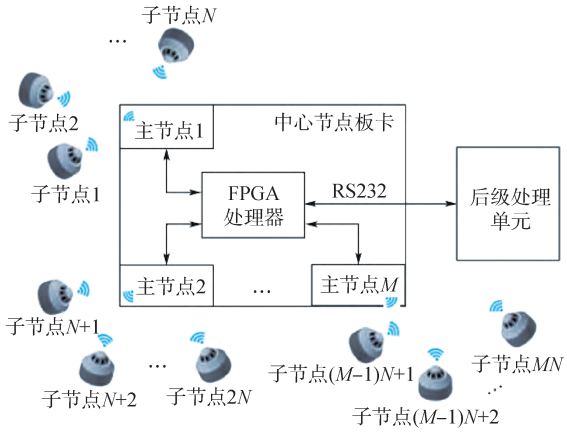

图 5　段瑞枫等人设计的箭载无线传感网络

Fig. 5　Arrow-borne wireless sensor network designed by DUAN Ruifeng et al

述研究在无线网络的某些性能方面都有针对性的突破与实现，箭载无线传感网络研究现状与特点见表1。但要想实现箭上大规模地搭载无线传感网络，进一步优化火箭载荷，在无线网络动态拓扑、可靠性、传输速率、低功耗等各方面都要有均衡的考量，这也是实现大规模箭载无线传感网络的重难点。

表 1　箭载无线传感网络研究现状与特点

Table 1　Research status and characteristic of arrow-borne wireless sensor networks

研究机构/作者	关键技术	通信频段	特点
北京邮电大学 唐斌	MAC层协议	/	自适应选择网络拓扑结构，但组网时延较高，且会随着网络节点数量的增加而增加。
东南大学 王飞	uIP协议栈、RPL路由协议	2.4 GHz	高可靠组网与数据传输，但节点IP数据包长度较长，协议复杂度较高。
中北大学 李慧	Wi-Fi技术	2.4 GHz	力学信号的无线传感网络。
北京遥测技术研究所 崔思阳	时分复用技术	433 GHz	单一温度测量的低功耗无线传感网络。
哈尔滨工业大学 李钦鹤	超宽带技术	3.5 GHz ~6.5 GHz	传输速率2.82 Mbps，但节点功耗高，仍需使用电缆进行供电。
哈尔滨工业大学 罗五江	Wi-Fi技术	2.4 GHz	传输速率3 Mbps，但节点功耗高，传输距离较短。
中北大学 朱志斌	Sub-GHz技术	868 MHz	传输速率50 Kbps，虽然网络功耗低，但带宽限制了大数据量的快速传输。
中北大学 李晋芳	Sub-GHz技术	868 MHz	传输速率2 Mbps，但使用基于竞争类的介质访问控制方案会使节点资源利用不均。
北京航空航天大学 段瑞枫	频分-时分复用技术	868 MHz、915 MHz	传输速率400 Kbps，20 m内通信质量良好。

4　箭载大规模无线传感网络研究与设计

4.1　箭上搭载大规模无线传感网络的技术要求

新一代运载火箭测量系统如想要大规模地部署无线传感网络，并具备火箭飞行过程中的测量能力，无线传感网络需要满足以下几个方面的技术要求：

① 网络容纳量大。大规模无线传感网络区别于一般无线传感网络的最显著特征即网络子节点数量众多，网络主节点应具有更强的任务、数据

处理能力。

② 可拓展。箭载测量系统在不同的火箭型号和舱内场景下，监测参数和所需节点数量也不同，因此箭载大规模无线传感网络需要具备可以根据实际任务灵活实现节点组网及管理的功能。

③ 高可靠性。箭载无线测量系统网络内如果出现大量丢包或链路失效的情况，会导致严重后果。箭载无线传感网络需要运行在封闭且存在大量遮挡物和电磁干扰的金属空间内，且节点接收的数据量大，网络拓扑结构复杂，必须保证数据传输链路的稳定可靠，减少数据的丢包和误码。

④ 低功耗。为了满足无缆化要求和安装的便捷性，箭载无线传感网络子节点使用电池供电，需要尽可能减少能耗以延长网络的工作时间。

⑤ 多速率采集。箭载无线传感网络需要对火箭舱内多参数进行测量，各参数所需的采样率不同，需要分类设置子节点的采集速率以及传输速率。

4.2　箭载大规模无线传感网络关键技术设计

4.2.1　节点部署与路由协议设计

节点部署是无线传感网络的基本问题，良好的部署方案可以实现节点更高效地完成感知环境、获取信息和传输数据等任务。

目前，无线传感网络部署策略主要包括确定部署和随机部署。箭载大规模无线传感节点的部署设计主要采用确定部署策略，根据任务测量需求，将子节点布置在确定的测量位置上。针对箭上大规模的无线传感网络，当节点间存在障碍物遮挡以及当某一节点布设距离较远时，有学者提出可以通过汇聚(中继)节点间接通信的方式确保网络连通性[17-20]，以提高箭载大规模无线传感网络数据传输链路可靠性，汇聚节点用于避障或者中继传输，示意图如图 6 所示。

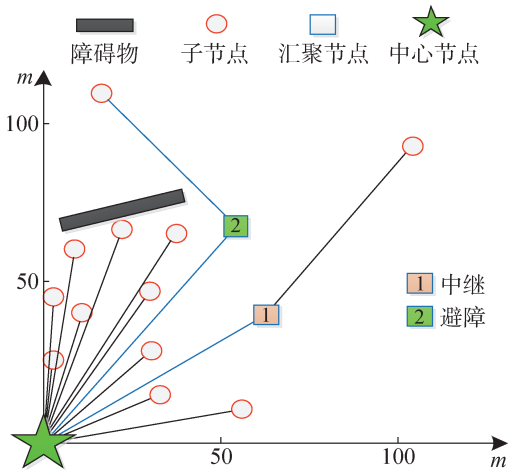

图 6　汇聚节点传输示意图

Fig.6　Transmission diagram of sink node

由于火箭舱内存在许多载荷设备和信号传输线缆，舱内变压器、开关等设备形成的电磁场，会对无线传感网络覆盖与通信性能产生影响。要想实现箭载无线传感网络的高性能和低服务成本，就需要建立能准确表示传感节点在复杂环境下传感、通信能力的数学模型，根据模型进行汇聚节点的部署与选择，如图 7 所示，这也是箭载大规模无线传感网络所面临的挑战。

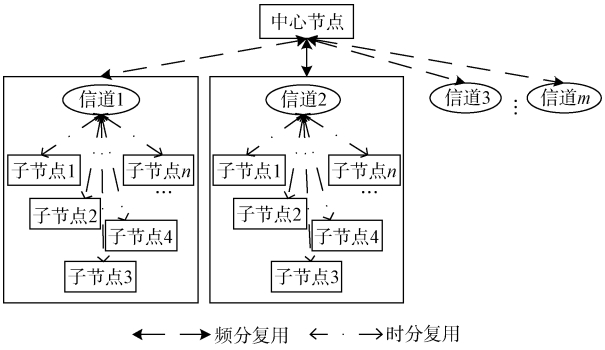

图 7　多信道传输示意图

Fig.7　Schematic diagram of multi-channel transmission

4.2.2　无线通信技术

无线通信中，小于 1 GHz 的频段被称为“Sub-GHz”。在射频领域中，波长与频率成反比，因此同其他技术作对比，Sub-GHz 在穿透能力和长距离通信上有着独特的优势，且 Sub-GHz 技术的功耗低于其他通信技术。各无线传感网络通信技术比较见表 2。考虑到运载火箭舱内众多金属器物对无线信号的折射、反射环境以及低功耗的需求，Sub-GHz 技术是箭载复杂环境下高可靠无线信号传输的一个优质选择。

4.2.3　MAC 协议设计

传统的基于调度类 MAC 协议主要有频分多址接入(Frequency Division Multiple Access, FDMA)、时分多址接入(Time Division Multiple Access, TDMA)和码分多址接入(Code Division Multiple Access，CDMA)三种[21-23]。针对无线传感网络，主要的基于调度类的介质访问控制方案见表 3。

箭载无线传感网络具有实时性强、短时突发、高速率传输的特点，故协议设计更具挑战性。首

表 2　各无线传感网络通信技术对比

Table 2　Comparison of wireless sensor networks communication technologies

类型	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee	UWB	Sub-GHz
通信距离	约 50 m	约 10 m	50 m~200 m	10 m~20 m	10 km
通信带宽	1 Mbps~500 Mbps	1 Mbps	250 kbps	300 Mbps	0.3 kbps~4 Mbps
工作频段	2.4 GHz/5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	3.1 GHz~10.6 GHz	低于 1 GHz

表 3　主要的基于调度类的介质访问控制方案

Table 3　Several main media access control schemes based on scheduling

协议	特点	缺陷
SMACS/EAR	相邻节点在不需要中心节点的情况下组成子网并建立传输/接受调度表，链路由随机选择的时隙和固定分配的频点组成。EAR 算法用来为节点提供不间断的服务。	从属于不同子网的节点可能永远得不到通信的机会。EAR 算法只用于整体上保持静止，或移动节点周围有多个静止节点的网络。
DE-MAC	用选举包和能量状态包来交换能量信息，由能量信息来决定节点占有传输时隙的数量。选择能量最低的节点为“赢家”，使其具有更多的睡眠时间，通过变换的“赢家”实现节点间的能力平衡，延长网络的生命周期。	子节点只在其占有时隙且无传输时才能进入睡眠。而其在邻居节点占有的时隙内即使没有数据传输，也必须处于活动状态。
TRAMA	首个提出并实现能量感知的调度类协议。协议使用流量信息建立传输调度表并将其发送给子节点，根据调度表子节点可以判断何时进入接收模式或睡眠模式，避免了中心节点的接收冲突。	协议决定哪个节点为传输节点需要一个选举算法。该算法复杂性较高，执行过程中需要传输额外的调度信息，导致延迟的增加。
FLAMA	协议将整个信道访问过程分成两个周期，一个是基于竞争的随机访问方式，另一个是基于调度的访问方式。其中，随机访问方式用于发现邻居节点，同步节点时钟以及交换流量信息；调度访问方式用于传输数据。	用于发现邻居节点的随机访问方式增加了组网网络和数据传输路径的不确定性。

先，布设在火箭舱内的节点间链路状态不稳定，具有时间和空间上的不可预测性；其次，箭载大规模传感网络需要确保长期稳定工作；最后，无线节点数据处理能力和通信带宽有限，存储空间较小，协议要尽量简单并降低存储开销。

上述基于调度类的介质访问控制方案由于灵活度低、算法复杂度高、信道利用率低等特点，并不适用于箭载大规模无线传感网络。为了满足箭载环境下大规模无线传感网络的应用需求，实现针对不同传感器类型、传输速率、布设距离、遮挡情况下的子节点数据传输调度，可以采用时分复用 - 频分复用 (Time Division Multiplexing-Frequency Division Multiplexing，TDM-FDM) 技术实现多参数无线传感器组网设计，多信道传输如图 5 所示。

该技术为时分复用和频分复用的复合。时分复用技术在节点通信中维护着一个特殊的节点帧，类似于时分多址中的时隙分配表，节点据此调度它与相邻节点间的无时间冲突的通信。频分复用技术为多个节点提供不同的传输信道，使不同频率节点可以同时通信，在扩大网络容量的同时有效避免了通信冲突[24]。

4.2.4　节能策略

如何在保证网络的业务质量良好、连通性完整、可靠性高、传输稳定的前提下，充分使用子节点电量，使整个网络的生命更持久，是箭载大规模无线传感网络关键问题之一。可从如下方面进行设计考虑：

① 嵌入式操作系统简化与共享缓存技术

现有的嵌入式操作系统对于无线节点而言属于高消耗系统，通过采用单一的通信任务模式和低消耗堆栈，可以降低内存和代码空间的消耗。此外，使用共享缓存技术，实现数据在任务间的全局应用，可有效提高数据访问速度，降低 CPU 使用负担。

② 基于 duty-cycle 的设备深度休眠机制

在整个无线通信过程中，节点在一个时隙内用于接收或发射的时间只占一部分，且不是每个

时隙都有接收和发射的任务。通过将射频任务划分为 duty-cycle，让其在没有收发任务的时间内关闭，避免因长时间开启射频而造成的射频能耗。

解决能量问题不能仅增加各节点的能量，应该要从不同的角度出发，包括硬件节能、软件节能、路由协议、网络结构、节点的覆盖和休眠、中心节点的调度算法等，使节点有良好的工作/休眠方式，降低节点的能耗与能耗增加幅度，这是解决能量问题的关键。

5 结束语

无线传感网络作为一个近年来广受关注的技术，目前已经在智能家居、医疗、军事等领域有了相对广泛的应用。在我国的航天领域中，也对无线传感网络有了一些尝试性的探索，但要想在火箭舱的复杂恶劣环境下，部署大规模的无线传感网络，并保证网络的准确、稳定的运行，还需要在现有成熟的无线传感网络技术上有适用于箭载环境的针对性的突破与研究。

参考文献

[1] 路娟, 王颖, 刘丙太, 等. 基于火箭测量系统的无线传感器网络技术研究[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(4): 44-47.
LU Juan, WANG Ying, LIU Bingtai, et al. Research on wireless sensor network for the launch vehicle measurement system[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2015, 35(4): 44-47.

[2] 彭越, 牟宇, 宋敬群. 中国下一代运载火箭电气系统技术发展研究[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(2): 13-24.
PENG Yue, MOU Yu, SONG Jingqun. Research on the development of avionics and electrical system in Chinese next generation launch vehicle[J]. Astronautic System Engineering Technology, 2015, 35(4): 44-47.

[3] 耿胜男, 冯辉, 王星来, 等. 航天器智能结构与先进传感技术[J]. 遥测遥控, 2017, 38(5): 44-48.
GENG Shengnan, FENG Hui, WANG Xinglai, et al. Smart structures and advanced sensing technologies in space vehicles[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017, 38(5): 44-48.

[4] 崔思阳. 箭载无线传感网络关键技术与应用研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2019.

[5] STONE T, ALENA R, BALDWIN J. et al. A viable COTS based wireless architecture for spacecraft avionics[C]//2012 IEEE Aerospace Conference, 2012.

[6] YOSHIDA S, HASEGAWA N, KAWASAKI S. Experimental demonstration of microwave power transmission and wireless communication within a prototype reusable spacecraft[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(8):556−558.

[7] RATIU O, PANAGIOTOPOULOS N, VOS S, et al.Wireless transmission of sensor data over UWB in spacecraft payload networks[C]//IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments, 2019.

[8] 罗煜缤, 李洪, 周广铭, 等. 新一代箭载无线传感器网络系统架构综述[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(4): 44-47.
LUO Yubin, LI Hong, ZHOU Guangming, et al. Review on the system architecture of new generation wireless sensor network for rocket[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2020, 40(4): 44-47.

[9] 唐斌. 航天器上的数据采集型WSN协议设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.

[10] 王飞. 应用于航天器数据采集的无线传感器网络网络层协议的设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2018.

[11] 李慧. 箭载力学监测系统无线传输节点设计与实现[D]. 太原: 中北大学, 2018.

[12] 崔思阳, 彭泳卿, 徐辉. 适用于火箭环境监测的无线传感网络应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(9): 278-282.
CUI Siyang, PENG Yongqing, XU Hui. Application research of wireless sensor network for rocket environment monitoring[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(9): 278-282.

[13] 李钦鹤. 基于IEEE802.15.4的舱内超宽带通信组网技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

[14] 罗五江. 基于802.11的舱内数据采集及无线自组网关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

[15] 朱志斌. 基于CC1310的无线传感网络记录仪设计[D]. 太原: 中北大学, 2021.

[16] 李晋芳. 箭载高速率低功耗无线传感网络系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2022.

[17] 段瑞枫, 吕燕洁, 杜文基, 等. 基于CC1310芯片的多通道高速率低功耗无线传感系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(11): 2177-2185.
DUAN Ruifeng, LV Yanjie, DU Wenji, et al. Multichannel wireless sensor system based on CC1310 chip with high speed and low power consumption[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(11): 2177-2185.

[18] 周方. 无线传感网中继选择算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.

[19] 范一鸣. 支持大规模WSN的分簇路由协议和拓扑控制算法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008.

[20] 苗长云, 郭芮, 李杰. 基于节点剩余能量和位置的无线传感网络分簇方法[J]. 天津工业大学学报, 2023, 42(2): 61-66.
MIAO Changyun, GUO Rui, LI Jie. Clustering method of wireless sensor network based on residual energy and location of nodes[J]. Journal of Tiangong University, 2023, 42(2): 61-66.

[21] 卢晓艳, 颜培玉, 解志斌, 等. 无线传感器网络中故障节点检测与修复方法综述[J]. 遥测遥控, 2021, 42(4): 104-111.
LU Xiaoyan, YAN Peiyu, XIE Zhibin, et al. Overview of fault node detection and repair in wireless sensor networks[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(4): 104-111.

[22] 王海芳, 张其善. 基于正交频分复用的宽带无线通信技术初探[J]. 遥测遥控, 2004, 25(6): 14-18.
WANG Haifang, ZHANG Qishan. About wireless communication technology based on orthogonal frequency division multiplex[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2004, 25(6): 14-18.

[23] 申鹏飞, 章韵. 基于调度的无线传感器网络MAC协议研究[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(1): 119-122.
SHEN Pengfei, ZHANG Yun. Research of scheduling based MAC protocol for wireless sensor network[J]. Computer Technology and Development, 2013, 23(1): 119-122.

[24] 徐朝农, 徐勇军, 范永开. 无线自组织网络MAC调度技术研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(1): 10-16.
XU Zhaonong, XU Yongjun, FAN Yongkai. Survey of MAC scheduling technique of wireless Ad hoc networks[J]. Application Research of Computer, 2011, 28(1): 10-16.

[作者简介]

甄　越　1999年生，硕士研究生。
彭泳卿　1980年生，博士，研究员。
冯红亮　1976年生，博士研究生，研究员。
史德生　1985年生，博士，高级工程师。

(本文编辑：杨秀丽)