

卫星舱内无线传输技术的应用探索

缪鹏飞¹, 司圣平¹, 费飓峰²

(1. 上海卫星工程研究所, 上海 201109; 2. 上海无线电设备研究所, 上海 200090)

摘要: 针对传统有线连接的整星电缆网其灵活性差、通用性差及操作性差等问题, 提出了利用无线网络通信技术解决卫星舱内有线连接在整星布局、装配、集成和测试等方面不利影响, 进行了基于卫星舱内使用的无线传输网络设计和探索, 包括无线网络拓扑结构、网络频率配置及通信抗干扰等内容。通过基于某型号卫星的数据传输应用场景进行了方案设计和试验测试, 验证了卫星舱内无线传输技术的可行性, 为解决卫星平台和有效载荷之间的数据交换和平台自身管理提供了一个高可靠、高效率的实现途径。

关键词: 电缆网; 卫星舱; 无线传输; 拓扑结构; 频率配置; 通信抗干扰

中图分类号: V 557^{+.3} 文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.05.013

Application of Wireless Transmission Technology in Satellite Cabin

MIAO Pengfei¹, SI Shengping¹, FEI Jufeng²

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;
2. Shanghai Institute of Radio Equipment, Shanghai 200090, China)

Abstract: In view of the poor performance of the whole satellite cable network with traditional wired connection, e. g., poor flexibility, poor generality, and poor operability, a method is proposed, in which the wireless communication technology is used to overcome the disadvantages of the whole satellite layout, assembly, integration, and testing for the wired cable connection in satellite cabin, and the wireless transmission network used in satellite cabin is designed and explored, including the wireless network topology, the network frequency configuration, the communication anti-jamming, etc. The scheme and design are tested based on the micro vibration data transmission application scenarios of a satellite model. The results show that the application of the wireless transmission technology in satellite cabin is feasible, which provides a highly reliable and efficient way for the data exchange between the satellite platform and the payload and the platform management itself.

Key words: cable network; satellite cabin; wireless transmission; topological structure; frequency configuration; communication anti-jamming

0 引言

近年来, 随着我国对航天探测的需求不断提高, 以遥感和对地观测为主的有效载荷不断涌现, 随之有效载荷数量和种类也越来越多。然而, 各有效载荷在星内进行数据传输的硬件接口不尽相同, 传输速率不同, 在进行联试时需要进行大量的试验和测试, 这成为卫星快速研制的瓶颈。对于卫星平台, 怎样有效控制和适应日益增多的有效载荷, 怎样对平台进行有效管理, 一直是亟待解决的问题。

现有卫星舱内各设备间通过整星电缆网有线连接, 给整星的设计和研制带来巨大的负担。一方面, 整星电缆网在质量上给卫星带来了不可忽视的影响。卫星舱中各种功能的单机数量众多, 导致连接各单机的接插件和线缆的质量占了相当大的比重, 约为卫星整体质量的8%左右。这些电缆按功能分类, 主要包括遥测遥控、供电、总线、射频连接、遥感数据和星地测试6个部分, 以某型号卫星为例, 整星总质量为2 400 kg, 而整星电缆网的质量约

收稿日期: 2019-10-30; 修回日期: 2020-03-20

作者简介: 缪鹏飞(1981—), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星总体技术、通信技术。

为180 kg,各功能部分的质量大小及所占整星电缆网的比重如图1所示。从图中可以看出,整星电缆网中涉及数据通信的遥测遥控、星载总线、遥感数据传输功能部分的电缆总质量达到120 kg,占整个电缆网质量的近67%。可以通过卫星舱内无线网络通信技术实现无缆化传输,从而能够实现减轻整星电缆网质量的目标,进而减少卫星平台质量,提高卫星平台的利用率。

另一方面,整星电缆网的复杂性给卫星的快速研制带来了困扰,不仅在设计上需要花费大量的时间和精力去核对所有卫星产品之间接插件的硬件接点,确保设备间的信号连接正确,而且在生产、加工及工艺检验过程中也需要投入巨大人力、物力成本。卫星舱内单机间的有线连接存在错综复杂的连接关系,对于一台单机中的某一接插件,与其连接的可能是另外同一台单机的同一个接插件,也可能是同一台单机的不同接插件,还有可能是不同单机的不同接插件。此外,卫星舱内各种功能的单机

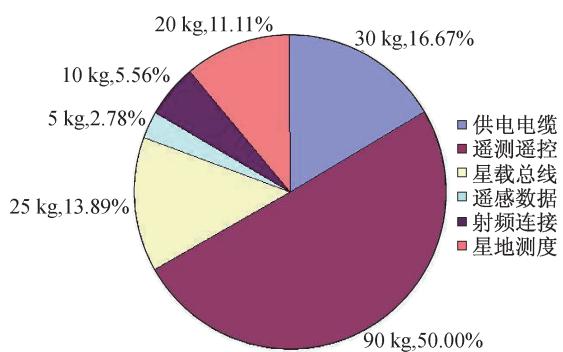


图1 整星电缆网质量分布

Fig. 1 Weight distribution of the whole satellite cable network

根据其任务和功能要求,其在卫星上的安装位置也不相同,这就造成一束电缆有长有短,有粗有细,特别是现阶段卫星结构一般都采用分舱设计的办法,有线连接的方式给电缆网的设计带来了巨大的复杂性,如图2所示。

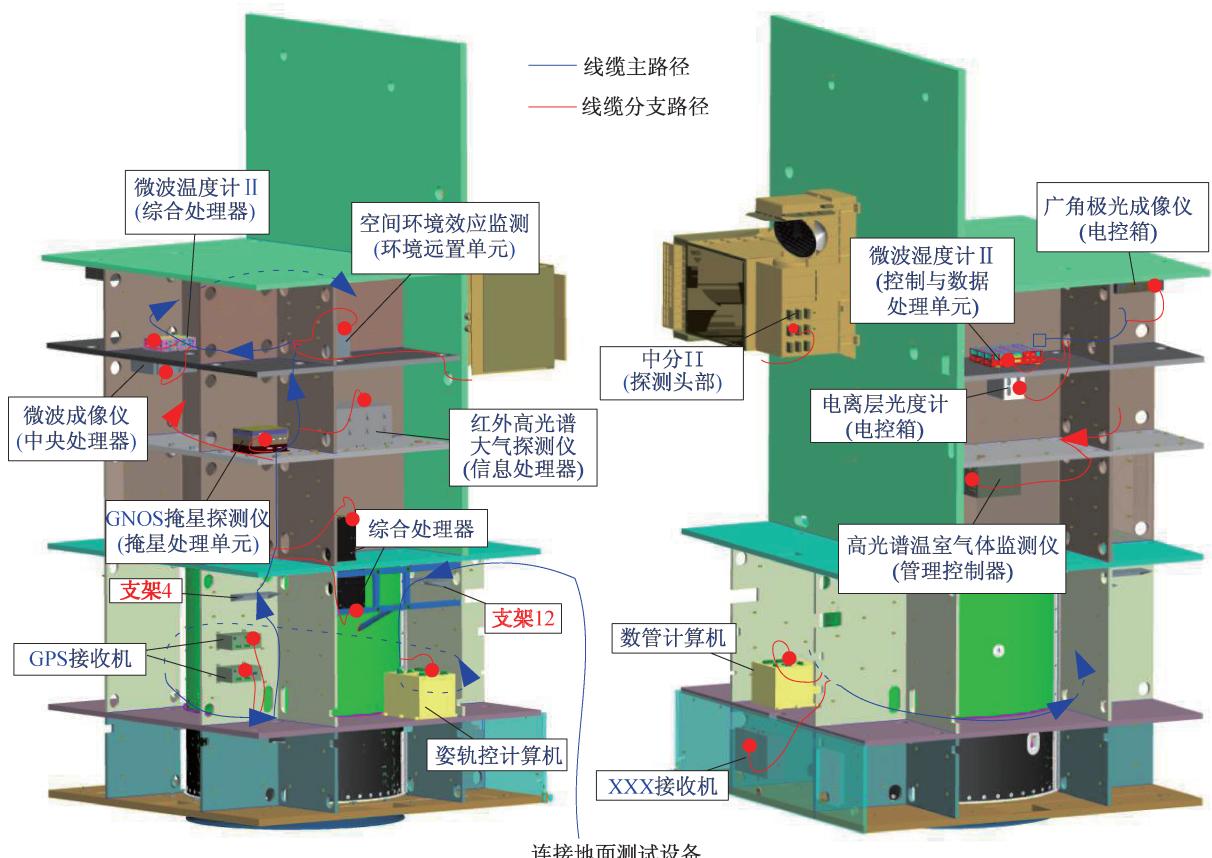


图2 卫星电缆网的布局走线示意

Fig. 2 Layout and routing of the satellite cable network

另外,整星电缆网一旦设计和生产完成,由于受到其连接的产品硬件接点约束,在使用过程中不能发生改变,既不能在接插件上增加接点信号,也不能减少成品电缆束中的连接电缆,灵活性差;对于不同卫星型号来说,由于受到单机布局、不同载荷及接插件的影响,整星电缆网更是不能兼容和替代,通用性差;在整星电缆网的安装与铺设过程中也存在诸多注意事项,避免对整星电缆网造成损害,例如对于长电缆需要进行固定,在进行接插件插拔过程中注意插头尾部电缆不被弯曲,电缆在穿越孔眼或活动部位时注意棱角和锐边等。这些“机械性”的特点都给整星的测试和集成装配造成了很大的困扰,特别是在电性星及初样星阶段的电测试过程中。

随着ZigBee、Bluetooth、WiFi^[1-2]等无线网络通信技术及无线传感器技术的发展,卫星舱内无线网络技术^[3-7]的研究与应用提上日程。然而卫星舱内的通信环境与地面开阔空间无线通信网络有所不同,卫星舱内系统构造复杂,内部空间狭小,仪器设备众多,系统内电缆间、设备间、电缆与设备间等各种耦合、交调及互调干扰较多,无线传输信号会受到因素的多种影响^[8-9],从而使无线接收端接收到的信号出现失真,现有无线网络通信技术无法直接应

用于适用于卫星舱内无线通信。因此,本文基于现有无线网络通信技术,对无线网络拓扑结构、网络频率配置及通信干扰在卫星舱内的应用进行研究和探索,为最终形成卫星舱内无线互联网络通信体系标准打下基础。

1 应用场景

某卫星采用SAST3000卫星平台,基于载荷应用需求,采用无线通信技术在卫星舱内进行数据传输,拟设计多个数据采集节点和一个控制节点,由采集接点负责将采集到的数据通过无线网络通信技术传输到控制接点,由控制接点组包将数据通过总线传输到数管计算机,通过下传通道传输到地面。其中,控制节点为局域网中心节点,采集节点为网络终端,两者组成无线网络系统,两种之间通过无线信号进行数据传输。

从安全性及可靠性出发,在方案设计中,既有通过采集节点采集的数据,又有通过有线方式采集的数据,这样做的目的主要有两个方面:一方面,可以确保舱内无线网络通信技术的设计得到验证;另一方面,即使无线网络通信技术出现故障,也不影响其他位置微振动数据的采集。无线网络通信技术的基本设计方案如图3所示。

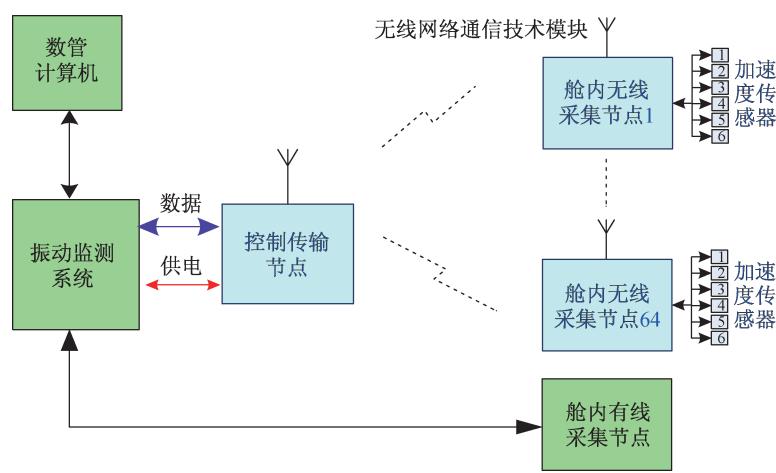


图3 舱内无线通信技术的应用

Fig. 3 Application of the wireless communication technology in satellite cabin

2 无线网络方案设计

无线网络传输系统采用一种新型无线宽带接入网络架构,如图4所示,具有自组织、自恢复、多级联、节点自我管理等职能优势^[10-12],支持64个以上节点

组网,采集节点可扩展。因卫星舱体间屏蔽效应,容易造成无线信号的多路径传输。针对星内无线信道的特点,无线传输系统采用扩频技术+均衡技术+Rake接收技术,用于解决多径干扰、信道衰落等问题。

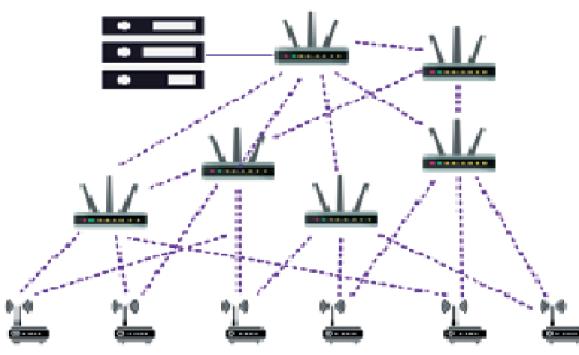


图4 无线网络传输体系结构

Fig. 4 Architecture of the wireless network transmission system

2.1 网络设计

考虑卫星舱板的遮挡、卫星舱内采集点的离散分布,传输网络拟采用一种无线宽带接入网络架构。该网络融合无线局域网和Adhoc网络^[13]优势:1)自组织。网络节点可即时加入网络,扩展网络覆盖范围,并可连接至其他节点。2)自愈合。如果网络中的某个节点发生故障或从其拓扑位置上拆卸,网络会自动适应这种改变,即使发端和接收端之间的链接涉及多个中继节点,网络也会找到从发端到

接收端的新的路由。3)多跳式。每一个节点都可以当作路由,都能进行接收和发送信号,都可以与一个或多个节点进行直接通信。

整个网络由无线路由和终端节点组成^[14],其中,路由节点在充当路由的同时也具有节点功能。路由节点负责监管蜂窝内部各节点和时隙分配,接收蜂窝内各子节点的数据和控制数据采集等。对于由于屏蔽、遮挡等因素无法直接无线传输的,采取无线跳转进行中继组网传输,整个网络实现无线化。

2.2 网络频率配置

系统网络采用频分(FD)+时分(TD)组合的方式实现,整个频带划分3个独立通道,各蜂窝共用一个频率通道,路由节点与主控制节点共用一个通道,每一个蜂窝内部采用时分模式,各个蜂窝之间也采用时分方式。各蜂窝路由与主控节点之间通过无线方式连接。

系统网络初步设计92 MHz带宽,通道带宽为26 MHz,通道间隔为6 MHz,共分12个通道(通道之间有交叠),其中3个完全独立通道,这样便于组网拓展,如图5所示。

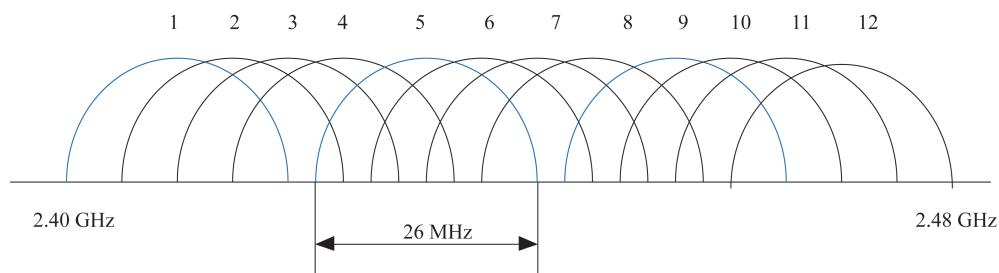


图5 信道频率划分

Fig. 5 Division of the channel frequency

2.3 抗干扰设计

针对多径干扰,在WiFi通信技术的基础上增加了频域均衡技术和Rake接收等技术,使无线传输系统方案在抗干扰性能方面要优于WiFi技术。考虑小型化设计,区别于传统Rake接收机增加分支数目的方法来提高系统性能,而是利用均衡技术,在消除ISI的同时也降低了Rake接收机的分支数目,从而可以降低系统复杂度,减少硬件规模。目前,该技术已在弹载数据链中得到成功应用。

借鉴802.11g^[15]无线局域网物理层协议标准,扩频序列拟采用13位barker码,信道带宽最大为

13 Mbit/s,针对卫星舱内无线传输场景分析,由于直达波通信距离较近,反射波是经过多次反射后到达接收机的。因此,反射波传输距离远大于直达波传输距离,也即是其传输时延大于码片速率,通过采用自相关非常好的扩频序列barker码,并以非整数倍采样技术实现窄带相关技术(相关间距小于1个chip),分离出多径信号。最后,利用Rake接收机把分离出来的多径信号累加起来,从而克服了多径效应,也提高了接收信号的信噪比(SNR),改善了通信性能。以下针对片内多径信道、片外多径信道及混合片内外多径3种情况的误码率(BER)开展了性能仿真。

片外多径信道下误码率随信噪比变化情况如图6所示。在没有任何措施下的QPSK,随着信噪比的增大,误码率维持在较高的数值下,导致信号几乎无法正确解调。在片外多径信道中,增加了均衡措施后,QPSK信号从信噪比为10 dB开始,误码率缓慢下降,虽有降低但不明显,在此基础上加入了CDMA扩频措施后,误码率开始明显下降。随着均衡、扩频和RS编码措施的增加,误码率性能得到了显著的提高,并在信噪比为10 dB时误码率达到约 10^{-6} 。

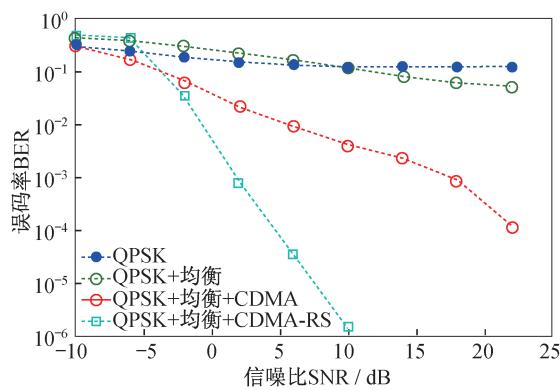


图6 片外多径信道下误码率仿真

Fig. 6 BER simulation for the off-chip in multipath channel

如图7所示,没有任何措施的QPSK信号的误码率随着信噪比的增加基本不变,加入了均衡措施后,误码率随着信噪比的增大逐渐降低,误码性能略微提升。并且,在同时加入了均衡和扩频措施后,误码率有了更大幅度的降低。随着均衡、扩频和RS编码措施的增加,在信噪比逐渐增大的同时,误码率有了快速而显著的下降,并于信噪比约为14 dB时达到最低值,误码性能显著提升。

混合片内片外多径的误码率仿真结果如图8所示。在没有任何措施下,QPSK信号的误码率随着信噪比的增大维持在较高数值。加入均衡措施后,误码率随着信噪比的增加有了一定幅度的下降。在此基础上增加扩频措施,误码率在信噪比为-10 dB到17 dB范围内大幅度下降,并于之后呈稳定态势。随着均衡、扩频和RS编码措施的增加,误码率从信噪比为-5 dB开始呈线性函数式显著下降,并于信噪比为6 dB时达到最低值约 $10^{-4.7}$ 。相比于混合片内片外多径信道误码率优化结果,片内或者片外多径信道下误码性能的提升更为显著。

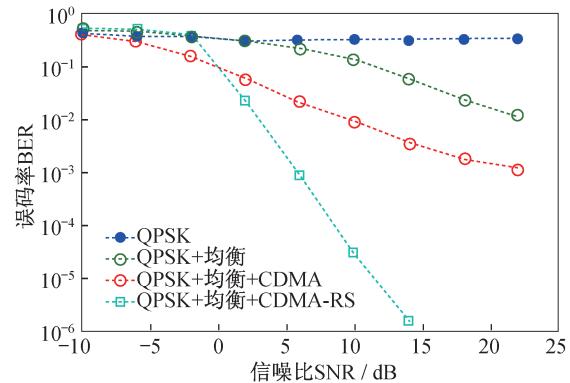


图7 片内多径信道下误码率仿真

Fig. 7 BER simulation for the in-chip in multipath channel

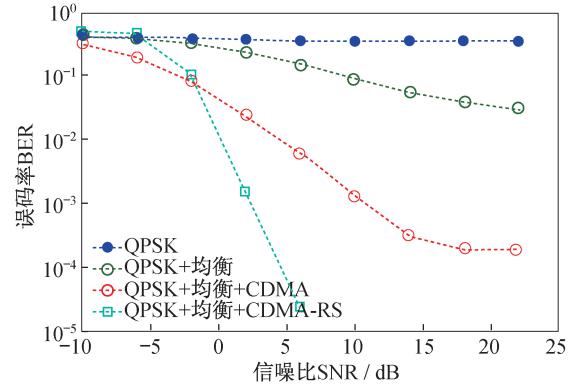


图8 片内片外多径信道下误码率仿真

Fig. 8 BER simulation for the hybrid chip in multipath channel

3 测试与验证

在卫星舱内大多数情况下,任意两点都可以进行无线数据传输,只有处于相互对立面的极个别情况下,会出现由于遮挡和屏蔽造成传输误码,在这种情况下只需要通过多跳方式进行中继就可以解决遮挡等类似问题。通过在结构星的试验验证,可以初步认为采用扩频技术+均衡技术+Rake技术的无线传输系统是可以满足卫星舱内环境下无线传输要求的,本次数据传输过程中,节点的位置布局如图9所示。

图9中舱内采集节点与控制传输节点由一段蜂窝板隔开,测试过程中舱板全部封闭。对经无线采集单元采集的遥感数据包进行分析,3个通道(X、Y、Z)持续时间约为38.6 s振动检测数据,对其进行去除直流分量得到振动时域图,再进行快速傅里叶变换(FFT)得到频谱图,结果如图10~图12所示。

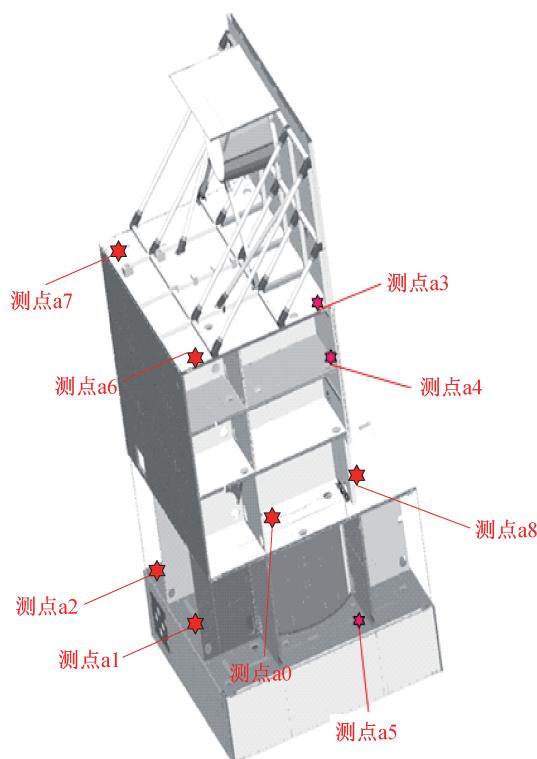


图9 控制节点与采集节点位置布局

Fig. 9 Position layout of the control nodes and acquisition nodes

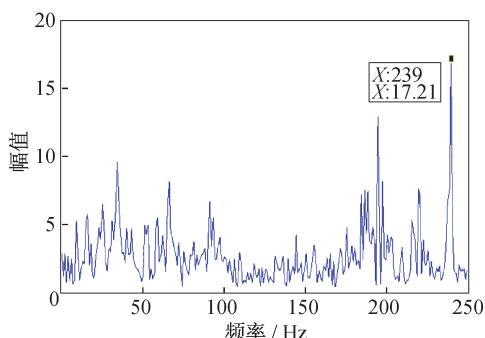


图10 X方向振动频谱图

Fig. 10 Vibration spectrum in the X-direction

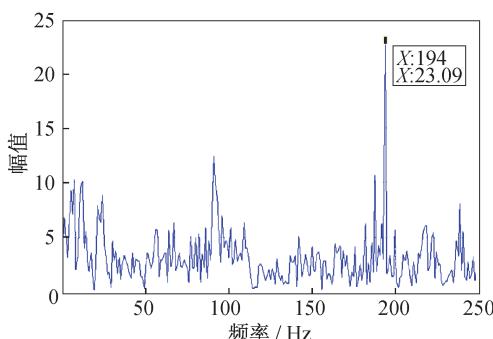


图11 Y方向振动频谱图

Fig. 11 Vibration spectrum in the Y-direction

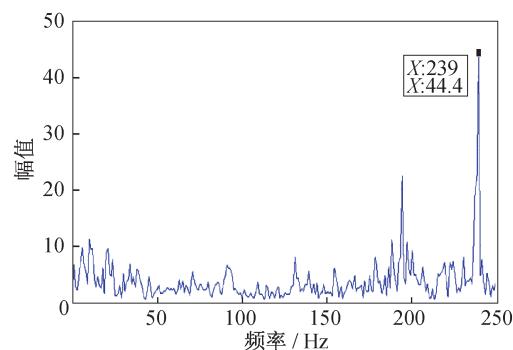


图12 Z方向振动频谱图

Fig. 12 Vibration spectrum in the Z-direction

经过在某型号的试验验证,结果表明:舱内采集节点与控制传输节点数据通信正确,链路通畅,无线通信功能得到验证。

4 结束语

无线传输系统属于有中心的节点的局域网无线网络系统,其中控制节点为局域网中心节点,采集节点为网络终端。在此次试验中,本无线局域网传输仅限1个控制传输节点和1个采集节点的点对点形式,但系统方案兼顾支持多点组网应用。在后续的应用与试验中,将逐步扩展网络组网形式,形成多点间信息传输应用。此外,在得到充分的在轨飞行验证后,可以对软件进行固化,形成基于FPGA的IPCore或标准软件库,实现对物理层和MAC层的ASIC集成设计,从而实现卫星舱内无线网络通信标准化的目标。

参考文献

- [1] 林彬. 基于WIFI的无线传感器网络检测系统的设计[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
- [2] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. Draft standard for low-rate wireless networks: IEEE P802.154z/D05 [S]. 2019.
- [3] 孙兆伟, 邢雷, 徐国栋, 等. 卫星内无线射频总线设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(7): 882.
- [4] 蔡然, 薛藜, 曹捷, 等. 卫星内无线光网络通信技术及其实现[J]. 光子学报, 2005, 34(2): 263-264.
- [5] 董立珉. 星间/星内无线通信技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
- [6] 周莉, 曹松, 安军社. 航天器内环境监测的无线传感器网络应用研究[J]. 空间科学学报, 2012(6): 846-849.