

弹载遥测系统总体关键技术的研究与应用

马文超¹, 涂卫军², 李科连¹, 聂 荣¹

(1 江西洪都航空工业集团有限责任公司 南昌 330001)

(2 中国人民解放军某部 南昌 330001)

摘要: 弹载遥测系统主要用于导弹飞行试验过程中, 完成导弹飞行试验数据的采编、调制、传输, 与地面遥测设备配合完成试验数据远距离获取, 即遥测任务。遥测数据为导弹及分系统设计验证、故障分析、试验结论评判等提供数据依据, 是导弹研制过程中极其重要、必不可少的测量系统。结合导弹遥测系统技术发展趋势及笔者近年来创新性工程设计经验, 详细阐述了包括弹载遥测系统架构设计、可编程式采编技术、优化供电技术及射频综合化技术等总体关键性技术, 为弹载遥测系统提供总体设计新思路。

关键词: 遥测; 可编程; 纠错及检错编码; XML; 射频综合

中图分类号: TP873 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2021)06-0078-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210728001

引用格式: 马文超, 涂卫军, 李科连, 等. 弹载遥测系统总体关键技术的研究与应用[J]. 遥测遥控, 2021, 42(6): 78-83.

Research and application of the key technology for onboard telemetry system

MA Wenchao¹, TU Weijun², LI Kelian¹, NIE Rong¹

(1. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group, Nanchang 330001, China;

2. PLA, Nanchang 330001, China)

Abstract: The missile telemetry system is mainly used to complete the acquisition, compilation, modulation and transmission of missile flight test data in the process of missile flight test, and cooperate with ground telemetry equipment to complete the remote acquisition of test data, that is, telemetry task. Telemetry data provides data basis for missile and subsystem design verification, fault analysis and test conclusion evaluation. It is an extremely important and essential measurement system in the process of missile development. Combined with the development trend of Missile Telemetry System Technology and the author's innovative engineering design experience in recent years, this paper expounds in detail the overall key technologies including missile telemetry system architecture design, programmable acquisition and editing technology, optimized power supply technology and RF integrated technology, so as to provide a new idea for the overall design of missile telemetry system.

Key words: Telemetry; Programmable; Error correction and error detection coding; XML; RF synthesis

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210728001

Citation: MA Wenchao, TU Weijun, LI Kelian, et al. Research and application of the key technology for onboard telemetry system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(6): 78-83.

引 言

弹载遥测系统主要用于导弹科研试验、批抽检或训练等飞行试验时, 实时监测导弹飞行试验工作状态, 获取飞行试验数据, 为导弹性能的分析、评估与改进设计提供科学数据依据。弹载遥测系统一般由环境传感器、信号采编器、加密器、遥测发射机、遥测天线组成。目前, 我国对于该类产品的实现方式受制于总体单位的特定要求, 有分布式的采集方式、一体化的集成方式, 更有单板化的实现方式, 未成体系, 大多为专用化设备。

传统弹载遥测系统目前仅用于科研实验过程中的遥测试验弹, 该类导弹一般没有任务载荷舱, 用一

个空舱替代任务载荷舱的部位。因此,总体单位一般将科研实验过程中的遥测系统设备安装于该空舱内,并命名为遥测舱,舱内的空间一般较大,为降低遥测系统的实现难度,一般对弹载遥测系统的外轮廓、重量及架构约束较小,使得研制的各类弹载遥测系统较大、较零散,连接电缆较多。另外,弹载遥测系统作为独立的弹载测量设备,一般都采用自主供电方式,一是与被测导弹保持独立,二是防止弹上电源有故障时,弹上遥测设备仍可正常工作,保证数据的完整性。目前,我国现行的遥测系统供电电源一般选用锂离子电池组独立供电。

弹载遥测系统的实现一般由总体单位根据型号经验、遥测标准、导弹平台的指标约束等多方面综合形成,为定制化设备。因此,导弹型号总体单位对遥测总体关键技术如通信体制、遥测标准、硬件平台、软件架构的应用及研究程度直接影响到弹载遥测系统功能及性能的最大化利用。本文主要从国内外遥测新技术的收集、应用及近年来遥测总体技术经验的应用及研究成果进行阐述,为遥测总体设计提供技术借鉴。

1 国内外发展现状

1.1 国际遥测技术现状及发展趋势

近年来随着软件无线电技术、网络技术等的快速发展,带动国际遥测传输技术逐步更新,特别是新的遥测调制技术、编码技术、组网技术的成功应用,为国际遥测技术的进步提供了有效的技术衔接。从近年来陆续发布的国际遥测标准 IRIG106 来看,美国作为国际遥测技术的领军者,多年来先后启动了增强遥测综合网 INET^[2]等前沿性的课题,在现在的 SST 遥测链路基础上,添加了射频无线网络链路,形成新的综合遥测网络系统(TmNS),实现遥测信息的合成与共享。除传统的遥测调制技术以外,MIMO、OFDM 以及联合编码调制等具有抗多径、高速率或高增益等优点的无线通信技术,在遥测领域也受到了越来越多的关注^[3]。

从国际遥测标准 IRIG106 来看,国际上遥测系统越发注重标准化技术和标准化平台的建设及应用,通过工程软件平台及可编程的硬件模块,促进硬件接口及软件协议相互兼容,使得数模及模数转换单元尽可能靠近天线端,减少单元间的线路损耗,通过软件编程来实现以往由硬件实现的各种功能,将软件、硬件和软件无线电技术有机地结合起来,组成灵活多样的遥测系统通用平台^[1]。

综合国外遥测技术的调查结果分析,标准化、多频段、多体制、高码率已经成为国外遥测类设备的重要技术特点^[3]。

1.2 国内遥测技术现状及问题

通常弹载遥测系统为标准化约束性设备,其数据格式、调制体制及工作频段必须符合遥测标准要求,使得其对地面传递的射频信号,均可通过通用化遥测地面站接收解调。我国靶场现行地面系统还处于主流的 PCM-FM 体制下,尽管通过 MSD+TPC 技术可使得遥测接收误码率在同等条件下的接收增益提高到 8 dB 以上,但该体制的频谱边带滚降能力很差,使得频带利用率不高,目前对于高码率下的频分多路的路分遥测就无法在特定带宽下实现多目标遥测。另外,随着 IRIG106 遥测标准的持续更新及遥测技术的发展,国内的部分研究机构及学者,也启动了国际先进技术的多方面研究应用,收集相关文献发现,如:参照 INET 开展的 ANET 系统研究、MA-SOQPSK 接收机的试制、FQPSK 和 SOQPSK 调制技术最优化解调器设计等^[4]。尽管我国在遥测新技术领域取得一定的成果,但这些成果较零散,不成规范及标准,无推广。笔者认为国际先进遥测技术的应用与研究,导弹总体单位必须深入了解和掌握国际新技术,积极应用,参与研究,才可推动我国遥测事业蓬勃发展。

2 导弹遥测总体关键技术的实现方法及研究

2.1 重构遥测采编功能的技术实现

遥测采编器为弹载遥测系统的重要组成部分,主要用于对导弹系统内部组件工作参数的采集及编码。传统的实现方式一般设计成独立的遥测采编设备,安装于遥测舱内。弹上电气系统将弹上送给遥测系统的信号进行收集并专门设计一个遥测口,通过延长电缆送至遥测舱,并与遥测采编设备连接。

随着技术的进步与武器系统功能的全面发展要求,近年来,用户提出了任务载荷舱及遥测设备要同时具备战试训一体的概念需求;在保留任务载荷舱段的导弹中,可加装遥测系统,并且不影响导弹的整体布局及性能,因此对导弹遥测系统集成化、小型化、低成本提出了明确的要求。为顺应这种发展趋势,需要将设备进行小型化、集成化设计,以满足导弹效能和有限尺寸约束。传统的遥测系统所涉及的遥测采编器采用采集、存储、编码以及供电自成体系、彼此独立的设计方法,以至于其尺寸、重量、连接方式均不能满足当前环境下导弹空间及性能的设计需求。

目前,用户主推通过 1553B 通用机弹分离接口实现不开箱检测。但因导弹的开关量信号、电压、电流、传感器信号均为模拟量信号,测试芯线要求多,接口复杂、数据量大,不开箱检测方式下不包括模拟量测试信息,也没有将模拟信号传输给外部接口,导致不开箱检测结果没有全面覆盖导弹状态信息,也没有兼顾弹上遥测系统功能。

针对上述问题,本文阐述一种重构遥测采编功能的技术,将弹上遥测采集系统采用集成化、小型化设计,形成单板形式,根据导弹组合形式的不同,可在导弹方案设计阶段预留综合控制计算机或电气综控组合内遥测采编板卡的空间,并且具备可维护性,需要则加装,不需要则拆卸。

该种重构后的遥测采编单板从功能模块划分为:信号调理模块、程控模块、存储模块、USB 读数模块、电源转换模块及外部接口等。其特征将以上模块进行一体化单板设计,结构上以板卡形式直接集成于弹载电子设备的内部,大大降低了弹上电子设备占用空间及设备间的外部交互关系;同时,通用模块共用化设计可有效减少电子元件的数量,不仅提高了可靠性还减轻了电子设备的重量。信号调理模块由模拟信号采集单元和数字信号采集单元构成,主要实现对弹上各种模拟信号和数字信号的采集和测量。模拟信号采集单元使输入的各模拟信号经分压电路调理成 0~5 V 电压,再通过多路选择单元将其依次送入 A/D 转换模块,经 A/D 转换后一路送至程控模块,另一路送至任务机核心板。数字信号转换为串行 TTL 信号后亦送进程控模块。程控模块采用 FPGA 并行处理架构,实现对信号调理模块的控制、A/D 转换模块数据的接收、数字信号的接收与发送、数据编码、存储模块的读写擦除控制、USB 读数模块的控制、每个周期内的模拟量数据及数字量数据组帧等。存储模块基于大容量存储器,实时存储 FPGA 生成的一定帧格式的数据流。USB 读数模块主要实现在全弹断电后通过 USB 端口将存储模块中的数据分段读出,USB 读数亦由 FPGA 控制。电源模块主要实现将弹上输入的一次电源转换为信号采集板各 IC 集成芯片所需的电压。在设计过程中,采用纹波抑制器使得输出电压平稳;采用专用电源防浪涌模块以减少尖峰电压对系统的冲击等。对外接口主要实现与任务机主板进行连接,并具有对外测控选配模块(如遥测发射机、安控接收模块、外测 GPS 等)信号交互接口。其实物图如图 1 所示。

遥测采编单板有四种工作状态。

其一为导弹不开箱检测状态。遥测采编器将组帧好的模拟量数据发送一路给任务机核心板,任务机将信号采集板转发的遥测采集数据经 1553B 模块转发至机弹分离口,通过与包装箱连接电缆传送至包装箱外部接口,最终送入到导弹地面检测设备,实现导弹不开箱检测功能。

其二为导弹遥测状态。该状态需在外部增加一套遥测发射机,通过对外接口连接,将信号采集板组帧好的 PCM 数据发送给遥测发射机。遥测发射机将该数据调制、放大,经无线信道发送地面遥测接收设备。

其三为数据记录仪状态。该过程中,模拟信号送入模拟信号采集模块进行信号变换,数字信号送入

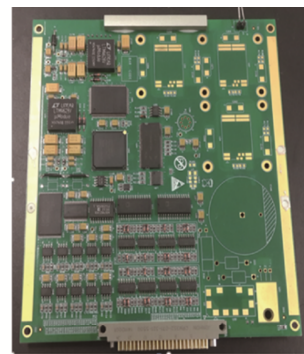
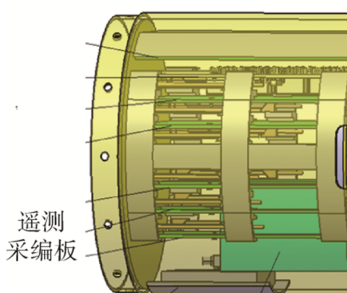


图 1 重构遥测采编板安装及实物图

Fig. 1 Telemetry acquisition coding board diagram

数字信号采集模块,转换成串行 TTL 电平信号,程序控制模块将数字信号模块输出的串行信号、模拟信号采集模块输出的 8 位并行信号,将所有的数据进行组帧后以一定的形式写入、存储于大容量存储模块。导弹下电,信号采集板停止工作。当信号采集板读取状态时,上位机通过 USB 接口将存储模块中的数据读取保存。

其四为导弹安控状态。该状态下需在外部增加一套安控接收机,通过对外接口连接,信号采集板实时接收安控接收机解调后的安控指令,并将有效的指令送至外部任务计算机系统。

综上所述,遥测采编板采取的一体化单板设计,板卡形式可直接集成于弹载任务计算机内部,由此为导弹战斗及遥测状态同时并存提供了硬件支撑,并且通过遥测数据 1553B 的转发,为导弹不开箱精细化检测提供了条件。

2.2 增强供电适应性遥测电源的技术实现

弹载遥测系统作为第三方对导弹其他系统的各种参数进行采集记录,一般需要对供电电源做特别考虑,其主要要求为导弹供电系统电源故障时遥测能记录到该故障点,实际表现为导弹供电电源故障时,遥测电源正常。传统实现方式一般采用独立的遥测电池专为弹载遥测系统供电。

现阶段或未来更长时间,遥测电池一般都是采用锂离子电池组,需经常充电维护,且在使用中,输出电压低于额定电压时就需进行充电。相应的需配置一套电池组专用充放电设备,定期对遥测电池进行充电、维护。同时,在导弹使用中还需配套遥测电池开关及供电电缆一套,增加了设备成本、维护成本及人工成本。

基于弹载遥测系统单独供电的使用维护成本及设计成本考虑,增强供电适应性遥测电源技术的目的是取消遥测电池,从使用弹上电源直接对弹载遥测系统进行供电方面考虑,并对弹上电源进行优化处理,专门设计一种弹载遥测系统电源管理器,加装于供电电源前端使弹载遥测系统能在弹上电源故障时仍能进行一定时间的数据采集,使得遥测系统照常发挥作用。

借助于电源处理芯片及模块性能的快速提高,使得供电特性所涉及的浪涌抑制能力、尖峰抑制能力、宽范围电压调整能力也得到了大幅提升。传统空面导弹供电要求所提及的 200 V/0.15 μ s 的尖峰电压吸收、50 V 的浪涌抑制、18 V~36 V 的电压工作范围,已在常规电源芯片及模块的处理能力范围内,并且借助于近年来高能钽混合电容技术的高速发展,实现了在小体积内大能量存储并在供电系统中可以起一定程度的电池作用,为电路提供断电延时保障。近年来,超级电容器发展迅速,在商业民用领域得到广泛运用,其容量达到惊人的 1 F~5 000 F,超级电容器可反复充电达数万次,充电 10 s~10 min 即可达到额定容量的 95%,并具备无限时间的贮存寿命及极好的低温特性,均是蓄电池无法比拟的。超级电容器被称为能量存储领域的一次革命,并在多个领域取代传统蓄电池^[5]。图 2 为国内某弹载遥测系统电源管理器原理框图。

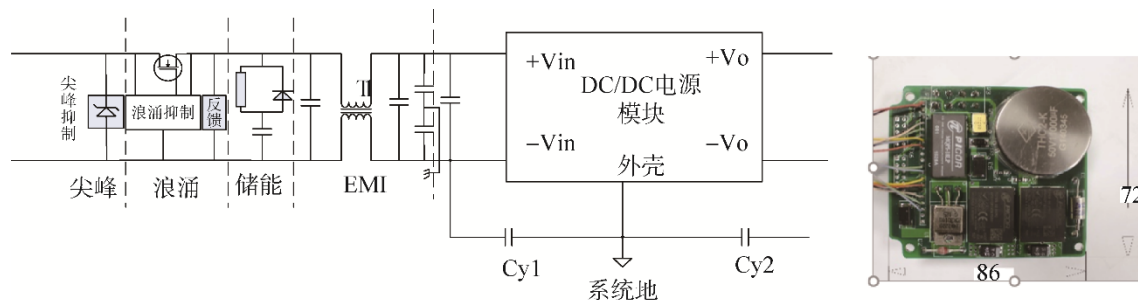


图 2 弹载遥测系统电源管理器

Fig. 2 Power manager of missile borne telemetry system

如图 2 所示,某弹载遥测系统电源管理器由尖峰抑制单元、浪涌抑制单元、储能单元、EMI 单元及 DC/DC 模块组成。其中尖峰抑制单元采用可吸收 600 V/25 μ s 尖峰电压的 RDC 尖峰电压吸收电路,浪涌抑制单元采用成熟的抑制芯片,当输入电压高于钳位电压时,浪涌抑制模块箝位输出,可承受母线电压最大 80 V/50 ms 的浪涌,并且输出功率在 100 W 以上。EMI 滤波单元为通过串入共模电感,同时在 DC/DC

一次电源地及二次电源地间加入 CY1\CY2 电容器等措施, 该方式可较好地滤除电源输入端的共模及地噪声干扰, 并在电源输入并联低 ESR 电容器, 可很好地滤除电源纹波噪声。DC/DC 模块选择 16 V~48 V 成熟的电源模块, 具备过流/短路保护功能, 当模块检测到输出有过流/短路现象时, 电源模块将自动进入保护模式。

储能模块有大电容及超级电容两种模式, 可自由选配, 大电容模式下, 以 11 000 μF 大电容及 1.2 A 供电环境为例。如图 3 所示, 为某型导弹在 U27 弹上主电源失效后 Uyc28 遥测电源瞬断抑制能力实测图, 从曲线上分析, 可供电 300 ms, 如以 10 ms 遥测采样周期计算, 可在弹上电源失效后记录 30 次数据。

在某些情况下, 例如导弹在科研试验后出现任意电源故障, 为保障遥测能继续工作, 并保持到落地时刻, 以备地面遥测站通过遥测信号获取导弹落点地标, 一般采取发射后转遥测独立电源自主供电或导弹电源故障时刻转遥测独立电源独立供电。传统设计方式可通过锂离子电池组实现遥测独立电源, 但考虑到在该应用场景下, 实际需要遥测独立供电的时间一般不超过 100 s。100 s 储能能力, 并以 2 A (标称 28 V) 计算, 需 25 F 的储能电容, 完全可通过超级电容模组实现。

2.3 弹上射频系统综合一体化的技术实现

射频综合一体化技术是利用一个公共的软硬件平台, 将导弹的导航、数据链及测控等射频功能单元集成在一起。在体积、重量、功耗要求特别严苛的机载导弹武器系统中, 多功能射频综合一体化技术已经成为一种发展趋势。近年来, 借助于现代电子集成技术的飞速发展, 特别是以 ADI 公司自 2013 年以来推出的 AD936X 系列射频捷变频收发器为例, 彻底使得已推出近三十年的软件无线电技术 (SDR) 从受限于高昂成本和复杂技术的实现方案变为一个成本低廉、开发简单、高度集成小体积统一的可再编程的无线电平台, 该类芯片的发布为小型化综合射频系统的实现提供了有力的先进技术保障。

某型弹载测控与数据链设备的下行链路为 S 波段, 上行行为 L 波段 (遥控)、S 波段 (数据链), 它们的共性为: 均需要数据处理平台、天线、上变频及下变频, 功率放大及低噪声放大, 均为收发双工模式, 但调制体制、工作频率、性能要求均不一样, 数据链要求极低误码率、抗干扰, 有跳频扩频需求。而遥测系统一般为标准化设备, 其工作体制、工作频段需与现有地面测控站兼容。

弹载测控与数据链一体化设备的弹载发射采用 S 频段共口径微带天线 (宽频段不同频点), 接收采用 S (指令)/L (遥控) 双频段共口径双频段微带天线, 该类天线为共口径双频段微带天线阵, 将 S/L 两个频段的通信天线进行共物理口径且与导弹共形的一体化设计, 可保证在 S/L 两个频段满足通信功能, 同时也可解决多天线布局限制和减小对导弹气动外形的影响。S/L 双频段阵列组合与布局形式如图 4 所示。

弹载测控与数据链一体化设备主机采用基于 AD9361 捷变频架构, 如图 5 所示。

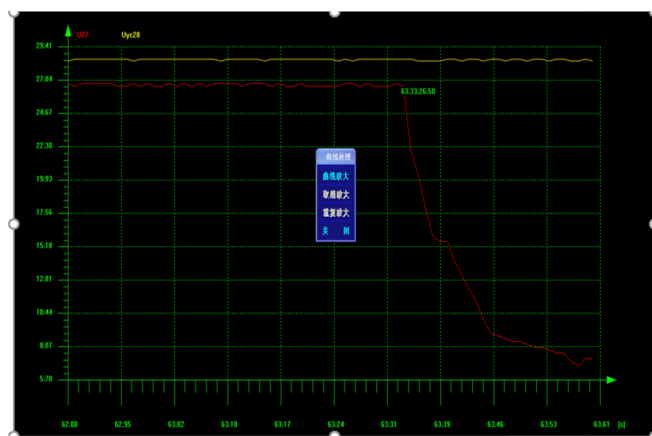


图 3 电源瞬断抑制能力实测图

Fig. 3 Instantaneous power disconnection suppression capacity

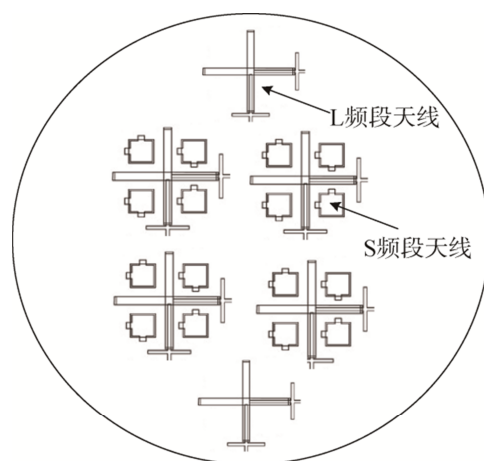


图 4 共口径 S/L 双频段微带天线系统

Fig. 4 Common aperture L/S dual band microstrip antenna system

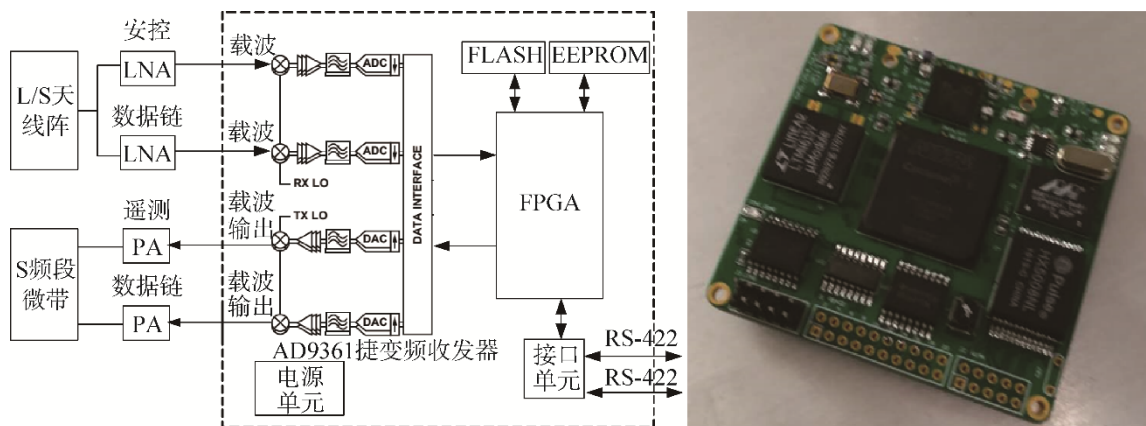


图5 射频综合硬件平台

Fig. 5 RF integrated hardware platform

3 结束语

从 IRIG 106 国际遥测标准观测国外遥测发展现状, 不难发现, 在新体制应用与研究方面, 纠错编码方式的探索及遥测标准的确定方面, 均走在我国的前面, 而我国弹载遥测技术领域在多频段、多体制、高码率发展需求下, 也进行了一定的探索和研究。本文所涉及的遥测总体关键技术, 包括重构遥测采编方式、增强电源适应性遥测电源均已得到工程应用, XML 扩展及弹载射频综合一体化正在工程实践, 高频带利用率调制技术、纠错及检错编码技术可推广到导弹型号中, 通用模块化遥测设备目前在某些型号中已见雏形。遥测技术的发展必然走向高标准化、高码率、低误码率等方向, 总体单位务必紧跟遥测技术发展的脚步, 并大胆试用新技术, 推广新技术, 才可推动我国遥测事业的不断前进。

参考文献

- [1] 朱泽锋, 张伟. 遥测技术发展现状与关键技术展望[J]. 自动化技术与应用, 2016(12): 57-60.
ZHU Zefeng, ZHANG Wei. Development status of technology and prospect of key technology[J]. Techniques of Automation and Applications, 2016(12): 57-60.
- [2] 李凉海. 从 IRIG 106 遥测标准看遥测新发展[J]. 遥测遥控 2017, 38(1): 1-7.
LI Lianghai. New development of telemetry technology viewed from IRIG standard 106-15[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command. 2017, 38(1): 1-7.
- [3] 郭凯. 航天遥测技术现状及发展思考[J]. 遥测遥控 2015, 36(5): 7-15.
GUO Kai. Research on the status quo and development trends of aerospace telemetry technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(5): 7-15.
- [4] 罗清华, 彭宇, 周鹏太, 等. 航空飞行试验新一代网络化遥测技术浅析[J]. 仪器仪表学报 2017, 38(2): 261-270.
LUO Qinghua, PENG Yu, ZHOU Pengtai, et al. Analysis of next generation networking telemetry technology in aeronautical flight test[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 261-270.
- [5] 于凌宇. 世界高端新产品超级电容器技术应用新格局[J]. 电源技术应用, 2010(3): 7-10, 22.
YU Lingyu. New application of world high-end new product: super capacitor technology[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2010(3): 7-10, 22.

[作者简介]

马文超	1986 年生, 本科,	高级工程师, 主要研究方向为测控通信技术。
涂卫军	1983 年生, 硕士,	工程师, 主要研究方向为航空弹药质量监督。
李科连	1984 年生, 本科,	高级工程师, 主要研究方向为供电处理技术。
聂 荣	1990 年生, 硕士,	工程师, 主要研究方向为测控通信技术。

(本文编辑：潘三英)