

航空飞行试验新一代网络化遥测技术浅析*

罗清华¹, 彭宇², 周鹏太¹, 彭喜元², 王伟³, 黄涛³

(1. 哈尔滨工业大学(威海)信息与电气工程学院 威海 264209; 2. 哈尔滨工业大学 自动化测试与控制研究所 哈尔滨 150080; 3. 中国商用飞机有限责任公司试飞中心 上海 200232)

摘要:随着航空飞行试验技术的发展,对飞行试验遥测技术的需求日益增加。在综合试飞和多机协同试飞等需求的牵引下,伴随着无线网络技术的迅猛发展,航空飞行试验遥测技术正逐步从传统的“单向、点对点的遥测”向“双向、多点对多点的空地一体化遥测和遥控网络”模式转变。在此过程中,复杂无线信道环境下基于双向无线网络的遥测传输技术面临着多径传输、多普勒频移和时变等严峻挑战。首先介绍网络化航空飞行试验遥测技术的发展和现状;然后,重点分析国内外主流的飞行试验遥测技术发展状态,并在此基础上,剖析新一代航空飞行试验遥测技术的发展趋势、技术挑战和重点研究内容。

关键词: 航空飞行器;飞行试验;遥测网络;双向无线网络

中图分类号: TP393 TH824 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.5015

Analysis of next generation networking telemetry technology in aeronautical flight test

Luo Qinghua¹, Peng Yu², Zhou Pengtai¹, Peng Xiyuan², Wang Wei³, Huang Tao³

(1. School of information and electrical engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China;
2. Automatic Test and Control Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China; 3. Aeronautical Flight Test Center of COMAC, Shanghai 200232, China)

Abstract: With the development of aeronautical flight test telemetry technology, the requirement for flight test telemetry becomes higher and higher. The integration flight test and multi-fighter coordination flight test are urgent requirements for aeronautical flight test. At the same time, with the promotion of rapid development of wireless communication, telemetry transmission in aviation flight test develops gradually from the traditional "one-way, point-to-point remote sensing" mode to "2-way, multipoint to multipoint integration of space telemetry and remote network" mode. In the new mode, bidirectional wireless-based telemetry network faces the challenges of complex channels, i. e. multipath transmission, Doppler frequency shift and the time-varying link quality. Given this, the progress and current status of telemetry technology in aeronautical flight test is introduced, and its technical challenges are discussed. We review the current research status and works. Finally, the trends, major research challenges and concerns are analyzed, which should be focused on wireless telemetry transmission in networking flight test telemetry.

Keywords: aeronautics vehicle; flight test; telemetry network; bidirectional wireless network

1 引言

航空飞行试验随着飞行器的诞生而诞生,它贯穿于飞行器的设计、制造、鉴定、生产和使用全过程,为飞行器

的优化设计、定型、投产和服役提供重要依据,同时也为航空基础理论和应用技术的探索、验证,以及新一代飞行器设计提供理论和技术支持。因此,飞行试验支撑了航空工业的发展,并且是引领未来航空发展的重要力量^[1-3]。

航空飞行试验遥测系统集成成了飞行试验中的机载数据采集网络^[4-5]、遥测数据传输系统和遥测数据处理系统^[6-9],是实现飞行器飞行试验过程中数据采集、记录、传输、监控和处理的重要设施^[10-11],是确保飞行试验安全、缩短试飞周期、保证试飞成功执行的重要手段^[2-3],在整个飞行试验过程中起着重要作用^[9-10]。

随着飞行器设计和制造技术的发展,航空飞行器的类型和复杂程度发生了巨大的变化,对现代飞行试验遥测的需求也在不断变化和增长,特别是遥测参数增多、传输带宽快速增长以及信息环境下的遥测控制、多机协同试飞等新技术需求的出现^[1-3],带来了更加现实的技术挑战:

1) 机载测试参数增多,遥测数据传输量和传输带宽需要增大

现代飞行器机载数据采集系统越来越复杂,综合化程度越来越高,除了传统的 MIL-STD-1553B、ARINC 等航空总线外,新型高速航空总线(如 AFDX、ARINC429、FC-AE 光纤通道等)以及工业总线如(CAN、RS485、1394 等)在现代机载数据采集网络中普遍存在。同时机载采集的参数量快速增大、高速高分辨率的视频图像采集也使得数据量急剧增加。另外,多科目综合试飞也会导致测试参数的增加。目前,军机机载采集的参数达 10 000 个左右,民机则多达 40 000 个左右^[3,10-11]。

飞行试验机载遥测网络产生的海量数据需要实时或准实时通过遥测系统传输到地面站数据处理中心^[12],使得遥测传输的带宽成倍增加。有专家预测:10 年后飞行试验遥测数据的传输速率将从现在的 10 Mbps 增到 1 000 Mbps^[3]。

2) 遥控功能需求迫切,飞行试验双向网络需求凸显

随着试飞科目的增多和复杂化,现代飞行试验逐步朝着综合试飞、多机协同试飞的高效率模式发展。相对应的“遥测监控”也逐步朝着“遥测和遥控相结合”方向发展,这样地面飞行试验工程师可以根据对飞行试验机型的动作效果和飞行试验测试数据的实时监控,实现对机载测试系统的远程控制 and 动态配置,从而实现高效的飞行试验。同时无人机的飞行试验和实际任务飞行中,也需要远程遥控的支持。因此,除了传统下行遥测数据无线链路外,还需要上行的遥控无线链路^[3]。

此外,随着试飞科目的增多,多机协同试飞成为发展趋势。这种情况下,多架次试验机之间、试验机与地面站、以及地面站系统构成“空地一体化”的飞行试验遥测网络的需求凸显,这就需要遥测传输系统具有双向、宽带化的动态组网的能力^[3]。

3) 遥测数据处理模式的变化需要双向宽带网络的支持

随着现代飞行试验中机载测试系统采集参数类型和数目的增多,导致机载记录的数据量剧增。传统的实时监测和记录、事后数据卸载/回放、预处理和处理的飞行试验遥测数据处理模式,已不能满足现代飞行试验对遥测数据快速处理的需求。为了充分利用飞行试验中试验机型的滞空时间,需要采用采集数据的实时监测处理、准实时数据卸载、准实时遥测数据处理和动态遥测控制同步进行的方法,实现“边飞行、边监控、边卸载、边处理”的遥测数据处理模式,以缩短遥测数据处理周期、提高遥测数据处理效率^[3]。

这种新的遥测数据处理模式需要宽带化双向无线传输网络的支持,以实现飞行试验工程师对试飞动作结果的准实时评定,从而进一步提高整个飞行试验的执行效率。

从上述分析可以看出,各种飞行试验需求的技术实现瓶颈在于宽带化的双向遥测传输。然而,遥测传输技术并没有迅速跟上需求的发展,目前遥测系统中普遍采用的基于 PCM 方式,点对点单向传输的 IRIG 106 标准已经不能满足上述需求。

无线通信网络技术的飞速发展,为飞行试验双向传输系统的宽带化提供了技术基础和可行性。2004 年 10 月美国试验中心和项目评估投资结构(central test and evaluation investment program, CTEIP)提出增强型遥测网络系统(integrated network enhanced telemetry, iNET)规范,并开启 iNET 项目计划,提出采用成熟的商用双向无线网络实现遥测传输。即在现有点对点串行数据流遥测链路的基础上,增加无线网络(radio frequency network, rfNET),实现遥测双向传输宽带网络系统。iNET 代表遥测技术的发展趋势,大有成为新一代遥测标准的趋势^[1-4]。

然而,iNET 同样面临着严峻技术挑战,特别是在双向无线遥测传输方面:目前成熟商用的无线网络技术具有优越的传输性能,但这些技术的应用环境和飞行试验复杂环境截然不同,飞行试验环境所具有的多普勒频移、多径传输和时变等特有问題,使得双向无线遥测网络在实际飞行试验应用过程中遇到严峻的技术挑战。

2 航空飞行试验遥测技术发展现状及挑战

目前飞行试验迫切需要高性能的遥测传输技术,即高带宽、高可靠性的双向传输网络,但目前遥测传输的技术水平相对落后,不能满足实际工程应用的需求,对工程需求和技术现状进行对比分析,如表 1 所示。

表 1 飞行试验遥测传输工程需求和技术现状分析

Table 1 Engineering requirement and technology current status analysis of telemetry transmission in flight test

	工程需求	技术现状
传输带宽	高速运动下的 1 000 M 的传输带宽	20 M
单双向	双向传输:遥测 + 遥控	单向(遥测)PCM
组网通信	空地一体网络(多点对多点)	点对点
遥测网络	恶劣飞行试验环境下高性能双向网络	目前无法满足遥测传输的性能需求

1) 传输带宽

现实飞行试验需要在飞行试验对象高速运动情况下,满足 1 000 M 的传输带宽的传输需求,然而,目前主流的遥测传输带宽只有 20 M。

2) 单双向传输

为了同时满足下行遥测的高带宽传输,以及上行遥控命令的高可靠性传输,迫切需要上下行的双向传输,然而目前主流遥测技术只能实现单向下行 20 M 的 PCM 数据流带宽。

3) 组网通信

为了提高飞行试验效率,迫切需要多机协同试飞,因此需要满足多点通信的空地一体遥测网络。而目前的遥测只能实现点对点的遥测传输。

4) 遥测网络

飞行试验中的通信环境十分恶劣,同时还要满足高性能的空地一体双向传输网络,然而目前成熟的商用无线网络无法满足这一现实需求。

从表 1 可以看出,由于飞行试验遥测的工程需求和飞行试验遥测传输的现实技术水平存在较大的差距,引起了众多厂商、科研院所和高校等科研结构的强烈关注,并致力于下一代遥测传输网络的研究和实现。

2.1 航空飞行试验遥测技术发展及现状

自 20 世纪 60 年代以来,国际上航空飞行试验遥测大部分都是遵从美国的 IRIG 106 遥测标准^[2-3]。IRIG 106 标准是美国靶场司令官联席会议(range commanders council,RCC)下属机构遥测仪器组制定的遥测标准,并且每隔两年更新一次^[2-4]。我国现行的遥测标准 GJB21.2A 也基本上参照了 IRIG 106 标准。IRIG 106 是基于 PCM 单向串行的遥测标准,传输速率为 20 Mbps,传输距离为 200 km^[3]。

随着飞行试验遥测需求的变化和增长,特别是信息环境下的多机协同试飞需求的牵引,以及无线网络技术的推动,航空飞行试验遥测从“单向、点对点”向“双向、多点到多点”的“遥测加遥控”、网络化、集成化和空地一

体化的模式转变^[2-3]。

针对现有遥测标准和技术的不足,为探讨主试验场和满足各类试验基地的新兴需求,美国试验中心和项目评估投资机构(CTEIP)推出 iNET 规范^[3],并在 2009 年 12 月发布 iNET 标准 V5.0 版本(航空推荐或试用版)。2010 年 iNET 项目又发布 iNET 标准(航空推荐或试用版 V0.7)。iNET 是 CIA(CTEIP Integrated Architecture)试验集成结构框架中的重要组成部分。它是多个试验对象上的测试系统和遥测网络系统的综合与集成,是一种实现试验场(靶场)试验与测试资源高效集成的综合网络。

iNET 的最初目标为 RF 链路下行传输速率达到 20 Mbps,上行传输速率达到 2 Mbps,传输距离为 280 km,同时支持 8 个试验对象,逐步实现全美陆、海、空三军主要试验场(靶场)的遥测网络系统集成、空地一体化和多机协同试飞的目标^[3]。未来实现下行传输速率达到 1 000 Mbps,上行传输速率达到 100 Mbps,实现真正意义上的“遥测监控”,有力推进飞行试验遥测向“安全监控和任务监控并重”的方向发展^[3]。

iNET 标准和项目吸引了广大用户和飞行试验测试设备供应商的高度关注和研发投入^[1-3],随着 iNET 项目的推进,iNET 的概念和技术框架初步形成,并开展了相关的地面验证测试。在遥测网络不断增长的需求牵引下,支持 iNET 的测试设备已大量涌现。虽然 iNET 标准没有官方发布,但各飞行试验测试设备主流厂商已经研发并发布相关的产品,例如 iNET-X、iNET-READY 等。我国也提出了 aNET 的概念^[14],因此,iNET 大有超过前标准的趋势,随着在航空飞行试验中的试用与验证,iNET 有望成为正式的遥测网络标准,推广到整个军用、民用飞机飞行试验领域^[15]。

iNET 系统的体系结构如图 1 所示,包括机载测试网络(the test vehicle network,vNET)、遥测网络系统(telemetry network system,TmNS)和地面站网络系统(the ground network,gNET)三部分构成^[16]。

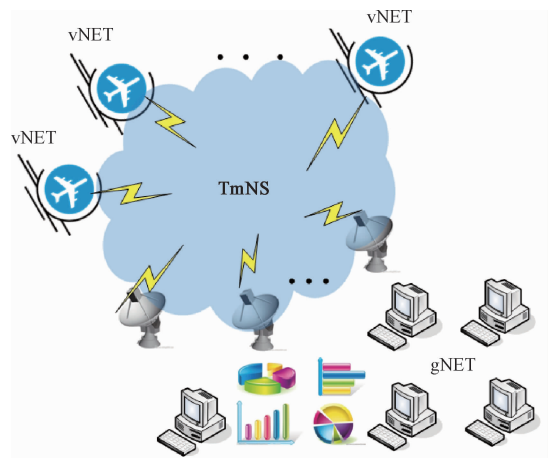


图 1 iNET 体系结构

Fig. 1 Framework of iNET

其中, vNET 主要实现对测试参数的分布式数据采集、实时显示和数据记录存储; gNET 主要实现对飞行试验遥测数据的准实时显示、分析和处理; TmNS 由 rfNET 和串行遥测数据流(serial streaming telemetry, SST) 构成。主要实现遥测数据的下行传输, 以及遥控命令和动态配置信息的上行传输。

在这些子系统中, 基于以太网技术的机载测试网络和地面数据网技术发展较快, 相对成熟。TmNS 中的 SST 是传统 IRIG 106 标准的单向 PCM 串行遥测数据流传输, 技术也比较成熟。TmNS 中的 rfNET 是新采用的双向遥测传输技术, 由于飞行试验无线信道环境复杂多变, 使得双向遥测网络系统面临很大的技术挑战, 特别是如何保证双向无线遥测传输网络的可靠宽带化传输, 成为众多学者和研究机构研究的主要内容, 因而双向遥测传输网络系统是首要解决的关键技术。

2.2 航空飞行试验遥测技术发展面临的挑战

针对高速可靠的“天地一体化”的遥测网络传输问题, iNET 标准提出采用成熟的商用无线网络实现。但目前成熟的无线商用网络标准, 并没有考虑飞行试验无线传输的信道环境特点, 如 IEEE802. 11a 和 IEEE802. 11b 等双向无线宽带网络, 因此并不适合多径传输、多普勒频移和时变特征的航空飞行试验双向无线遥测传输复杂环境。

1) 多普勒频移问题

多普勒频移是指通信双方之间的高速相对移动, 引起通信的收发频率不一致, 导致通信性能下降。由于飞机起飞速度达到 90 m/s, 远远高于蜂窝通信环境中的车载速度。此外, 飞行试验巡航速度达到 278 m/s。因此, 导致的多普勒频移问题严重, 通常达到 600 Hz, 甚至高达 15 kHz, 导致遥测通信链路中断或错误, 通信性能严重下降^[17]。

2) 多径传输问题

多径传输是指电磁波经不同路径传播后, 各分量到达接收端的时间不同, 按各自相位相互叠加而造成干扰, 使得信号失真, 或者产生错误。多径干扰是低仰角接收时遥测链路中断的主要原因^[18]。机场密实环境中周围建筑物的反射效应, 对于在机场滑行或者起飞的飞机而言, 多径传播现象也十分严重, 除了时间选择性衰落外, 还出现频率选择性衰落^[17]。此外, 无线遥测传输带宽的急剧展宽, 频带内的多径干扰现象更加严重^[18]。

3) 无线通信链路行为时变问题

由于多普勒频移和多径效应, 使得信道相关性很差, 信道冲激响应出现严重的时变特性, 导致通信性能严重下降^[19]。

因此, 在复杂飞行遥测传输环境中实现高速可靠的无线遥测传输问题, 并没有得到充分的研究和解决, 特别

是: 无线信道动态变化环境中, 如何保证高速可靠的遥测传输是亟需解决的问题。

3 国内外研究现状

为了满足高可靠性、高带宽的航空飞行试验遥测无线传输的需求, 同时应对双向无线遥测传输面临的多径传输、多普勒频移和时变等各种挑战^[17], 国外研究机构、厂商和学者在高速率、高可靠性、抗多径等通信技术上开展广泛的研究, 主要通过纠错能力强的前向纠错编码(forward error correction, FEC) 技术、频谱利用率高且抗多径的调制技术、大容量传输的空间分集技术以及原型验证系统等方面来提高双向无线网络的通信性能, 推进应用化进程。

3.1 前向纠错编码技术

Turbo 码、低密度奇偶校验码(low-density parity check code, LDPC) 和喷泉码等前向纠错编码方案先后受到众多学者的关注。早在 1960 年, 麻省理工学院的 Robert 提出了 LDPC 码^[20], 但由于译码的高计算复杂度, 未受到关注和应用。随着集成电路和 FPGA 技术的快速发展, 使得在单芯片上实现编译码成为可能。在 1996 年, David J. C. 等人^[21]重新提出 LDPC 码。在 20 世纪 90 年代后期, LDPC 码替代了 Turbo 码, 并广泛应用于高性能编译码性的众多需求领域, 包括卫星数字视频广播(digital video broadcasting, DVB)-S2, 空间通信 CCSDS(the consultative committee for space data systems) 和 WIFI 802. 11 标准中, 并在 2012 年, 成为 iNET 标准中 TmNS 网络前向纠错编码方案^[22]。众多学者不断提出优化的方案, 为了进一步提高 LDPC 码的纠错能力, Dung V. N. 等人^[23]提出寻求减小对 LDPC 码性能降低的子图数量, 获得高性能的编码方案。

此外, 前向纠错编码和先进调制技术的结合也受到重点关注和研究。例如文献[24]针对飞行遥测信道传输问题, 将串行级联卷积码、LDPC 码、软输出维特比算法(soft-output viterbi algorithm, SOVA) 和成形偏移正交相移键控(shaped-offset quadrature phase shift keying, SOQPSK) 调制技术结合, 提出 FEC SOQPSK-TG(telemeter group) 系统, 并在高斯噪声信道中做了评估, 具有较高的通信性能, 证明了该方案的可行性, 但缺乏实际系统的验证; 文献[25]评估了前向纠错编码与基于栅格非一致 SOQPSK 调制技术的兼容性问题, 结果表明, 一致性 SOQPSK 调制技术更适合前向纠错编码, 特别是 LDPC 码; Terry H 等人^[26]采用卷积码、位交织和调制技术有机结合, 采用迭代解调和译码的方式, 来优化星座映射, 从而获得较好的通信性能, 为优化编码调制性能提供了方法基础; 文献[27]针对航空信道模型的时变问题, 采用可变码率的

卷积码与可变速率的调制技术结合,在给定通信链路质量前提下实现可靠通信的最大吞吐量;文献[28]将LDPC和SOQPSK调制结合,并考虑通信的码同步问题,最后采用Altera Cyclone III和Stratix IV FPGA分别实现了LDPC码的编译码器模块和性能评估,为遥测系统的实现提供了重要技术参考。

随着对试飞遥测信道建模的发展,人们认识到遥测信道还具有数据缺失、多径干扰、多普勒频移和快衰落等问题,为此,Luo Q. H.等人^[29]提出FLDPC编码方案,其充分利用LDPC码强大的纠错能力,以及喷泉码的抗丢失特性,并在不同类型信道下进行了验证和评估,证明了其可行性。

性能优越的Turbo码、LDPC码和喷泉码等前向纠错编码方案得到关注和研究,特别是LDPC码被应用到飞行试验遥测数据的双向传输系统中,成为目前遥测数据传输中前向纠错编码的主流方案。并且前向纠错编码与调制技术的有机结合也得到了众多学者的关注。但针对实际飞行试验遥测信道中的多径传输、时变和数据丢失等问题,还没有成熟的解决方案。

3.2 调制技术

随着航空飞行试验技术的发展,遥测监控对实时数据传输速率的要求越来越高,传统的FM调制已经成为制约数据传输速率提高的瓶颈。因此,需要采用更高功率效率和更高频谱效率的调制技术来满足实时监控对传输速率的需求,同时要求调制方案满足一定的误比特率性能。因此具有恒包络和高频谱效率的SOQPSK调制技术和具有抗多径的OFDM技术得到了广泛研究。

SOQPSK调制最早于2000年,Hill在国际会议ITC(international telemetering conference)提出的^[30]。由于其具有较高的频带效率,并且是连续相位恒包络调制,迅速得到关注和应用。并于2004年,成为IRIG-106遥测标准中的调制方案之一。文献[31]针对调制解调过程中的同步问题,对SOQPSK调制在突发传输模式下的同步问题开展了研究,提出了最大似然同步算法;文献[32]对基于时空编码的SOQPSK-TG原型系统进行了设计与实现,包括发送器、接收器,并在空军试飞中心对该系统进行了评估;文献[33]对于基于栅格非一致SOQPSK调制技术在前向纠错编码中的兼容和应用进行了仿真评估,实验结果表明,一致性SOQPSK调制更适合前向纠错编码;文献[24]将SOQPSK和前向纠错编码技术结合起来,提出了性能优异的FEC SOQPSK-TG系统;文献[34]提出SOQPSK调制和LDPC码结合,并采用FPGA进行了硬件实现和评估;为了进一步提高通信性能,文献[35]采用SOQPSK调制和自适应LDPC编码的方法获得通信性能的进一步提升。

虽然SOQPSK调制具有高频带效率、连续相位调制

等优势,但对多径传输抑制能力较差,因此为了提高其抗多径干扰能力,众多学者对SOQPSK调制的均衡问题开展了广泛的研究。针对飞行试验遥测链路的多径干扰问题,文献[36]采用基于恒定模数算法(constant modulus algorithm, CMA)和字母匹配算法(alphabet matched algorithm, AMA)盲线性组合的均衡器来SOQPSK调制技术提供支持;文献[37]针对自适应均衡问题,利用最小均方误差准则初始化常系数均衡算法,并采用权值实时更新的方法实现对SOQPSK调制方法的自适应均衡;文献[38]在10个测试信道中对迫零、最小均方误差和常系数均衡方法的有效性进行了评估和对比分析,并指出和LDPC码结合的必要性。

SOQPSK调制的均衡技术实现较为复杂,且属于四相位调制,其传输带宽有限。为此,具有天然抗多径效应和高可靠性传输特性的OFDM及其与FEC结合构成的编码正交频分复用(coded orthogonal frequency division multiplexing, COFDM)引起了学者们的关注。为了增强飞行试验中飞机与地面站以及空对空遥测数据传输,Koh K. R.等人^[39]提出基于均衡技术和16QAM的COFDM技术,来抑制遥控信道中的频率选择性衰落,以此来增强飞行试验遥测传输能力;针对飞行试验遥测数据传输信道的特点,ZODIAC公司的Alexandre S等人^[17]提出了基于COFDM的C-band遥测无线网络,并和其他方案进行了比较;针对时变的航空信道,文献[19]采用可变速率的QAM调制技术结合OFDM和可变速率的卷积码,实现在给定通信链路质量前提下,编码码率和传输速率自适应调整,实现可靠通信的最大吞吐量;针对rNET中的调制方案的选择,Ang E. D.等人^[40]将自适应调制技术、位交织调制(bit-interleaved coded modulation, BICM)和类型II混合自动请求重发(hybrid automatic repeat request, HARQ)相结合,提高通信的可靠性。事实上,虽然COFDM不是飞行试验遥测标准的调制方案,但其具有抗多径、可组网等优势,已经在波音公司的飞行试验中应用了15~20年的时间。

在国内,飞行试验遥测采用的调制主要是PCM/FM。随着IRIG 106遥测标准中SOQPSK调制技术的采用,以及iNET标准的提出,引起了国内研究机构和学者的关注和研究。2006年,文献[41]设计了MA-SOQPSK的最大似然接收机及简化的接收机;2014年,文献[42]对FQPSK和SOQPSK调制技术进行了比较分析,并设计了对应的通用性最优解调器;针对SOQPSK-TG调制信号解调的高复杂度问题,孙锦华等人^[43]提出了简化状态的解调器,同时还对递归SOQPSK信号的调制,提出了两状态判决反馈解调算法^[44]。

具有连续相位的SOQPSK调制、均衡、同步和实现,以及与纠错编码等相关技术结合,得到了众多学者的广

泛的关注和研究。此外,具有抗多径效应的可靠传输的 COFDM 调制技术也得到了广泛研究。但缺乏时变信道环境下,灵活的 COFDM 编码调制方案选择机制的研究,以实现高速可靠的无线遥测传输。因此,应针对飞行试验遥测数据传输信道的多普勒频移、多径传输和时变特性,采取自适应的调制方案,实现遥测数据无线可靠传输的宽带化。

3.3 空间分集技术

多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)系统利用多天线发送和多天线接收,可以成倍地增加系统容量,且信道容量的增长与天线数目成线性关系。因而广泛应用于 IEEE 802.11n 和 IEEE 802.11ac 标准。同样也被考虑应用在飞行试验遥测数据的 rfNET 系统中,以获得更高的遥测数据传输带宽。

在国外,在 rfNET 的空间分集方面,2011 年美国遥测年会(ITC)上,专门举办了一个 MIMO 系统的专题讨论。针对飞行试验遥测的空间分集问题,文献[45]采用基于空时编码和两个发射天线和两个接收天线的遥测数据传输原型系统,并在实际的试飞环境对其性能进行了验证,结果表明该系统能增加遥测数据传输的可靠性;文献[46]在多径信道中对单信道均衡器和多信道均衡器的性能进行了比较,试验结果证明对于单信道,以最大的功率发送。而对于多信道,则采用相同的功率进行发送;文献[47]对 MIMO 系统的精简接收器的性能进行了评估,该系统基于 SOQPSK-TG 调制,并采用了不同类型的信道均衡器来区分不同天线的数据流。

在国内,有众多的 MIMO 通信系统研究工作,但针对飞行试验遥测数据无线传输的研究工作还很少。2014 年,中国飞行试验研究院的马鹏飞等人^[48]总结了当前飞行试验遥测的问题和今后面临的挑战,分析了 OFDM 技术的原理,通过与单载波遥测技术相对比,指出 OFDM 技术的优势,尤其在抗多径效应方面效果突出,并且指出了设计基于 OFDM 飞行试验遥测系统的关键因素。

为了实现遥测数据的高速传输速率,以及获得较高的频谱效率,空时编码 MIMO 技术逐步得到了关注。为了获得较好的分集增益和编码增益,降低误码率,提高传输可靠性,需要对空时编码方法进行深入的研究和分析,包括均衡、检测和空时编码理论等内容。

3.4 原型验证系统

麻省理工学院的 Peter P 等人^[49]针对遥测接收器提出了开放的系统架构,为遥测通信的实现提供了参考。L-3 公司的 Paul 等人针对 ARTM 遥测解调器的性能进行了仿真分析^[50]。文献[35]对基于时空编码的 SOQPSK-TG 原型系统进行了设计与实现,包括发送器、接收器。并在空军试飞中心对该系统进行了评估。文献[51]基

于 FPGA 设计了基于软件无线电通信的接收器。美国试飞测试设备供应商 TTC(teletronics technology corporation)公司在 nxCVR-2000G 平台上,给出了基于 OFDM 802.11a 的双向半双工遥测数据收发器的设计方案,并且推出了 nxCVR2000 系列收发器产品(nxCVR-2120A, nxCVR-2120B, nxCVR-2130A, nxCVR-2030B),其发射功率为 40~80 W,最大传输距离为 185 km,信息传输速率为 6~36 Mbps,采用基于 IEEE 802.11a 和 OFDM 技术的 TDMA 半双工通信,但仍未达到 iNET 标准指定双向遥测传输的预期目标。

在国内,采用无线网络技术实现飞行试验遥测数据传输的原型系统得到了分析和验证。2008 年,中国飞行试验研究院的白效贤等人参考 iNET 的概念,基于 IEEE802.11b 无线网络技术,设计并实现飞行试验机载测试数据和多路视频图像远距离单向传输的无线网络,传输距离达到 24~202 km,传输速率达 2 Mbps^[1]。2010 年,白效贤等人^[3]分析了航空飞行试验技术的发展趋势,提出了相对应的解决对策;袁炳南等人^[16]分析了新一代遥测网络系统 TmNS 的系统架构,并给出了可行的技术实现方案。2012 年,中国飞行试验研究院的宋政斌等人^[52]提出基于无线网络技术实现飞行试验遥测数据实时远程传输,并对飞行试验遥测传输中的无线组网技术和数据安全进行研究,以某大型运输机为飞行测试平台进行空地数据单向传输试验。试验结果表明,无线网最大传输距离达 202 km,最大传输速率为 2 Mbps。2014 年,王廷路^[2]针对 ARJ21 和 C919 等国家大型飞机的测试需求,提出了机载测试/遥测网络/地面数据处理为一体的大型飞机空地一体化遥测网络系统架构,对其中一些关键技术进行了研究和分析,并提出了解决方案,为今后大型飞机试飞测试及综合监控方法的研究提供借鉴^[53]。

目前有基于软件无线电的验证和评估平台:

1) NanoBEE 是加州大学伯克利分校做的基于 ZYNQ 的低成本无线通信终端验证平台,用于下一代移动 5G 通信系统(LTE-Advanced)、雷达、多天线(2×2MIMO)的软件无线电的验证评估平台;

2) WARP 是莱斯大学开源项目,基于 Xilinx V6 LX240T 平台,可开展 MIMO(包括 2×2,4×4,32×32)等无线通信中各层协议研究、设计和验证的研究;

3) Digilent 公司开发的基于 Xilinx ZYNQ 的 ZedBoard 和 ADI 公司的 FMC 射频板构成的 SDR 平台,实现软件无线电的验证和评估。

虽然众多 rfNET 无线网络原型系统得到验证和评估,但仍没有达到实际应用的完善程度,很多关键技术没有得到解决,例如各种通信关键技术的有机结合与综合优化、上下行无线信道的配置与选择等。应针对实际飞

行试验遥测数据无线传输信道的特点,并结合目前新的无线通信技术,实现高可靠性带宽化的遥测传输。

4 技术发展趋势和研究展望

4.1 双向无线遥测传输网络的发展趋势

随着航空飞行试验遥测技术的发展,遥测传输技术有如下发展趋势。

1) 空地一体化的网络化

多架次试验机同时进行飞行试验需要空中多机间的组网和通信、多个试验机与 gNET 间的组网和通信、以及地面遥测监控站点间组网和通信。为实现“边飞行、边监控、边卸载、边处理”的遥测目标提供网络通信支撑。可利用成熟的无线网络和有线网络技术实现动态灵活的空地一体化组网。

可借鉴目前成熟商用的无线网络,包括 802.11b (11 Mbps)、IEEE802.11g (54 Mbps)、IEEE802.11n (300~600 Mbps)、IEEE 802.11ac (6.93 Gbps)、IEEE802.11ad (7 Gbps) 等无线网络,以及其中的关键技术(例如 TD-OFDM),并考虑飞行试验的特殊环境和特殊需求,并借鉴遥测 IRIG 106,深空通信 CCSDS (consultative committee for space data system) 标准,设计开发用于远距离通信的双向无线网络,满足空地一体化网络的需求。

2) 遥控和遥测链路的双向化

航空飞行试验遥测传输过程中,除了遥测数据的下行无线传输外,还有上行的遥测系统控制和配置命令。可采用全双工宽带通信链路技术,实现未来实现下行 1 000 Mbps、上行 100 Mbps 的传输带宽。

考虑到下行高传输速率以及上行高可靠性传输非对称的双向传输需求,可采用上下行不同通信标准分别实现不同的通信需求,如:直扩通信技术实现高可靠性通信,OFDM 技术实现高带宽传输。

3) 双向无线遥测传输的可靠性和宽带化

机载测试数据采集网络带宽的增加,迫切需要无线遥测网络带宽的增大,可采用空间分集技术、多进制调制、增加编码码率等方法来实现。同时,双向无线遥测传输还有迫切的可靠性需求,可通过纠错性能优越的前向纠错编码(如 Turbo、LDPC 等)、抗干扰能力强的调制方案(如 BPSK、QPSK、SOQPSK 和 OFDM 等技术)和混合自动请求重发(hybrid automatic repeat request, HARQ)技术来实现。值得注意的是:传输的宽带化和可靠性相矛盾,因此,需要根据航空传输信道状态,灵活采用合适的前向纠错编码和调制方案,如自适应编码调制等技术,实现航天飞行试验遥测传输中宽带化和有效性的兼顾。

4) 多种前向纠错编码和调制方案的兼容化

为了实现双向遥测无线传输的可靠性和宽带化,迫切需要采用自适应编码调制技术,因此,对于遥测射频收发器要能够兼容多种前向纠错编码(包括卷积码、Turbo、LDPC、乘积 Turbo 和 Fountain 码)和调制方案,可以采用基于 FPGA 的动态可重构计算技术,实现纠错编码和调制方案的自适应选择。此外,还需要动态信道估计技术的支持。

4.2 研究展望

飞行试验遥测数据无线传输 rfNET 系统中若干通信关键技术得到了众多学者广泛关注和深入研究,综合现状分析,针对其理论和应用研究,还存在诸多挑战^[54],主要体现在如下 6 个方面。

1) 射频收发器系统架构

支撑高速可靠传输的无线通信技术有很多,面向飞行试验的特定需求,针对飞行试验遥测数据无线传输的挑战,选择合适的关键技术,包括前向纠错编码译码、调制解调、空间分集、组网技术、波束形成等技术,并将它们有机地结合起来,提出具有针对性的射频收发器系统架构。

2) 编码调制技术

针对复杂的无线遥测传输信道环境,高效利用前向纠错编码和调制技术有机结合,增强遥测数据无线传输的可靠性,获取更高的编码调制增益。例如 LDPC 码与 SOQPSK 调制的联合解调译码技术、自适应编码调制等技术。

3) 航空飞行试验遥测传输信道建模与估计

飞行试验遥测传输信道具有多径、多普勒频移和时变的特性,因此,除了导致数据传输错误外,也存在数据包传输丢失现象。因此,准确地对无线遥测传输信道建模,并采用相关的信道估计方法,实时地估计出信道行为,为编码技术、调制技术、自适应编码技术和 OFDM 等技术提供重要的先验知识和决策信息。

4) 信道时变特性

充分研究飞行试验遥测数据传输的无线信道时变的特性,实现高带宽和高可靠性的无线传输。可考虑自适应编码技术:在链路质量高时,增大前向纠错编码和调制的传输效率,以增加有效传输带宽;而在链路质量较低时,减小前向纠错编码和调制的传输效率,以增加数据传输的纠错能力,提高抗干扰能力。

5) 空时编码技术

MIMO 系统可以成倍地增加信道容量,而 MIMO 和空时编码的结合可以充分利用 MIMO 系统的信道容量,减小误码率。因此,良好的空时编码方案对于双向无线遥测传输中的 MIMO 系统尤为重要。

6) 原型验证系统和产品开发

在理论方法研究的基础上,利用基于软件无线电

(software defined radio, SDR) 平台(包括 BEEcube 的 nanoBEE、莱斯大学的 WARP 以及 ADI 公司的 SDR 开发平台),搭建飞行试验无线遥测网络的验证和评估平台^[45],验证和评估空地一体化组网、上下行链路传输等功能。并在此基础上,设计开发飞行试验遥测传输系统,推进自主产品的实际应用进程。

5 结 论

双向、多点对多点的“空地一体化”遥测和遥控网络是航空飞行试验遥测技术发展的必然,但面临双向遥测传输网络中遥测遥控传输的可靠性和宽带化的挑战,特别是多普勒频移、多径传输和时变复杂传输信道环境中的宽带遥测传输是必须首先要解决的关键问题之一,可充分借鉴目前无线通信网络领域中的成熟技术和研究成果,充分考虑遥测传输信道环境的特点,面向双向遥测传输网络的特定需求,开发设计适合飞行试验遥测传输网络的无线网络技术。目前,遥测传输通信方法和技术,原型系统及产品离实际应用还有较大的差距,很多通信关键问题并没有得到充分的研究和解决,因此需要开展专项研究工作做进一步的努力和探索,推进我国航空飞行试验遥测理论、技术及其应用的发展。

参考文献

- [1] 白效贤,范旭明,于艳. 基于无线网的飞行试验遥测传输技术研究[J]. 航空科学技术, 2008(5): 26-28.
BAI X X, FA X M, YU Y. Telemetric and transmit technology of flight test based on wireless network [J]. Aeronautical Science Fund, 2008(5): 26-28.
- [2] 王延路. 大型飞机空地一体化遥测网络系统关键技术研究[J]. 电子设计工程, 2014, 22(16): 144-150.
WANG Y L. The research of the key technology of aircraft area integrative telemetry network system [J]. Electric Design Engineering, 2014, 22(16): 144-150.
- [3] 白效贤,杨廷梧,袁炳南. 航空飞行试验遥测技术发展趋势与对策[J]. 测控技术, 2010,29(11): 6-9.
BAI X X, YANG T W, YUAN B N. The telemetry development trends and counter measurements in aviation flight test [J]. Measurement and Control Technique, 2010, 29(11): 6-9.
- [4] ZHAN Y J, MA S C, ZHUANG T, et al. Research on network integration technology of observation stations[J]. Instrumentation, 2015, 2(3): 25-42.
- [5] 李美花,闫卫平,王颖,等. 微传感器阵列多通道数据采集和处理系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(2):312-317.
LI M H, YAN W P, WANG Y, et al. Multi-channel data acquisition and processing system based on micro-sensor array [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(2):312-317.
- [6] 赵蓓蕾,周向阳. 航空遥感惯性稳定平台建模与控制系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(10): 1543-1550.
ZHAO B L, ZHOU X Y. Control system modeling and design of aerial remote inertial stabilized platform [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(10):1543-1550.
- [7] 俞鹏炜,任勇,冯鹏,等. 基于FPGA的千兆以太网CMOS图像数据传输系统设计[J]. 国外测量技术, 2016,35(11):76-81.
YU P W, REN Y, FENG P, et al. Design of gigabit ethernet COMS image data transmission system based on FGPA [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(11): 76-81.
- [8] 杨莹,周晓旭,郭晓澎,等. 基于WiFi的分布式无线数据采集系统[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11): 122-125.
YANG Y, ZHOU X X, GUO X P, et al. Distributed wireless data acquisition system based on WiFi [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(11): 122-125.
- [9] 邓豪,王军锋,乔明,等. 基于轻小型飞机的微型全极化SAR飞行试验研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11):168-172.
DENG H, WAGN J F, QIAO M, et al. Flight experiment research of micro full polarization SAR based on light and small aircraft [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(11): 168-172.
- [10] 张德福,葛川,李显凌,等. 高精度位移传感器线性度标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 982-988.
ZHANG D F, GE CH, LI X L, et al. Linearity calibration method of the high-precision displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 982-988.
- [11] 任先贞,裴东兴,沈大伟. 盲孔测温传感器瞬态温度测试研究[J]. 中国测试, 2016,42(11): 84-88.
REN X ZH, PEI D X, SHEN D W. Testing of transient temperature based on temperature sensors blind hole[J]. China Measurement & Test, 2016,42(11): 84-88.
- [12] 王东风,刘千,韩璞,等. 基于大数据驱动案例匹配的电站锅炉燃烧优化[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 420-428.
WANG D F, LIU Q, HAN P, et al. Combustion optimization in power station based on big data-driven case-matching [J]. Chinese Journal of Scientific

- Instrument, 2016,37(2): 420-428.
- [13] 牛磊磊, 罗艳强, 付泽川. 基于 FPGA 的 SOQPSK_MIL 中频调制技术实现 [J]. 测控技术, 2013, 32(11): 48-50.
- NIU L L, LUO Y Q, FU Z CH. Implementation of SOQPSK-MIL intermediate frequency modulation based on FPGA [J]. Measurement and Control Technique, 2013, 32(11): 48-50.
- [14] 杨廷梧, 田宝泉. 飞行试验新型遥测机载网络化采集于记录系统架构 [J]. 测控技术, 2013, 32(5): 59-63.
- YANG T W, TIAN B Q. Network architecture of airborne acquisition and recording of telemetry in flight test [J]. Measurement and Control Technique, 2013, 32(5): 59-63.
- [15] 杨廷梧. 新型遥测系统中机载网络化测试技术展望 [J]. 测控技术, 2010, 29(a): 141-145.
- YANG T W. The prospect of airborne test network in new TmNS [J]. Measurement and Control Technique, 2010, 29(a): 141-145.
- [16] 袁炳南, 霍朝晖, 白效贤. 新一代遥测网络系统-TmNS [J]. 测控技术, 2010, 29(11): 18-23.
- YUAN B N, HUO ZH H, BAI X X. The new generation tememetry network system-TmNS [J]. Measurement and Control Technique, 2010, 29(11): 18-23.
- [17] ALEXANDRE S, ALAIN T, GUILLAUME D. Paradigms optimization for a C-Band COFDM telemetry with high bit efficiency [C]. International Telemetering Conference, 2013: 388-397.
- [18] SERGE K D, OLADOTUN O, HENRY U, et al. Evaluation of CMA + AMA equalization for SOQPSK modulation in aeronautical telemetry [C]. International Telemetering Conference, 2013: 358-365.
- [19] ELRAIS M, MENGISTE B, GUATAM B, et al. Variable rate OFDM performance on aeronautical channels [C]. ITC, 2013: 734-741.
- [20] GALLAGER R G. Low density parity check codes [M]. Monograph; M. I. T. Press, 1963.
- [21] DAVID J C, NEAL R M. Near shannon limit performance of low density parity check codes [J]. Electronics Letters, 1997,33(6): 457-458.
- [22] TERRY H, JIM U. SOQPSK with LDPC error correction: A new dot in the bandwidth-efficiency plane [C]. European Test and Telemetry Conference, 2013: 205-209.
- [23] DUNG V N, VASIC B, MARCELLIN M W. Methods of searching for trapping sets of quasi-cyclic LDPC codes and their applications in code construction [C]. ITC, 2011: 239-248.
- [24] HOU W SH, PERRINS E. On the simulation of FEC SOQPSK-TG systems with symbol by symbol and SOVA decoding methods [C]. ITC, 2011: 259-264.
- [25] PERRINS E. Incompatibility of trellis-based non coherent SOQPSK demodulators for use in FEC applications [C]. ITC, 2012: 839-843.
- [26] TERRY H, JIM U. SOQPSK with LDPC: Spending bandwidth to buy link margin [C]. ITC, 2013: 366-377.
- [27] ELRAIS M, MENGISTE B, GUATAM B, et al. Variable rate OFDM performance on aeronautical channels [C]. ITC, 2013: 734-741.
- [28] TERRY H, JIM U. SOQPSK with LDPC error correction: A new dot in the bandwidth-efficiency plane [C]. ETC, 2013: 205-209.
- [29] LUO Q H, PENG Y, WANG W, et al. Evaluation of FLDPC coding scheme for adaptive coding in aeronautical telemetry [C]. ITC, 2015: 342-341.
- [30] HILL T J. An enhanced constant envelope interoperable shaped offset QPSK (SOQPSK) waveform for improved spectral efficiency [C]. ITC, 2010: 2000.
- [31] EHSAN H. Synchronization of SOQPSK-TG in burst-mode transmissions [C]. ITC, 2013: 507-516.
- [32] RICE M. Space-time coding for aeronautical telemetry: Part I - system description [C]. ITC, 2011: 831-846.
- [33] PERRINS E. Incompatibility of trellis-based non coherent SOQPSK demodulators for use in FEC applications [C]. ITC, 2012: 839-843.
- [34] TERRY H, JIM U. SOQPSK with LDPC: Spending bandwidth to buy link margin [C]. ITC, 2013: 366-377.
- [35] RICE M, NARUMANCHI G, SAQUIB M. Decision feedback equalization for SOQPSK [C]. ITC, 2012: 854-866.
- [36] SERGE K D, OLADOTUN O, HENRY U, et al. Evaluation of CMA + AMA equalization for SOQPSK modulation in aeronautical telemetry [C]. ITC, 2013: 358-365.
- [37] ARLENE C, HENRY U. Real-time CMA equalization for SOQPSK for aeronautical telemetry [C]. ITC, 2014: 284-291.
- [38] SERGE K D, PETER T. CAM equalization of measured SOQPSK-TG modulation data transmitted using the iNET packet structure [C]. ITC, 2015: 477-483.
- [39] KOH K R, LEE S B, KIM W W. Telemeter method using delayed frame time diversity (DFTD) and reed solomon code [C]. ITC, 2011: 275-283.

- [40] ANG E D, WALKENHORST B T, HAN J. A simulation testbed for adaptive modulation and coding in airborne telemetry [C]. ITC ,2014: 273-283.
- [41] 郭兴波, 杨知行, 潘长勇. MA_SOQPSK 的最大似然接收机和简化接收机 [J]. 清华大学学报:自然科学版, 2006, 46(4): 523-526.
- GUO X B, YANG ZH X, PAN CH Y. Viterbi detector and simplified detector for MA-SOQPSK [J]. Journal of Tsinghua University: Technology and Science, 2006, 46(4): 523-526.
- [42] 郅志鹏, 翟海涛, 钟声, 等. FQPSK 和 SOQPSK 信号的通用准最优解调设计 [J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(4): 77-81.
- XI ZH P, ZHAI H T, ZHONG SH, et al. A general quasi-optimal demodulation design for FQPSK and SOQPSK [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(4): 77-81.
- [43] 孙锦华, 韩会梅, 朱吉利. SOQPSK_TG 信号的简化状态解调器 [J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(5): 1-13.
- SUN J H, HAN H M, ZHU J L. Reduced state demodulator for the SOQPSK-TG signal [J]. Journal of Xidian University, 2014, 41(5): 1-13.
- [44] RICE M, NARUMANCHI G, SAQUIB M. A new approach to multipath mitigation in aeronautical telemetry [C]. ITC, 2011: 1169-1189.
- [45] MOAZZAMI F, COLE-RHODES A. Capacity enhancement in aeronautical channels by MIMO technology [C]. ITC, 2011: 1190-1199.
- [46] DAVAD E R, ROBERT L R. MIMO capacity gains for test range telemetry [C]. ITC, 2013: 157-164.
- [47] KULKARNI A, KOSBAR K. Performance analysis of zero forcing and minimum mean square error equalizers on multiple input multiple output system on a spinning vehicle [C]. ITC ,2014: 578-587.
- [48] 马鹏飞, 乔嘉, 高志远. 多载波 OFDM 技术在飞行试验遥测中的应用研究 [J]. 高科技产品, 2013, 131(11):28-31.
- MA P F, QIAO J, GAO ZH Y. The application research of multi-carrier OFDM in flight test [J]. Product R & D, 2013, 131(11):28-31.
- [49] PETER P, JOHN N, MARK P. An open systems architecture for telemetry receivers [C]. ITC , 2012: 894-899.
- [50] DOUBAL P. ARTM telemetry waveforms demodulator analysis [C]. ITC, 2012: 900-908.
- [51] MANCO A, CASTRILLO V U. Design of basic receiving

functions for an SDR based communication system [C]. ITC ,2012: 909-918.

- [52] 宋政斌, 王伟, 权永刚. 无线网在飞行试验遥测传输中的研究与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(1): 153-155.
- SONG ZH B, WANG W, QUAN Y G. Research and application of wireless network on flight test telemetry transmission [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(1): 153-155.
- [53] 党凡. 航空飞行试验遥测技术的发展趋势展望与应对 [J]. 通讯世界, 2015(9): 68-69.
- DANG F. The development tendency and response of aeronautical telemetry technology in flight test [J]. Communication World, 2015(9): 68-69.
- [54] 黄伟, 王伟. 大型民航试飞测试发展与挑战 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(9): 5-11.
- HUANG T, WANG W. Development and challenge of FTI for large civil aircraft [J]. Computer Measurement & Control ,2016, 24(9): 5-11.

作者简介



罗清华(通讯作者), 分别在 2005 和 2008 年于哈尔滨工程大学获得学士和硕士学位, 2013 年毕业于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为哈尔滨工业大学(威海)讲师、硕士生导师, 主要研究方向为无线感知网络、不确定性数据处理和遥测传输技术。

E-mail: luoqinghua081519@163.com

Luo Qinghua (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Harbin Engineering University, in 2005 and 2008, respectively. He received his Ph. D. degree in 2013 from Harbin Institute of Technology. Now, he is working in Harbin Institute of Technology at WeiHai as a lecturer and master supervisor. His main research interests include wireless sensor network, uncertain data processing and telemeter transmission is WSN.



彭宇, 分别在 1996 年、1998 年和 2004 年于哈尔滨工业大学获得学士、硕士和博士学位, 现为哈尔滨工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为现代测试技术、测试信息处理和无线传感器网络技术。

E-mail: pony911@163.com

Peng Yu received his B. Sc. , M. Sc. and Ph. D. degrees all from Harbin Institute Technology in 1996, 1998 and 2004, respectively. Now, he is working in Harbin Institute of Technology as a professor and doctoral supervisor. His research interests include modern test technology, test information processing and WSN.