

文章编号: 1674-8190(2021)01-129-07

民用飞机无线航空电子内部通信网络技术综述

范祥辉, 陈长胜, 史岩, 杨建茜

(中国航空工业集团有限公司 西安航空计算技术研究所, 西安 710068)

摘要: 民用飞机内部航空电子通信技术由无线通信部分替代有线通信, 可进一步降低飞机自重, 增强飞机安全性, 提升民用飞机运营经济性, 将成为下一代民用飞机发展的重要技术。目前, 该技术尚处于研究起步阶段, 为了促进该技术的发展, 本文在研究国内外相关文献的基础上, 对当前的研究进行概括和总结, 明确民用飞机无线航空电子内部通信(WAIC)网络的定义, 概括了 WAIC 网络在国内外的研究现状, 分析了 WAIC 网络的特点, 介绍了 WAIC 网络架构、时间同步、网络管理及网络安全等关键技术, 提出了基于软件无线电平台技术开展 4.2~4.4 GHz 无线通信节点硬件设计的技术路径, 为后续研究奠定基础。

关键词: 民用飞机; 航空电子; WAIC 网络; 4.2~4.4 GHz; 机载无线内部通信

中图分类号: V243.1; TP393.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.01.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Overview of Wireless Avionics Intra-communication Network Technology

FAN Xianghui, CHEN Changsheng, SHI Yan, YANG Jianxi

(Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, The Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Xi'an 710068, China)

Abstract: The wireless avionics communication technology in the civil aircraft will be an important technology for the development of the next generation aircraft, which can further reduce the weight of the aircraft, enhance the safety of the aircraft, and improve the operation economy of the civil aircraft. This paper describes the definition of wireless avionics intra-communication (WAIC) network, summarizes the research status of WAIC network at home and abroad, analyses the characteristics of WAIC network, and gives the key technologies, such as network architecture, time synchronization, network management, network security and hardware design in the process of WAIC network design. It also puts forward the technology path for realization of 4.2~4.4 GHz wireless communication based on software defined radio in WAIC network.

Key words: civil aircraft; avionics; WAIC network; 4.2~4.4 GHz; wireless avionics intra-communication

0 引言

航空电子技术的发展极大地提高了民用客机的安全性及自动化水平, 各子系统之间通过航空数

据总线交换信息, 当前航空器线缆及相关连接装置
的重量占航空器总重量的 2%~5%。大量通信线
缆的使用给飞机的制造和运营维护带来了额外
的成本。据估计, 电气线路问题平均每个月造成两次

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-09-06

基金项目: 国家重点科研资助项目(MJ-2018-S-33)

通信作者: 范祥辉, 5659607@qq.com

引用格式: 范祥辉, 陈长胜, 史岩, 等. 民用飞机无线航空电子内部通信网络技术综述[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 129-135.

FAN Xianghui, CHEN Changsheng, SHI Yan, et al. Overview of wireless avionics intra-communication network technology[J].

Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 129-135. (in Chinese)

飞行中的火灾、超过 1 077 次任务中止,每年损失超过 10 万个任务小时^[1]。电缆损坏不仅会影响与故障导线相关的系统,还会影响相邻系统^[2]。飞机运营成本的 13% 与维护、维修有关^[3],此外,线缆的大量使用还给航空通信系统的配置、维护、故障排除带来了挑战。

为了进一步减轻重量、降低成本、提高民用飞机飞行的安全性和可靠性,使用无线通信替代部分有线通信,是未来航空制造业的发展方向之一。无线航空电子内部通信(Wireless Avionics Intra-communications,简称 WAIC)^[4]网络可实现同一架飞机上多个设备(两个及以上)的无线连接,适用于安全相关和常规飞行相关的应用,例如烟雾探测、客舱压力、防除冰、紧急照明、起落架等。以空客 A380-800 为例,全机线缆长度约 470 km,线缆质量约 5.7 t,其中 30% 的线缆(约 1.7 t)可以用无线通信替代。

本文综述 WAIC 网络概念以及国内外研究现状,分析 WAIC 网络架构及需要解决的关键技术。

1 WAIC 网络概念

1.1 WAIC 网络含义

WAIC 网络旨在替代单个飞机上的面向特定业务的有线通信,借助安装在航空器上不同位置的无线传感器,实现航空器驾驶舱与机翼、发动机、客舱和货舱等重要位置的无线通信传输,其应用主要包括航空器结构健康监测、关键位置感知控制、航空运行信息实时传输等^[5]。WAIC 网络并不提供飞机与地面工作站、多架飞机之间、飞机和卫星之间、以及乘客无线上网的相关服务。根据传感器安装位置和数据传输速率的不同,在国际电信联盟(International Telecommunication Union,简称 ITU)报告书中为 WAIC 系统确定了四种不同的传输模式,分别是高速率内部传输模式(HI)、低速率内部传输模式(LI)、高速率外部传输模式(HO)、低速率外部传输模式(LO);并针对不同的传输模式建立了对应的传输模型^[5]。

1.2 WAIC 网络特点

作为下一代民用飞机机内通信发展的方向,

WAIC 网络具备以下特点:

(1) 低复杂性:WAIC 网络的引入极大地降低了电气布线和线束使用的复杂性。当前,线束设计是决定设计新飞机所需时间的关键因素之一,设计并部署数英里的线路给飞机制造人员带来了极大的挑战,此外,在飞机长时间生命周期内对密集线路进行周期性维护也具有很大难度。

(2) 高经济性:电缆和布线对飞机制造商、运营商以及乘客来说都是一笔巨大的费用。主要成本包括线束设计、线束制造、连接器的维护和更换,以及飞行过程中电缆和连接器自重所带来的相关运营成本。

(3) 高灵活性:机舱无线通信设备安装的灵活性可显著提高通信网络的可重构性。此外,WAIC 网络由于其易拓展性,可以以更低的难度和费用安装新的传感器。更重要的是,WAIC 网络的引入还可以对运动或者旋转部件的参数进行可靠监控,比如发动机转子轴承,这些都是有线通信难以实现的。

(4) 高可靠性:减少线缆的使用在一定程度上可降低线缆切断或有缺陷接线的风险,简单的使用线束冗余来提供容错机制容易受到“共模故障”的影响,使用无线链路冗余方式则不存在该情况,且在一定程度上能够降低无线通信带来的不稳定问题。此外,无线通信的引入使得机组人员可以实时可靠地监控航空器各部位的运行情况,极大地提高了航空器的运行效率和安全飞行能力。

2 国内外研究现状

2.1 国外研究现状

2010 年世界无线电通信大会(WRC-10)通过了 M. 2197 报告,该报告的内容代表了国际商用航空业所预期的 WAIC 系统应用的现状。2013 年世界无线电通信大会(WRC-13)上通过 M. 2283 报告,该报告介绍了 WAIC 网络应用特性、系统特性以及 WAIC 网络频谱要求。2014 年 2 月发布 M. 2059 标准,提供了无线电高度仪的操作和技术特性以及保护标准。2014 年 11 月发布 M. 2318 标准,表明 4.2~4.4 GHz 频段是满足 WRC-15 议程要求的 15.7 GHz 以下的唯一选择;同月发布

M. 2319 标准,研究 WAIC 系统和现有系统在 4.2~4.4 GHz 频段的兼容性。2015 年世界无线电通信大会(WRC-15)发布标准 M. 2285,正式确定了 4.2~4.4 GHz 作为 WAIC 的通信频段^[6]。

WAIC 网络自提出以来,工业界和学术界在标准的制定和技术的选择方面进行了积极的探索。早在 2013 年,文献[5]中就提出了一系列受益于此类网络部署及其要求的应用并给出了较为详细的系统设计。近两年的研究热点主要集中在 WAIC 网络与现有机载系统的共存^[7-10]、WAIC 网络与工业无线传感器网络的结合^[5-6]、WAIC 网络通信模型的建立^[11-12]等方面。

关于 WAIC 网络与现有机载系统的共存问题,文献[13]在不同飞行场景中测试了 WAIC 网络与航空无线电导航业务、卫星地球探测业务(无源)和固定业务的最坏潜在干扰影响,结果表明:通过合理的配置,采用诸如降低外部 WAIC 网络的天线发射功率、使用定向天线等措施,WAIC 网络与航空无线电导航业务、卫星地球探测业务(无源)和固定业务可共用 4.2~4.4 GHz 频段。

关于 WAIC 网络与现有工业无线传感器网络的融合问题,P. Park 等^[6]在满足飞行认证的前提下,从丢包率和最大允许丢包率等方面分析了具有代表性的工业无线协议(LLDN、WirelessHART、WISA 和 ISA100.11a)在安全关键航空电子设备应用中的性能和可行性,从侧面说明了自适应的 MAC 层协议是决定网络鲁棒性的关键因素;文献[5]以 IEEE 802.15.4 和 IEEE 802.11a/g 标准为例分析了协议应考虑介质访问机制,主要包括通信开销、信道化开销因子以及调制效率等多方面因素。

关于 WAIC 网络通信模型建立方面,M. Suryanegara 等^[12]综合功率因数、调制效率、频谱以及 OPS 数量等多方面因素建立了测量模型,详细分析了 GMSK、QPSK、16-PSK、8-FSK 等调制方法的技术特性,结合 WAIC 网络低速率传输、高效率调制、宽频谱和大数量 OPS 的技术要求,得出 QPSK 在 WAIC 网络中具有较好的适用性。

关于数据传输的吞吐量,S. Das 等^[14]讨论了一种利用 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 作为物理层的传输技术,其在

WARP (Wireless Open-Access Research Platform) 硬件中实现了基于 FPGA 的测试,首次在实验床中完成且测试了 WAIC 网络在 2.4 和 4.5 GHz 频段的高吞吐量通信。

就传播模型而言,文献[5]对空客 A320-200 飞机机舱进行建模并使用全 3D-FDTD (Three-Dimensional Finite Difference Time Domain) 方法分析估算了机内 WAIC 网络无线电发射机的基本传播特性,分别在距机舱地板 0.5、1.0 和 1.5 m 处测量了信号传播损耗值,表明与自由空间传播相比,在 4.4 GHz 频段飞机机舱平面每个高度的传播损耗平均值约为 10 dB。

上述工作对于 WAIC 网络相关标准的建立和技术的发展具有重要的参考意义。

2.2 国内研究现状

有关在飞机上应用无线通信技术,目前国内的研究主要集中在客舱内为乘客提供娱乐服务的无线网络^[15],在机体上为飞机健康管理提供数据采集监控的无线传感器网络^[16],以及为飞机与地面廊桥间提供无线连接,完成数据快速上传下载的机场无线网络^[17]等。但这些研究都与 WAIC 网络不同,WAIC 网络是飞机控制网络的延伸,属于飞机控制网络的一部分,国内针对 WAIC 网络的研究尚处于起步阶段,需要进一步开展更深入的研究。

3 关键技术

3.1 WAIC 网络架构设计

飞机内部通信应用数量众多而且功能差异极大,几千个应用节点的传输速率从每秒几个字节到每秒几兆字节不等,对传输延时的要求也大不相同。此外,飞机内部复杂的电磁环境^[15],舱室之间隔板对电磁信号的影响等复杂的应用状况也给 WAIC 网络架构的设计带来了严峻的考验。本文以典型客机空客 A320 作为应用模型对 WAIC 网络规模和部署进行研究。A320 飞机内部主要包含如下部件和舱段:驾驶舱、客舱、辅助动力装置 (APU) 舱、设备舱、前货舱、后货舱、散舱、舱底、发动机短舱、中央油箱、机翼油箱、垂直尾翼和水平尾翼、主起落架舱、前起落架舱、缝翼和襟翼舱等,如图 1 所示。

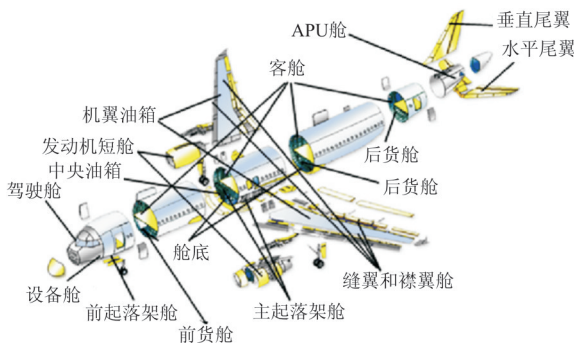


图 1 A320 飞机主要部件和舱段^[18]

Fig. 1 Main components and cabin sections of A320 aircraft^[18]

从系统需求来看,WAIC 网络需要对飞机所有区域(内部和外部)提供全面覆盖。为了减小飞机内部舱室隔板和金属外壳等对射频信号的削弱作用,可以对系统采取划分子网的方式解决该问题^[18]。针对飞机上复杂的应用场景进行设计优化,将飞机内部通信按照位置划分为飞机外部应用和飞机内部应用,按照传输速率分为高速应用和低速应用。针对不同类型的应用制定适合的设计方案。系统设计则必须考虑节点的最佳数量和位置,以及射频功率和频谱资源的划分。针对该问题 M. 2283 给出了一种网络架构,如图 2 所示。该架构将 WAIC 网络应用根据传感器所在位置和数据传输速率划分为内部高速应用、内部低速应用、外部高速应用和外部低速应用四种类型。

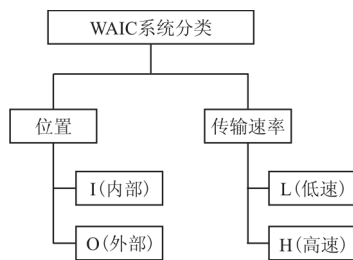


图 2 WAIC 网络应用分类^[5]

Fig. 2 WAIC network application classification^[5]

针对高速和低速两种应用的特点提出两种解决方案。针对低速应用,其单个链路数据速率小于 10 kbit/s,提出以 IEEE 802.15.4 为基础进行网络协议开发;针对高速应用,其单个链路数据速率范围从 12.5 kbit/s 到 1.6 Mbit/s 不等,净峰值数据速率可达 4.8 Mbit/s,提出以 IEEE 802.11 a/g 为基础进行网络协议开发。

针对上述 WAIC 网络架构,M. 2283-0 以一架

典型客机为模型,对 WAIC 的无线频谱开销进行了估算。在考虑了应用的数据传输速率、协议开销、信道化开销、调制效率等多个因素后,计算出 WAIC 网络总频谱需求为 145 MHz^[5]。

因此,在 WAIC 网络架构设计时,要充分考虑其与位置、速率的相关性,提取共性技术,借鉴现有成熟民用无线网络通信作为基础协议,在此基础上进行增强型开发,以保证网络传输的可靠性。范祥辉等^[16]给出了机载无线传感器网络架构是由无线网络作为子网,并接入骨干网的整体架构,同样,WAIC 网络在整个民用飞机通信网络平台中也是作为子网存在,并通过网关接入骨干网 AFDX (Avionics Full Duplex Switched Ethernet) 网络。因此,在设计中要充分考虑 WAIC 网络与现有骨干网络 AFDX 的兼容性。

3.2 WAIC 网络同步技术

时间同步对于 WAIC 网络完成一系列基础性操作至关重要,尤其体现在网络调度和数据可靠传输方面。受 WAIC 网络业务模式的影响,WAIC 节点所处的环境差异较大,节点晶体振荡受环境影响所产生的累积误差也随之增大,这给 WAIC 网络实现精准同步带来了极大的挑战。

根据 WAIC 网络拓扑结构(如图 3 所示)和自身特点,结合现有工业无线传感器网络协议,综合考虑集中式和分布式时间同步技术的适用条件,采用 TPSN 协议可以达到理想的同步效果。协议采用分层结构,基于发送者-接收者模式,可提供全网范围内的时间同步。

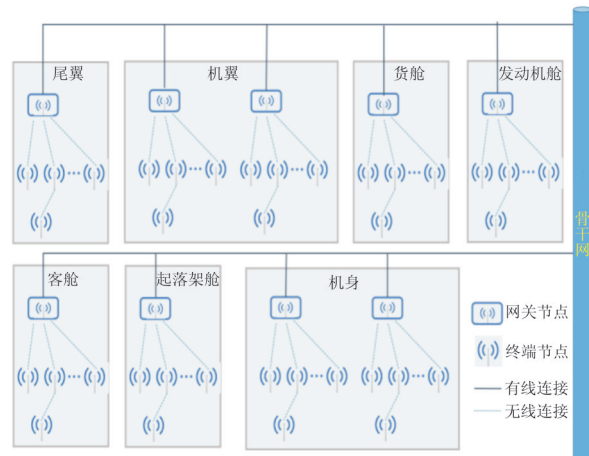


图 3 WAIC 网络应用拓扑结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of WAIC network application topology

首先由网关节点广播层次消息,直接接收者属于层次 1,即为网关节点的子节点组;再由层次 1 的节点依次转发广播消息,分别建立层次 2 的节点组;以此类推,建立所有节点的树状结构。

节点与父节点之间通过双向握手进行同步,首先子节点 S 在 T_1 时间发送包含子节点级别和 T_2 时间戳的分组给父节点 R ,节点 R 在 T_2 时间收到分组,得到 $T_2 = T_1 + d + \Delta$;然后在 T_3 时间发送应答分组给节点 S ,分组中包含父节点的级别和时间戳 T_1, T_2, T_3 的信息,如图 4 所示。在子节点处可得 $T_4 = T_3 + d - \Delta$,由此:

$$\Delta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}$$

$$d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2}$$

子节点在得到 d 和 Δ 的具体值后,将时间值同步至父节点。

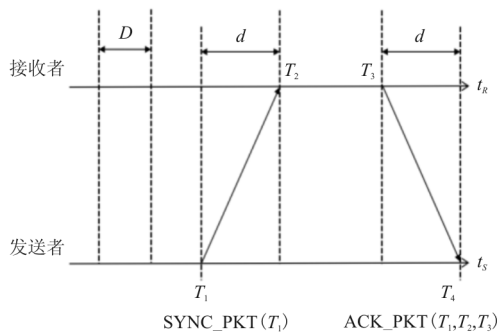


图 4 TPSN 协议示意图

Fig. 4 Schematic diagram of TPSN protocol

由于时钟精度、算法实现平台和测量方式的差异性,实际同步精度性能通常难以估量,相关资料显示 TPSN 协议的时间单跳同步精度高达 $16.9 \mu\text{s}$ ^[19]。相较于其他同步算法而言,TPSN 协议在 WAIC 系统网络环境中也可实现符合要求的时间同步效果。

3.3 WAIC 网络管理技术

WAIC 网络规模大、节点数量多、涵盖业务种类差别广,给 WAIC 网络管理带来了巨大挑战。以空客 A320 为例,安装 LI 链路数量可能高达 4 150 个,安装 LO 链路数量可能高达 400 个,安装 HI 链路数量可能高达 125 个,安装 HO 链路数量可能高达 65 个。

飞机可以被认为是不同舱室的集合,其与 RF

信号或多或少地相互隔离。每个隔间被划分成一个子网,每个子网包括以下组件:

(1) 网络节点,WAIC 网络实体,能够使用无线接口连接并与另一个 WAIC 网络实体通信。

(2) 网关节点,网络节点,将 WAIC 网络(或部分)连接到其他有线机载网络。

(3) 终端节点,网络节点,能够使用 WAIC 无线接口在网关节点和传感器、作动器之间提供连接,提供无线链路中继功能。

网关节点负责整个子网的设备接入、退出和通信调度,对整个子网的实时运行状态、配置、性能进行基于策略的控制。当设备发送消息,其需要向网关节点申请“合同”(Contract)。当网关节点接收到合同申请,网关节点根据其掌握的整个网络当前的调度信息(链路、时隙、路由路径、设备容量等),计算是否可以满足合同申请。如果可以满足,则计算一条满足合同的调度(同样包含上述信息),并配置沿途的设备,最后向源节点返回批准合同,否则不会批准建立合同。

3.4 WAIC 网络安全技术

飞机上传输的数据,尤其是飞机健康监测数据和控制指令,对于飞机的运行、管理和安全至关重要。因此,WAIC 网络对安全性(Security)要求较高,其应能够解决来自乘客或机上实体以及地面或其他飞机的不同类型的攻击。

目前,无线通信主要面临数据完整性、真实性、保密性、链路密钥建立、信道干扰^[20]、安全路由等安全性问题。这些安全威胁都有可能对 WAIC 系统造成极大的威胁。

WAIC 网络尚未指定具体的安全举措,根据 WAIC 网络特点,结合工业无线传感器网络现有安全方案和先前机载网络无线网络安全架构^[17],综合考虑网络的高效性和安全性,可以采取以下措施:

(1) 设备之间的通信采用双向认证,通过密钥协商机制完成设备鉴权,并确保消息来源于已认证的设备并且没有被其他无关设备篡改;

(2) 对于设备间的通信使用轻量级加密算法保护数据,隐藏消息载荷所携带的内容;

(3) 设置适当的阈值来保证消息传输时间和顺序;

(4) 从系统管理层次上抽出安全模块,组合使用 TCP (Transmission Control Protocol) SYN-

Cookie 和 Backlog 技术应对 SYN 洪泛攻击。

4 WAIC 网络节点设计

WAIC 网络使用 4.2~4.4 GHz 频段,基于该频段的射频芯片较少,且硬件平台需要考虑功耗、体积等因素,还需要兼容 WAIC 网络高速、低速应用需求,具有较高的设计难度。WAIC 网络硬件平台设计思路有两个:基于集成度较高的无线协议芯片或者基于软件无线电平台技术。

采用集成射频处理电路的 IEEE 802.15.4 或 IEEE 802.11a/g 协议芯片构建 WAIC 网络硬件平台,其需解决的问题是将 2.4 GHz 频率调整到 4.2 GHz 频率,可选的方案是在 2.4 GHz 集成芯片外接一个混频器电路,发射信号时,混频器将输出的 2.4 GHz 信号与 1.8 GHz 本振混频,通过高通滤波器过滤掉低频信号,得到 4.2 GHz 信号,在信号接收端,再将接收到的 4.2 GHz 信号与 1.8 GHz 本振混频,通过低通滤波器还原出 2.4 GHz 频段信号。该方法理论上可以达到信号无损转换,但具体实现效果有待考证,且 2.4 GHz 的频宽低于 WAIC 网络所需频宽。该方案的优点在于可以利用现有的芯片及协议,功耗小;缺点是射频部分设计复杂,低速和高速需要使用不同的芯片,不易作为 WAIC 网络技术解决方案。

软件无线电的硬件平台可根据需求对通信频段进行设置,具有很强的灵活性和开放性。以 AD9361+ZYNQ7000 设计的软件定义无线电平台具有高集成度、宽频段的特点,支持从 10 MHz 到 6 GHz 频段超宽频率范围,通过 GNU radio 编程,利用普通计算机对数据处理,具有非常强的可塑造型,可运行不同协议,该硬件平台支持高速、低速两种速率要求。其缺点在于需要对该平台进行改造,使其适用于嵌入式环境,同时需在该平台上开发 IEEE 802.15.4 协议以及 IEEE 802.11a/g 协议支持包,并移植到该平台上。基于无线电平台的无线节点硬件架构设计如图 5 所示,信号接口模块包括天线和巴伦,完成信号的接入和发出;AD9361 模块主要完成信号放大、A/D 和 D/A 转换、混频、滤波等处理;FPGA 模块与 AD9361 连接,实现 AD9361 工作频段 4.2~4.4 GHz 的设置,WAIC 网络协议以及必要的调试接口等;电源模块完成各模块电路的直流电源供电。

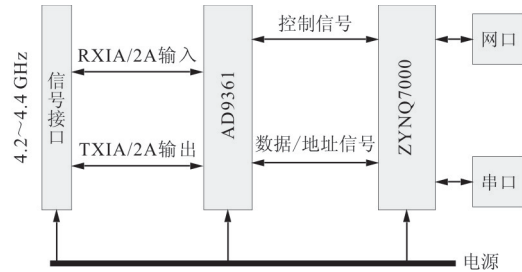


图 5 无线节点硬件架构

Fig. 5 Wireless node hardware architecture

综合 WAIC 网络需求及其特点,从工程实践角度来看,软件定义无线电射频前端+ FPGA (Field Programmable Gata Array) 的实现方式是当前评估最灵活最有效的设计方式。尤其是在目前未定义 WAIC 网络协议的条件下,软件定义无线电技术给物理层的设计带来了超高灵活性,以及 FPGA 的高性能、灵活性的特点可以作为 WAIC 网络协议实现的载体,满足 WAIC 网络不同的应用场景需求。

5 结束语

作为一个新兴的研究领域,无线航空电子内部通信(WAIC)网络具有巨大的潜力,可以降低飞机总重量及维护成本,提高飞机安全性,实现更具成本效益的飞行操作。本文从 WAIC 网络概述、研究现状、关键技术等方面介绍了 WAIC 网络,着重介绍了 WAIC 网络架构、时间同步、网络管理及网络安全等关键技术,给出基于软件无线电平台设计 WAIC 网络无线节点的技术方法。就 WAIC 网络的发展来说,已确定其通信频段为 4.2~4.4 GHz,但尚未形成标准协议,同时存在应用场景和技术问题亟待解决,下一步应重点研究高安全实时数据传输问题、WAIC 网络子网频谱资源划分管理问题、子网内消息分时调度传输问题以及节点硬件设计问题等。

WAIC 网络正在不断地发展完善,可靠性和安全性问题也会逐步得到解决,机内无线通信将会部分替代有线通信,用于机内传感器与处理机或处理机之间的数据传输,其技术将在下一代军用、民用飞行器中得到应用。

参考文献

- [1] FIELD S, ARNASON P, FURSE C. Smart wire technology for aircraft applications[C]// The 5th Joint NASA/FAA/DoD Conference Aging Aircraft. Orlando, FL:

- NASA, 2001: 1156-1161.
- [2] STONE T, ALENA R, BALDWIN J, et al. A viable COTS based wireless architecture for spacecraft avionics [C] // IEEE Conference on Aerospace. Big Sky, MT, USA; IEEE, 2012: 1-11.
- [3] Oroitz Elgezabal Gómez. Fly-by-wireless: benefits, risks and technical challenges[C] // Fly by Wireless Workshop (FBW), CANEUS. Orono, ME, USA; IEEE, 2010: 155-168.
- [4] Ramiro Sámano-Robles, Eduardo Tovar, João Cintra, et al. Wireless avionics intra-communications: current trends and design issues[C] // International Conference on Digital Information Management (ICDIM). Porto, Portugal; IEEE, 2016: 97-106.
- [5] International Telecommunications Union-Radio Communications Sector. Technical characteristics and spectrum requirements of wireless avionics intra-communications systems to support their safe operation; ITU-R M 2283-0[S]. Geneva, Switzerland; ITU-R, 2013.
- [6] PARK P, CHANG W. Performance comparison of industrial wireless networks for wireless avionics intra-communications[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(1): 116-119.
- [7] RAHARYA N, SURYANEGARA M. Compatibility analysis of wireless avionics intra communications (WAIC) to radio altimeter at 4 200~4 400 MHz[C] // 2014 IEEE ASIA Pacific Conference on Wireless and Mobile. Bali, Indonesia; IEEE, 2014: 392-401.
- [8] MEYERHOFF T, FAERBER H, SCHWARK U. Interference impact of wireless avionics intra-communication systems onto aeronautical radio altimeters[C] // 10th International ITG Conference on Systems, Communications and Coding. Hamburg, Germany; SCC/VDE, 2015: 33-39.
- [9] SURYANEGARA M, NASHIRUDIN A, RAHARYA N. The interference analysis between wireless avionics intra-communications (WAIC) an EESS systems at 22~23 GHz [C] // 2015 International Conference on Quality in Research (QiR). Lombok, Indonesia; IEEE, 2015: 397-402.
- [10] SURYANEGARA M, NASHIRUDIN A, RAHARYA N, et al. The compatibility model between the wireless avionics intra-communications (WAIC) and fixed services at 22~23 GHz[C] // 2015 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES). Bali, Indonesia; IEEE, 2015: 838-850.
- [11] ENGELBRECHT J, FUSS T, SCHWARK U, et al. Measurement of interference path loss between wireless avionics intra-communications system and aircraft systems at 4. 2~4. 4 GHz band[C] // 2014 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC). Loughborough, UK; IEEE, 2014: 335-363.
- [12] SURYANEGARA M, RAHARYA N. Modulation performance in wireless avionics intra communications (WAIC) [C] // 2014 The 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering. Semarang, Indonesia; IEEE, 2014: 597-604.
- [13] International Telecommunications Union-Radio Communications Sector. Compatibility analysis between wireless avionics intra-communication systems and systems in the existing services in the frequency band 4 200~4 400 MHz; ITU-R M 2319-0[S]. Geneva, Switzerland; ITU-R, 2014.
- [14] DAS S, DAS S S, CHAKRABARTI I. Hardware implementation of MIL-STD-1553 protocol over OFDMA-PHY based wireless high data rate avionics systems[C] // 2016 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). Bangalore, India; IEEE, 2016: 772-779.
- [15] 范翔. 民航飞机客舱无线网络规划与设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
FAN Xiang. Planning and design of wireless network for civil aircraft cabin[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- [16] 范祥辉, 史岩, 杨寒. 机载无线传感器网络技术研究[J]. 信息通信, 2016(11): 159-160.
FAN Xianghui, SHI Yan, YANG Han. Research on airborne wireless sensor network technology[J]. Information Communication, 2016(11): 159-160. (in Chinese)
- [17] 史岩, 朱佳, 范祥辉, 等. 基于 ARINC822 的机载无线网络安全架构设计[J]. 硅谷, 2014(12): 44-45, 48.
SHI Yan, ZHU Jia, FAN Xianghui, et al. Design of airborne wireless network security architecture based on ARINC822[J]. Silicon Valley, 2014(12): 44-45, 48. (in Chinese)
- [18] International Telecommunications Union-Radio Communications Sector. Characteristics of WAIC systems and bandwidth requirements to support their safe operation; ITU-R WP5B-AR[R]. Germany; ITU-R, 2012.
- [19] Ganeriwawal S, Kumar R, Srivastava M. Timing-sync protocol for sensor networks[C] // Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles, CA, USA; Sensor Systems, 2003: 138-149.
- [20] 钟稳霞. 基于 SBR 方法的机上无线信道分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
ZHONG Wenxia. Analysis of onboard wireless channel based on SBR method [D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)

作者简介:

范祥辉(1985—),男,博士研究生,高级工程师。主要研究方向:机载通信网络技术。

陈长胜(1983—),男,硕士,研究员。主要研究方向:机载通信网络技术。

史岩(1986—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:机载通信网络技术。

杨建茜(1974—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:机载通信网络技术。

(编辑:马文静)