

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.04.017

## L 波段数字航空通信系统研究

朱永文<sup>1</sup>, 喻兰辰晖<sup>2</sup>

(1. 空军研究院, 北京 100085; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 随着全球航空运输的发展, 空中交通管制与航空公司运控等航空业务对航空通信系统的数据传输速率、频谱利用率、航空通信网容量等性能提出了更高的要求。虽然现阶段基于甚高频的航空通信系统得到了迅速的发展, 但仍受限于标准体制、技术壁垒等因素, 难以满足持续增长的运行需求。L 波段数字航空通信(L-band digital aeronautical communication system, L-DACS)数据链技术作为新一代航空通信系统的预选方案, 是有效解决频谱资源饱和难题、满足高速率传输需求的有效途径。本文在总结 L-DACS 数据链技术发展现状的基础上, 阐述了该通信系统现阶段的技术标准, 分析了 L-DACS 发展所面临的挑战, 提出了对应的发展建议, 为面向航空宽带通信 L-DACS 的研究提供了参考与借鉴。

**关键词:** 航空移动通信; 空中交通服务; 未来通信设施; L 波段数字航空通信系统

**中图分类号:** V243.1; V355.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)04-0700-15

### Overview of L-band Digital Aeronautical Communication System

ZHU Yongwen<sup>1</sup>, YU Lanchenhui<sup>2</sup>

(1. Air Force Research Institute, Beijing 100085, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** With the development of global air transport, air traffic services, including air traffic control, aeronautical operational control, etc, have entailed higher performance of aviation communication systems. As one of the new generation aviation communication system schemes, L-band digital aeronautical communication system (L-DACS) could achieve a better data transmission rate, spectrum utilization efficiency and capacity, solving scarcity of spectrum resources. This paper summarizes L-DACS's state-of-the-art progresses and studies, specifically its technology evolution and standardization development. Then, a draft of layered system framework is introduced, covering network, datalink and physics levels. Finally, challenges that L-DACS faces and its corresponding developing proposals are given. This review provides a reference for the research of aviation broadband communication.

**Key words:** aeronautical mobile communication; air traffic service; future communication infrastructure; L-band digital aeronautical communication system

航空通信系统是航空运输系统的核心基础设施, 是确保航空运输安全高效运行的基本要素。根据国际民用航空组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)对地空通信业务量的统计, 2020 年全球范围内航空话音通信的业务量达

到 16.2 Merl(百万爱尔兰), 数据通信的业务量接近 577 000 Gb, 平均每架飞机的数据传输速率约为 10 Mb/s。随着全球航空运输的快速发展, 空中交通管制(Air traffic control, ATC)与航空公司运控(Aeronautical operational control, AOC)等空

收稿日期: 2021-11-15; 修订日期: 2022-04-30

通信作者: 朱永文, 男, 正高级工程师, E-mail: tianyiliang\_zyw@163.com。

引用格式: 朱永文, 喻兰辰晖. L 波段数字航空通信系统研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(4): 700-714. ZHU Yongwen, YU Lanchenhui. Overview of L-band digital aeronautical communication system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(4): 700-714.

中交通服务(Air traffic service,ATS)对航空通信能力提出了更高的要求。虽然现阶段基于窄带甚高频(Very high frequency,VHF)的航空通信系统已经得到了迅速发展和大规模应用,但仍无法适应航空通信业务大带宽、高可靠、高速率、全覆盖等日益增长的发展需求。因此,推动航空通信系统由窄带向宽带发展,大力推进新一代航空通信系统的技术研究与发展,已经是全球现代航空通信系统建设的必然选择,是全球航空业发展的统一共识<sup>[1-2]</sup>。

早在2002年,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)与欧洲航行安全组织(European Organization for the Safety of Air Navigation,EUROCONTROL)已经开始为下一代航空通信系统联合开展组织研究工作。2005年,ICAO航空通信专家组开始规划面向未来ATC的移动通信系统,同时美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration,FAA)和EURO-

CONTROL也联合发起了“未来通信研究计划”。根据民航地空宽带通信系统频率规划现状,建议未来宽带航空通信系统部署在L波段的航空无线电导航频段。2007年国际电信联盟(International Telecommunication Union,ITU)在世界无线电大会上,通过对航空宽带通信系统频率资源的部署决议:将航空移动通信系统(L-band digital aeronautical communications system,L-DACS)部署在L波段(890~1 164 MHz),以及将机场区域的宽带航空移动通信系统(Aeronautical mobile airport communications system,AeroMACS)<sup>[3-4]</sup>部署在C波段(5 091~5 150 MHz)。AeroMACS系统主要应用在机场场面区域,而L-DACS系统主要用于终端区、高空航路空域。这两项航空宽带技术均作为支撑未来四维航迹运行的重要基础<sup>[5]</sup>。如图1所示,依据通信对象可以将L-DACS数据链划分为空对地(Air to ground,A/G),空对空(Air to air,A/A)两种类型。

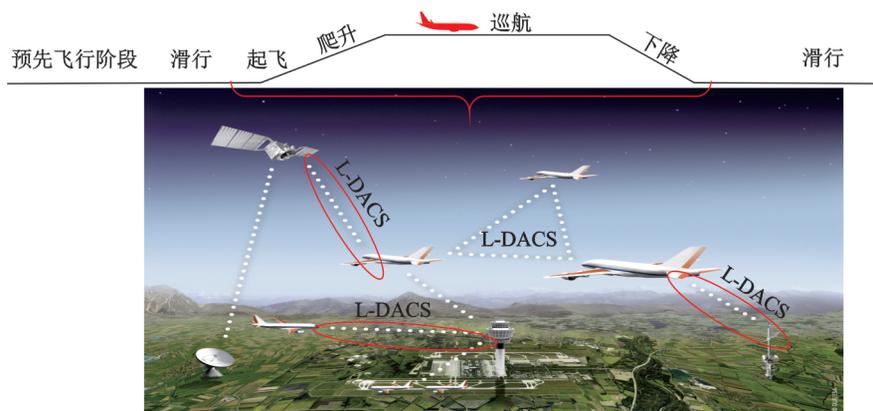


图1 L-DACS数据链示意图

Fig.1 L-DACS data link schematic diagram

随着航空运行服务能力需求的不断提升,ACARS和VDL Mode 2将无法适应未来ATC及AOC的运行需求<sup>[6]</sup>。ICAO所发布的航空组块升级计划(Aviation system block upgrades,ASBU)(图2)明确提出在组块2初始阶段,需要民用航空宽带数据链逐渐替代现有的窄带VHF数据链,以提升航空通信能力,满足日益增长的通信服务需求。

为促进中国民航空管系统的发展建设,中国民用航空管理局(Civil Aviation Administration of China,CAAC)在2016年发布了中国民航空管关于未来发展的中长期战略纲要——《中国民航空管现代化战略》(Civil Aviation ATM modernization

strategy,CAAMS),并于2020年3月颁布了CAAMS实施路线图<sup>[7]</sup>,明确指出未来通信导航监视朝着高性能、高精度和空天地一体化方向发展,航空通信呈现出飞行全阶段地空通信宽带化的趋势;在重点任务中提出了完善通信基础设施和通信服务的要求,将开展航路L-DACS宽带通信技术的试验与应用作为中远期目标之一。2021年4月CAAC印发了《中国民航新一代航空宽带通信技术路线图》<sup>[8]</sup>(图3),明确提出了未来开展基于L-DACS标准、实施、应用的探索和研究,需要推进5G L-DACS 2.0技术的空管业务应用示范,要求在2031年后能够实现航空宽带通信的全面应用,支撑新型基础设施建设。推进新一代宽带通信技术

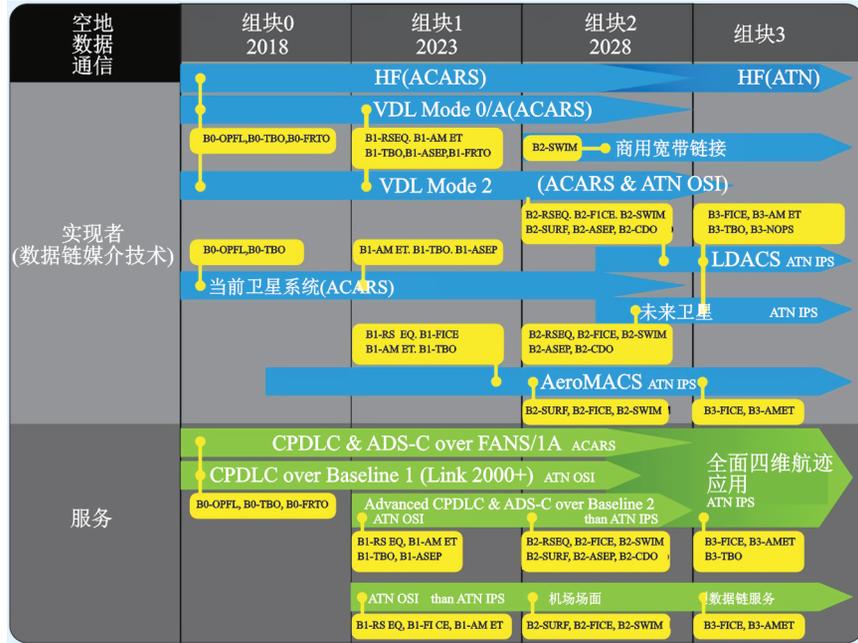


图2 2013—2028 ASBU通信组块路线图

Fig.2 2013—2028 technology roadmap of communication block in ASBU

在民航中的应用,将为民航行业高质量发展提供有力保障,有效促进智慧民航的新技术发挥作用。表

1重点列出了L-DACS系统相关的综述论文、学术论文、研究报告以及发展规划。

	近期(2025年前)		中期(2030年前)		远期(2031年后)
机场运行管理	<b>航站楼</b> • 5G运营商公网/专网推广应用 • NB-IOT推广应用	<b>飞行区</b> • AeroMACS1.0推广应用 • 5G AeroMACS 2.0示范应用 • 与运营商NB-IOT多网融合	<b>航站楼</b> • 5G/6G运营商公网/专网推广应用 • NB-IOT推广应用	<b>飞行区</b> • 5G AeroMACS 2.0示范应用 • 与运营商NB-IOT多网融合	航空宽带通信全面应用支撑智慧机场系统建设
航空公司	<b>机场</b> • 5G运营商公网/专网推广应用 • AeroMACS 1.0 • 5G AeroMACS 2.0	<b>航路</b> • LDACS 1.0 技术探索试验 • ATG推广应用	<b>机场</b> • 5G/6G运营商公网/专网应用 • 5G AeroMACS 2.0 • 多网融合	<b>航路</b> • LDACS 1.0 应用示范 • 5G LDACS 2.0 技术探索试验 • ATG应用	航空宽带通信全面应用支撑智慧航司建设
通用航空	<b>管制空域</b> • 机场 AeroMACS 1.0 • 5G AeroMACS2.0 • 航路 LDACS1.0试验	<b>非管制空域</b> • 5G运营商公网/专网推广应用 • 通信导航(北斗)一体化示范	<b>管制空域</b> • 机场 5G AeroMACS2.0 • 航路 5G LDACS 2.0 应用示范	<b>非管制空域</b> • 5G/6G运营商公网/专网推广 • 通信导航(北斗)一体化推广	航空宽带通信全面应用支撑通用航空运行服务
无人航空	<b>管制空域</b> • sUAS • 5G运营商公网/专网推广应用 • RPAS 5G C2应用示范	<b>非管制空域</b> • 5G运营商公网/专网推广应用	<b>管制空域</b> • sUAS • 5G/6G运营商公网/专网推广应用 • RPAS 5G C2应用推广	<b>非管制空域</b> • 5G/6G运营商公网/专网推广应用	航空宽带通信全面应用支撑无人航空运行服务
空管服务	<b>机场</b> • AeroMACS 1.0 推广应用 • 5G AeroMACS 2.0示范应用	<b>航路</b> • LDACS 1.0 技术探索试验	<b>机场</b> • 5G AeroMACS 2.0推广应用 • AeroMACS 1.0 /2.0融合应用	<b>航路</b> • LDACS 1.0 应用示范 • 5G LDACS 2.0 技术探索试验	航空宽带通信全面应用支撑智慧空管系统建设
民航监管	<b>全阶段</b> • 5G运营商公网/专网NB-IOT • AeroMACS1.0/2.0 • ATG推广应用 • LDACS1.0技术探索试验 • 运营商多网融合 • 航班监控安全评估		<b>全阶段</b> • 5G/6G运营商公网/专网NB-IOT • 5G AeroMACS 2.0 • ATG推广应用 • 5G LDACS 2.0 • 融合监管智能决策/监管应用推广		航空宽带通信全面应用支撑智慧监管领域建设

图3 中国民航新一代航空宽带通信系统应用实施路线图

Fig.3 Technology roadmap of China civil aviation new generation aviation broadband communication

表1 重要参考文献汇总

Table 1 Summerization of critical literature

参考文献	研究内容	文献类型
[1]	基于航空宽带通信系统所拥有的特点,分析了系统技术演进的关键难题,提出了基于空天地一体化网络思想的新一代航空宽带通信系统概念,并针对未来发展和应用提出了参考性意见。	综述论文
[2]	考虑无人机安全运行与ATM系统的交互,从ANSP的角度描述了可提供的典型UTM架构,分析确定了在民用空域安全容纳无人机的多项主要因素(包括通信数据链),讨论了无人机运行相关的ANSP未来方向和挑战。	综述论文
[3]	针对机场场面移动通信系统AeroMACS的研究和开发过程,描述了全球空地数据通信互操作性需求的背景,分析了AeroMACS潜在应用服务、频谱分配与干扰情况,总结了AeroMACS的国际标准化过程,并基于完成的原理样机提供了建议。	研究报告
[6]	围绕航空通信技术的发展前沿,重点针对空地通信技术L-DACS1系统展开论述,概述了系统物理层设计、DME干扰情况,进一步讨论了系统扩展导航与监视服务的技术可能性。	综述论文
[7]	该路线图是中国民航空管现代化战略实施层面的统筹性纲领文件,明确了中国民航空管未来发展和技术布局的指导思想、发展方向、技术路线等,其中通信导航监视服务是重点强调的一项关键服务能力。	发展规划
[8]	明确提出了以5G为代表的新一代航空宽带通信技术在中国民航应用的系统性实施路径,建设公用、专用相结合的民航5G网络,确立了在中期阶段实现5G L-DACS 2.0技术试验与应用示范的目标。	发展规划
[9]	考虑L-DACS与基于Link 16的JTIDS系统共用航空L频段的情况,通过仿真模拟进行了兼容性测试,量化分析了系统间干扰的影响程度,并以此给出了对JTIDS干扰影响最小化的L-DACS系统部署建议。	学术论文
[10]	分析了L-DACS与DME系统之间的干扰情况,提出并研究了缓解干扰影响的有效方法:脉冲消隐和擦除解码,仿真表明所提出方法可以有效缓解L-DACS受到的干扰影响。	学术论文
[11]	针对L-DACS系统,提出一种联合正交变换与信号交织的OFDM传输方法:利用DME脉冲干扰信号在频域呈现为强相关高斯脉冲的特性,通信号交织器与解交织器将强相关脉冲转换为非相关随机脉冲,然后使用期望最大化算法重构脉冲干扰,最后在频域消除非相关随机脉冲干扰。	学术论文
[12]	详细介绍了L-DACS原型系统的功能范围、物理层协议与服务、地面端收发机和机载端收发机的性能要求与规范。	研究报告
[13]	介绍了德宇航在L-DACS研究项目MICONAV中所开展的飞行试验,试验中机载端接收机不仅接收通信信息,也利用其他地面站信号以多点定位方式进行导航,验证了L-DACS在通信和导航方面的适用性。	学术论文
[14]	ICAO所发布的L-DACS白皮书,进行了L-DACS系统概述,分析了航空利益相关方的运行需求,依据可行的商业案例,指出了未来L-DACS系统推广实施的可行性。	研究报告
[15]	基于L-DACS原型系统概述了L-DACS的基本功能、通信模式、地面端部署与性能要求、机载端部署与性能要求、系统协议与交互接口以及物理层、数据链路层和子网络层的详细规范。	研究报告

## 1 L-DACS发展现状

未来空中交通管制的运行概念是以航空器与ATC地面系统的可靠数据通信为前提,向飞行员与管制员提供航班意图信息、运行态势信息以及实时管制指令信息等。L-DACS不仅可以在安全通信的基础上保证通信服务质量,而且可以满足AOC对大带宽、高吞吐量的需求,也能够实现大数据量信息的可靠传输,进而有助于实现基于航迹运行、数字化管制、高清监视信息实时共享等运行服务。对于ATC,L-DACS是将航空器集成到广域信息管理平台(System wide information management, SWIM)先决条件,有利于促进管制信息的高效共享;对于航空公司,可以提升航空器机载运行数据、发动机运维数据的传输效率,能够高效地支撑机队管理方式,减少航空器的周转时间,提高航司的经济效应。

### 1.1 L-DACS系统技术演进

由于使用VHF通信信道的航空数据链系统存在带宽受限的问题,国际将航空宽带通信系统的技

术发展转向了L-DACS的研究。最初的工作是集中在对VHF数据链波形的研究上,期望通过小幅度变更的方式改进已经部署的数据通信系统,以达到提升带宽,增强通信能力的目的。此项技术被称作宽带甚高频数据链(Broadband VHF, B-VHF)<sup>[16]</sup>然而经过一系列实验验证之后发现:维持甚高频频段的使用,部署应用B-VHF通信系统具有明显的约束性。因此,在由FAA与EUROCONTROL联合实施的行动计划AP17中,给出了L波段是最适合支撑未来航空通信运行需求波段的结论,在此基础上L-DACS数据链技术的发展开始持续推进。由于目前的技术研究、试验验证与标准制定均针对L-DACS A/G通信发展,L-DCAS A/A尚处于初步探索阶段,后文L-DACS均代表L-DACS A/G系统。

L-DACS系统分为多载波L-DACS1与单载波L-DACS2两个完全独立的候选版本方案<sup>[17]</sup>。从两个地空数据链方案的发展脉络(图4)可以看出,它们均是由现有的通信系统演化而来,但各自

具备不同的技术特点与实施方式。L-DACS1系统技术是基于B-VHF技术,在AP17后期阶段,将前期研究关于可扩展的B-VHF技术进行调整,迁移至L波段的960~1 164 MHz之间的频段范围进行研究。L-DACS1系统采用基于正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)的多载波调制传输,双工方式采用频分双工(Frequency division duplexing, FDD),前向链路(Forward link, FL)和反向链路(Reverse link, RL)传输带宽均为500 kHz。基于所采用的自适应编码调制技术(Adaptive modulation and coding, AMC),可以支持QPSK、16QAM、64QAM的调制方式,进而实现了FL传输速率为303~1 373 kb/s、RL传输速率为220~1 038 kb/s。而L-DACS2则是以全球移动通信(Global system for mobile communica-

tions, GSM)系统为基础,采用单载波调制传输,调制方式为高斯最小频移键控,双工方式为时分双工(Time division duplexing, TDD),在200 kHz传输带宽条件下传输速率为270.833 kb/s。相较而言,L-DACS1比L-DACS2具有更高的频谱效率,具备更强的干扰抵抗能力。因为L-DACS1采用了AMC技术,能够根据信道环境中噪声和干扰模式,依据实际的信道状态分别对各子载波采用不同的调制模式以适应通信环境,而L-DACS2则难以适应高动态的信道环境<sup>[18]</sup>;L-DACS1的FDD特性使其更适合语音和数据传输,而L-DACS2的TDD特性则不适合语音传输,难以有效支持数字化管制的通信需求;L-DACS1帧格式的设计中,循环前缀和子载波间隔需要进一步分析,以适应远距离和高速度的航空器航行状态下的通信需求。

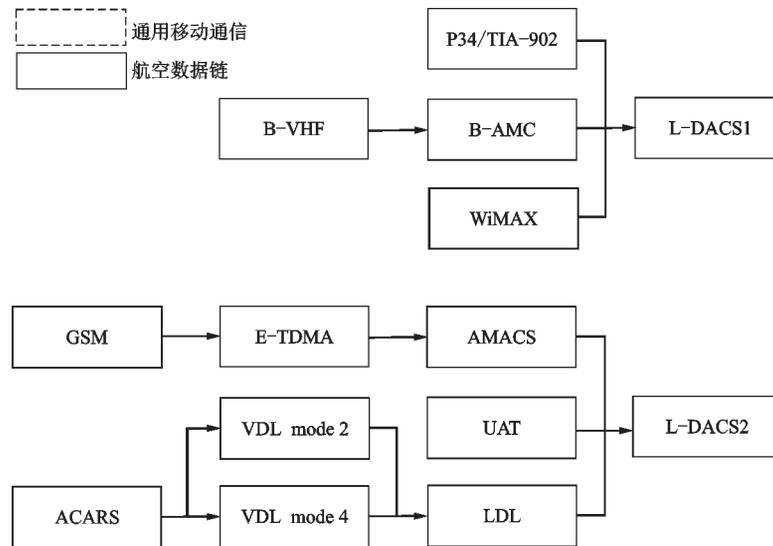


图4 L频段地空数据链发展脉络

Fig.4 Development process of L-band air-ground data link

在世界无线电大会上虽然确定了将L波段的960~1 164 MHz频段分配给新一代航空通信系统使用,但该波段已经由测距仪(Distance measuring equipment, DME),二次监视雷达(Secondary surveillance radar, SSR),多功能信息分发系统(Multi-function information distribution system, MIDS),联合战术信息分发系统(Joint tactical information distribution system, JTIDS)等航空系统占用,如图5所示。GSM系统与L波段的低频段紧邻<sup>[19]</sup>;DME系统占用960~1 213 MHz频段,无论工作在X模式或Y模式,单DME设备运行带宽为1 MHz,载频间隔为1 MHz。JTIDS部署在969~1 206 MHz频段,采用跳频技术分布在51个频道内<sup>[9]</sup>。对于L-DACS系统,严格要求不可与上述系统产生相互的干扰,在不变更频谱资源分配方案的情况下仅能

使用L波段的剩余频谱资源进行部署应用<sup>[20]</sup>。

因此,在频谱资源饱和的前提下安全高效地部署L-DACS系统是航空宽带通信系统发展的重要难题。L-DACS1提出了以频率嵌入的方式部署在DME系统频段之间的技术方案,并且为实现频谱的有效利用,在FL与RL之间设定了确定的频率间隔。L-DACS1与DME的工作频带与系统带宽接近,并且正常运行状态下DME信号传输功率远高于L-DACS1信号。研究表明,对于任意功率的DME干扰信号,单个L-DACS1符号受到DME脉冲信号干扰的概率接近90%,甚至在最严重情况下DME信号能够产生23.5 dBm干扰影响。因此,解决与DME系统之间严重干扰的难题是L-DACS1系统的关键性技术需求。在L-DACS1系统的官方定义建议书中提出了采用擦失译码、过

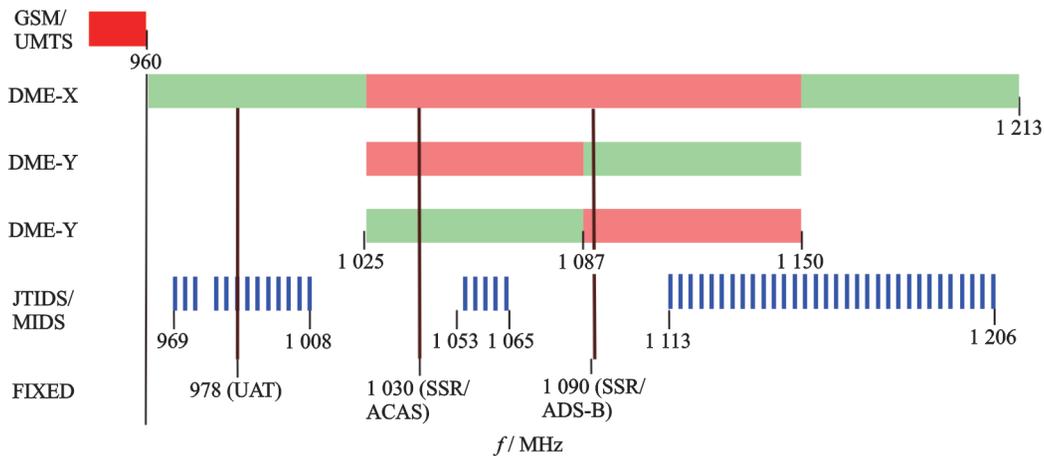


图5 L波段资源使用情况

Fig.5 L-band frequency resource utilization

采样和脉冲消隐3项技术来抑制DME干扰<sup>[10-11,21]</sup>,建议通过过采样与其余2种技术结合,以4倍采样频率消除残带外干扰。

进一步的试验研究表明,L-DACS1系统不仅具有抗多径能力强、传输容量大,拓展性灵活的明显优点,也可以通过合理配置OFDM系统的子载波以及频带划分方式带来高频谱效率的优势。L-DACS1系统以内嵌方式部署在L波段内,能够在不同通信条件下调整可用信道资源,以低干扰的方式与原L波段的其他航空系统共存,且不需要对现行L波段的频率划分进行重新分配,而L-DACS2系统在这方面存在明显的技术限制<sup>[22]</sup>。

L-DACS1系统获得航空领域的广泛关注,已经成为国际民航未来宽带航空移动通信的重点研究方向。经过大量的实验室环境试验与飞行试验验证,L-DACS1已经从两项备选方案中脱颖而出,于2015年确定成为航路运行阶段航空宽带通信技术发展的主要系统<sup>[12]</sup>。后文L-DACS系统均代表L-DACS1系统。截至目前,L-DACS通信系统的能力已经逐步趋于成熟,现阶段仍主要以技术的飞行试验验证为主<sup>[13,23]</sup>,但由于无标准规范的原因,没有进入大规模部署应用的阶段。

## 1.2 L-DACS标准制定进展

目前阶段,国际组织尚未发布L-DACS相关的标准与法规。通常来讲,作为部署、应用与实施L-DACS系统的先决条件,需要由不同的国际标准化组织制定相关的技术标准,涵盖频谱资源分配、无线电信号特性、航电设备性能以及基础设施运行要求等。基于已经部署使用的通信系统,ICAO已经发布了L-DACS系统的白皮书<sup>[14]</sup>,各个国际组织已经开始推进L-DACS的标准化进程<sup>[24]</sup>:

(1)ICAO的通信小组,在2018年的项目组“地面数据链路”中草拟了L-DACS的运行标准,并于

2020年底制定了初步的技术指导手册。目前于2021年完成了标准与建议措施(Standards and Recommended Practices, SARPs)文件,计划最终定稿于2026年并完成标准发布。

(2)欧洲民用航空设备组织(The European Organization for Civil Aviation Equipment, EUROCAE)围绕L-DACS技术的功能、设备与系统等重点内容,计划发布涵盖L-DACS系统设备功能的最低运行性能标准(Minimum operational performance standards, MOPS)以及覆盖L-DACS系统运行性能的航空系统性能最低规范(Minimum aviation system performance standards, MASPS)。目前该组织已经与航空无线电技术委员会(Radio technical commission for aeronautics, RTCA)联合完成了ATN B2服务的性能与描述文件,正在进行制定面向ATN B3的描述文件。现阶段EUROCAE联合RTCA已经启动了针对L-DACS标准化的项目,并确立了持续推进标准化制订工作的小组。然而需要明确的一点是:EUROCAE针对L-DACS技术的标准制定,需要基于ICAO所开展的L-DACS标准化工作,因此EUROCAE标准化进程将整体稍晚于ICAO的工作进展情况。

(3)航空电子工程委员会(Airlines Electronic Engineering Committee, AECC)计划开展ARINC航电标准的研究工作,包含L-DACS航电设备的架构组成、基本功能、适航能力等方面的内容,该标准的制定有利于促进L-DACS机载航电设备在航空器上集成应用的进程。然而就目前数据链技术的发展阶段而言,进行L-DACS航电设备研发生产标准的制定尚早,因此国际建议需要由ICAO与EUROCAE的L-DACS标准制定工作取得一定进展,待所拟定标准修订程度已经处于较为成熟的阶段之后,再由AECC进行ARINC航电标准的制定

工作。

## 2 L-DACS系统技术

通过螺旋上升的演进方式推进L-DACS的技术发展,可以有效地应用L-DACS大容量带宽的优势以补充现行部署应用的通信系统。从长远的角度来看,当L-DACS的地面基础设施部署完备之后,可以实现VDL模式2向L-DACS的过渡,最终可以将VHF的频谱资源释放,用于其他航空应用。目前L-DACS系统的技术标准是由EUROCONTROL进行主导,联合荷兰航空航天中心与德国宇航中心等机构进行技术方案设计、仿真实验验证与飞行试验验证后所确定的<sup>[15]</sup>。下文将介绍L-DACS基于OSI体系的网络层、链路层与物理层。

### 2.1 L-DACS系统网络层

L-DACS接入服务网络(L-DACS access service network, LDAN)定义为向L-DACS系统的用户(即航空器)提供无线电接入所需功能的完整网络<sup>[25]</sup>。LDAN需要具备的功能包括:(1)建立并保持L-DACS机载端通信电台和L-DACS地面站(Ground station, GS)之间的通信连接;(2)将航空器的认证、授权与记账(Authentication, authorization, accounting, AAA)消息传递至航空电信网络的地面管制终端,进而向航空器提供AAA服务;(3)航空器能够在ATN中进行发现和选择,实现首选网络服务提供方(即IP地址分配)的决策,以及建立网络层连通性的中继功能;(4)进行频谱资源的管理与配置。除了上述必须的功能外,对于动态变化的移动环境,地面控制站(Ground control station, GCS)应支持LDAN移动性、位置注册登记和与AAA服务器接口等基本功能。

对于LDAN网络的构成元素,包含一个或多个L-DACS地面站与一个地面控制站。不仅单个的LDAN可以由多个通信服务提供方进行数据的信息共享,也可以通过接入网间的连接实现多个LDAN间的数据交互。

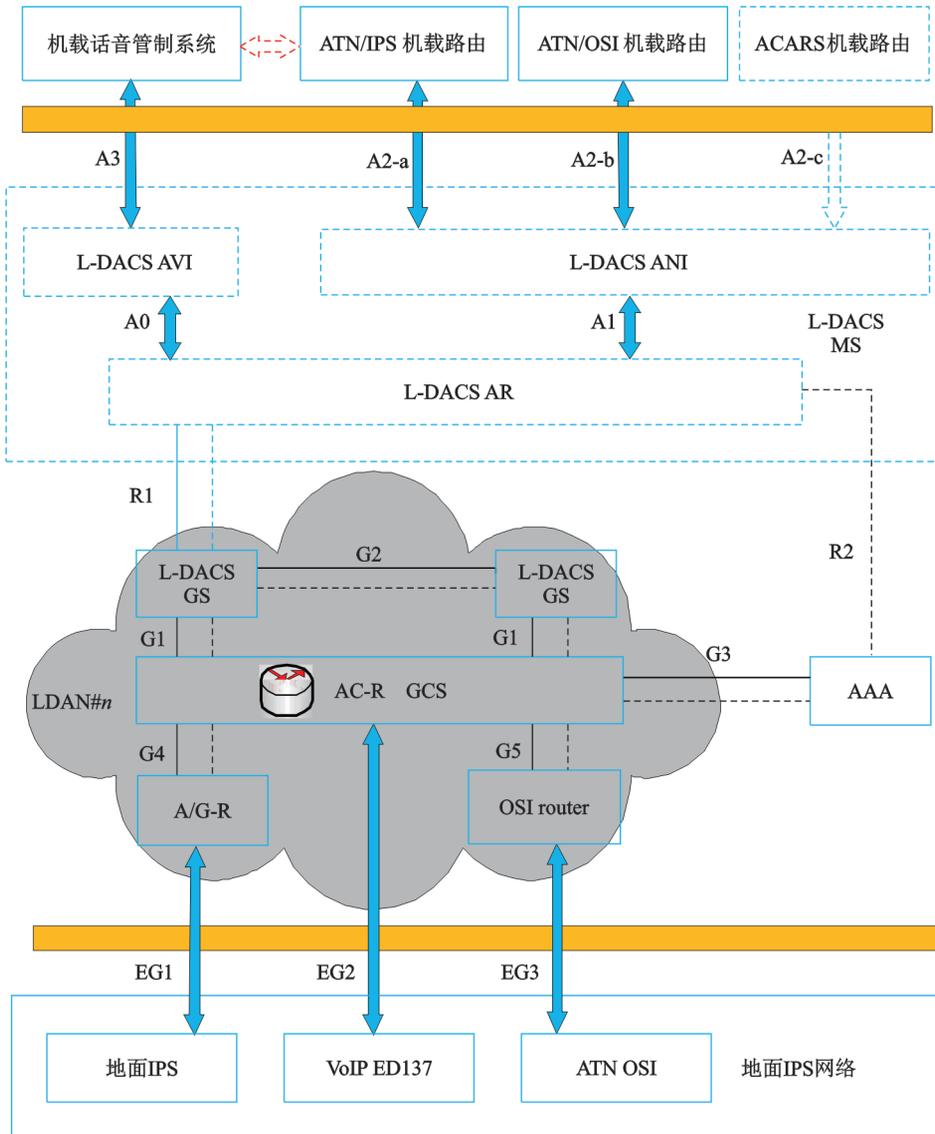
图6为L-DACS接入网络架构的示意图。可以看出,L-DACS地面网络参考模型包括:地面站、GCS、AAA服务器、网络接入和A/G路由。对于地面部分,参考点G1表示为由地面站与地面控制站之间的控制协议与用户平面协议集的综合信息,包含LDAN内的数据路由信息,数据路径建立、修订与释放的控制信息以及与航空器运行情况匹配的控制协议;参考点G2则表示为一系列控制平面协议,可由LDAN地面站作为源点发送,也可由地

面站进行接收,该类协议由地面站间进行协调;参考点G3表示为有线的网络连接,主要为AAA服务器与GCS之间进行航空器身份AAA服务管理相关的协议。对于A/G数据链路部分,参考点R1由航空器和地面站之间的通信协议和管制程序的相关指令构成,是L-DACS空中接口(物理层与介质访问层)的主要部分。而L-DACS机载参考模型包含机载无线电(Airborne radio, AR),机载网络接口(Airborne network interface, ANI)与机载语音接口3个模块。参考点A1表示为ANI和AR之间进行交互的协议消息;参考点A2-a、A2-b、A2-c分别表示为管理机载ATN-IPS通信路由、管理机载ATN-OSI通信路由、管理机载ACARS通信路由的控制协议与用户协议;参考点A3由一组控制协议和用户协议组成,用于管理机载语音管理系统的控制协议与用户协议。

### 2.2 L-DACS系统链路层

支持空地通信的L-DACS是一个基于蜂窝网络的点对多点通信系统<sup>[26]</sup>,并且系统具有星型拓扑结构,其中机载端通信电台通过全双工的方式连接至地面站。L-DACS协议栈明确定义了基于OSI体系的两层结构,为物理层和数据链路层(包括两个子层),如图7所示。L-DACS系统的物理层内容详见2.3节。

L-DACS数据链路层提供了数据传输的必要协议,以保证多用户并发和可靠数据传输的通信需求<sup>[27]</sup>。L-DACS的数据链路层依照结构又分为两个子层:介质访问子层(Medium access control, MAC)和逻辑链接控制子层(Logical link control, LLC)。LLC子层由数据链路服务(Data link services, DLS)与语音接口(Voice interface, VI)两部分组成。该子层主要负责通信链路的管理,并向上层提供不同类别的服务。其中DLS在点对点RL或者点对多点FL上能够提供用户数据的通信服务,VI为虚拟语音电路提供支持。但是需要区分,VI只提供语音数据的传输和接收功能,而语音链路的创建与选择则是由LME来负责。MAC子层与LLC子层的跨层管理由层间管理实体(Layer management entity, LME)提供,该模块主要实现资源的集中管理,提供传输资源分配、移动性管理与通信链路维护等功能,能够在考虑通信信道占用的约束条件下,向FL与RL提供通信资源的分配,能够在功率、频率与时间等多个维度提供动态链路的维护服务,并支持AMC技术的实施。MAC子层仅包含MAC运行实体,负责管理LLC实体对物理层资源的访问,向LLC子层提供了在逻辑通路上



- |                          |                                     |
|--------------------------|-------------------------------------|
| L-DACS AR L-DACS 机载雷达    | G1 地面站和控制站的数据和控制接口                  |
| L-DACS ANI L-DACS 机载网络接口 | G2 协同机载基站移动的地面站接口                   |
| L-DACS GS L-DACS 地面站     | G3 AAA服务和地面控制站的认证接口                 |
| GCS L-DACS 地面站控制站        | G4 地面控制站和空地网络的接口                    |
| L-DAN L-DACS 接入网         | G5 地面控制站和OSI路由的接口                   |
| R1 L-DACS 空地接口           | EG1 L-DACS和地面IPS网络之间管理空地数据通信扩展接口    |
| R2 L-DACS AAA 服务器        | EG2 L-DACS和地面IPS网络之间管理空地VoIP通信的扩展接口 |
| A1 L-DACS RR             |                                     |
| A2-x 扩展L-DACS移动子网接口      |                                     |

图 6 L-DACS 系统参考架构

Fig.6 L-DACS system framework

传输用户和控制数据的能力;子网相关汇聚协议 (Sub network dependent convergence protocol, SNDCP)向系统提供了到更高层次的接口,使得 L-DACS 能够成为航空电信网 (Aeronautical telecommunication network, ATN) 的一个子网,强化 ATN 网络的服务能力。SNDCP 不仅能为网络层提供 L-DACS 接口,为不同网络协议 (ATN/IPS 和 ATN/OSI) 的网络层协议数据单元提供透传所需的适配服务,也能够向无线信道提供安全通信所

需的压缩加密服务。

对于应用 L-DACS 系统进行通信的航空器,必须在 GCS 进行登入注册,以获得由 GCS 分配的静态专用控制信道,用于航空器与地面站之间进行控制数据的传输;而地面站能够通过当前航空器运行需求,对登入的航空器动态地调整用于用户数据信道资源的分配。除此之外,所有航空器与 GCS 之间的通信流程 (包括用户数据传输的请求过程、传输资源分配过程以及重传计时管理等)是由通信

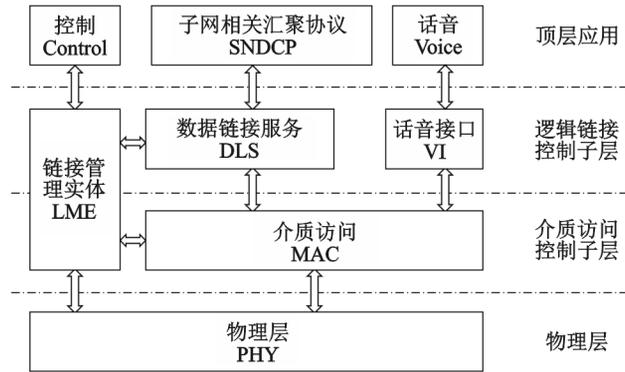


图 7 L-DACS 协议栈

Fig.7 L-DACS protocol stack

协议完全确定的,并且是由地面站进行管理。在通信系统负载一定的前提下,蜂窝小区内 L-DACS 系统的性能取决于小区内地面站所服务的航空器数目,并且通信性能呈现出随着所服务航空器数目的增加而线性下降的趋势。

L-DACS 地面站和航空器之间的数据交互的逻辑信道结构如图 8 所示,说明了逻辑信道与 LLC 功能模块之间的关系。具体而言,用户数据的双向

交互是由 DLS 在用户层的逻辑数据通道 (Dedicated channel, DCH) 进行;逻辑专用控制信道 (Dedicated control channel, DCCH) 是用于从 RL 控制层的数据传输,而通用控制信道 (Common control channel, CCCH) 则是用于 FL 的控制信息传输;随机访问信道 (Random access channel, RACH) 和广播控制信道 (Broadcast control channel, BCCH) 用于蜂窝小区的进入、退出与切换。

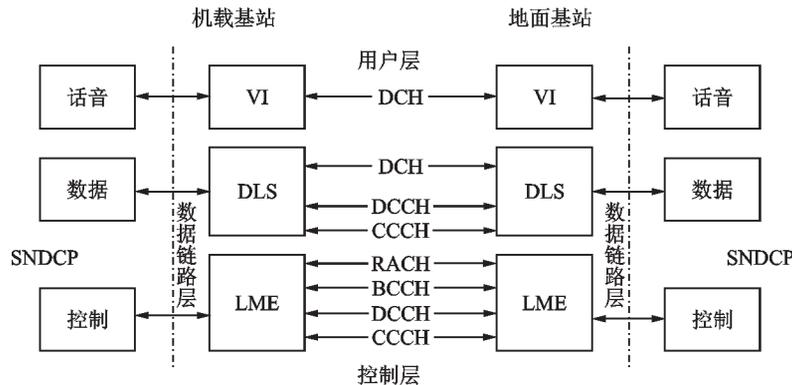


图 8 L-DACS 逻辑信道结构

Fig.8 L-DACS logical channels

### 2.3 L-DACS 系统物理层

L-DACS 的物理层提供了数据传输物理链路的具体信息,同时支持多架航空器与地面站的双向链接<sup>[28]</sup>。其中,FL 与 RL 采用 FDD 进行分隔;而在 RL 方向上,应用时分多址 (Time division multiple access, TDMA) 和正交频分多址 (Orthogonal frequency division multiple access, OFDMA) 技术分别对不同的航空器从时间与空间两个维度上进行分隔。在 FL 中,地面站发送连续传输的 OFDM 符号流;而在 RL 中,航空器基于地面站所分配的资源与所定义的具体协议,发送不连续的突发脉冲,数据帧和控制帧被划分为称作“tile”的碎片,使得数据链路层的 MAC 层的资源分配得到优化并且能够根据干扰条件减小带宽和占空比<sup>[29]</sup>。航空器

仅在蜂窝单元覆盖范围内通过 RL 进行接入数据的自主传输,而 RL 的其他传输数据 (控制信令、用户数据等) 均有地面站进行管理与控制。

L-DACS 系统物理层是基于 OFDM 的调制方式,工作频段为航空 L 波段的 960~1 164 MHz 频段。以信道利用率和频谱使用率最大化为目标, L-DACS 系统支持 RL 和 FL 数据的同时传输。具体系统物理层参数信息如表 2 所示,由于保护带宽的存在,总带宽为 625 kHz (总带宽 = 子载波间隔 × FFT 长度),而包含中心频率的有效传输带宽为 498.05 kHz,这一数值表示 FL 和 RL 上被占用的射频信道带宽<sup>[30]</sup>。

为了尽可能降低与 DME 之间的相互干扰,通过在 DME 相邻的信道之间插入带宽为 1 MHz 的

表 2 物理层参数信息

Table 2 L-DACS physical layer parameters

参数名称	数值
有效传输带宽/kHz	498.05
子载波间隔/Hz	9.765 625
调制方式	QPSK
	16QAM
	64QAM
信道编码	外码:RS编码
	内码:卷积码
采样间隔/ $\mu$ s	1.6
载波频率/GHz	1
FFT长度/ $\mu$ s	64
采样间隔/ $\mu$ s	1.6
有效符号长度/ $\mu$ s	102.4
循环前缀比例/ $\mu$ s	11/64
循环前缀长度/ $\mu$ s	17.6
OFDM符号长度/ $\mu$ s	120
保护间隔长度/ $\mu$ s	4.8
加窗时长	12.8
有效子载波个数	50
保护子载波个数	7(左侧)
	6(右侧)

L-DACS 信道,采用这种内嵌的方式,使得 L-DACS 能够在不对频率资源分配作变更的情况下部署在 L 波段<sup>[31]</sup>。尽管在 L-DACS 研究的早期阶段,提出过以非内嵌且不影响其他通信导航系统性能的方式,但考虑到频谱资源短缺这一显著问

题,选择高频谱利用率的内嵌部署方式是 L-DACS 系统最终所采用的方式。

图 9 显示了 L-DACS 前向链路 OFDM 符号的频域结构;图 10,则显示了反向链路 OFDM 符号的频域结构,其中低频部分和高频部分表示为分配给两个不同的用户。

图 11 表示的是 L-DACS 的超帧组成,超帧是 L-DACS 最基本的帧结构,时间长度为 240 ms。FL 的超帧由 1 个随机接入帧(Random access, RA)和 4 个多帧(Multi-frame, MF)组成。RA 帧主要用于航空移动节点在进入一个新的地面基站时发起接入,而多帧则用于接入地面基站的航空移动节点向地面基站发送控制信令和数据。一个多帧由专用控制帧(Dedicated control, DC)和数据(Data)帧组成,其中 DC 帧用于航空移动节点向地面基站发送所有的控制信令,而 Data 帧用于传输有效数据。RL 的超帧由 1 个广播控制帧(Broadcast control, BC)和 4 个多帧组成。BC 帧用于地面基站向当前基站范围内的航空移动节点广播有关该基站的基本信息,供航空移动节点根据该信息判断接入基站情况并即使做出调整。多帧与 RL 类似,由一个通用控制帧(Common control, CC)和 Data 帧组成,其中 CC 帧用于地面基站向接入基站的航空移动节点发送控制信息,Data 帧用于 FL 的数据传输。

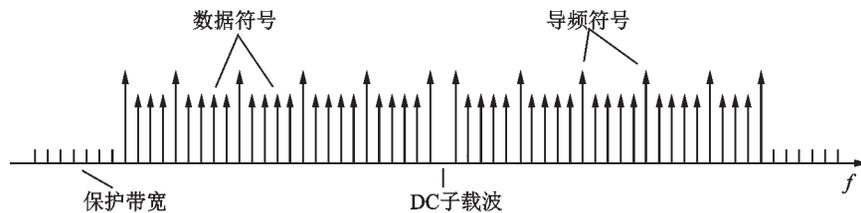


图 9 L-DACS 前向链路符号频域结构

Fig.9 Frequency domain structure of L-DACS forward link symbol

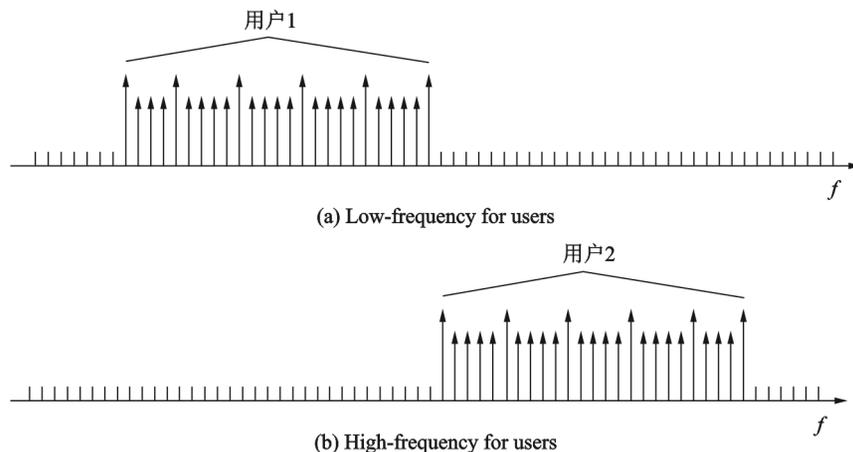


图 10 L-DACS 反向链路符号频域结构(高频部分)

Fig.10 Frequency domain structure of L-DACS reverse link symbol

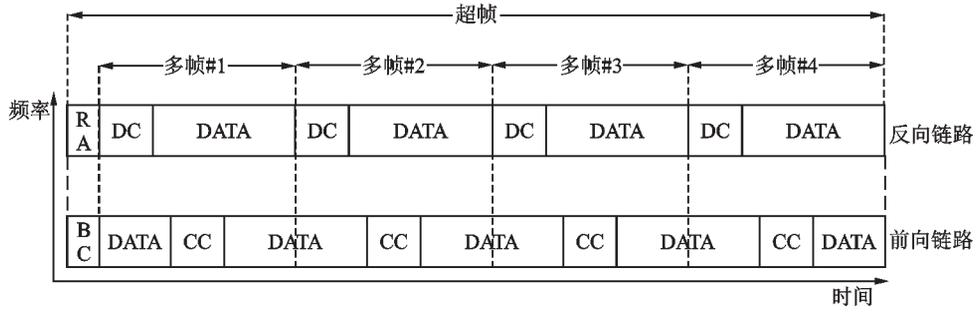


图 11 L-DACS1 帧结构

Fig.11 L-DACS frame structure in time domain

L-DACS系统的单个OFDM符号由64个子载波组成。如图12所示,为系统RL的帧结构,其中OFDM符号的类型包括:(1)无传输数据的空符号(Null symbol):如未经过调制的保护带宽中的子载波和中心子载波;(2)用于传输有效数据信息的数据符号(Data symbol);(3)用于信道估计的导频符号(Pilot symbol);(4)用于实现信号同步的同步

符号(Sync symbol);(5)用于抑制峰均比的PAPR符号(PAPR reduction symbol);(6)用于接收机进行自动增益控制的前导符号(AGC Preamble);而在RL的频域被划分为两个碎片,并分配给不同的航空器用户。每个频率碎片各自分别占用一半的连续子载波,这样使得一次OFDMA突发脉冲的有效带宽可以传输两个用户的数据。

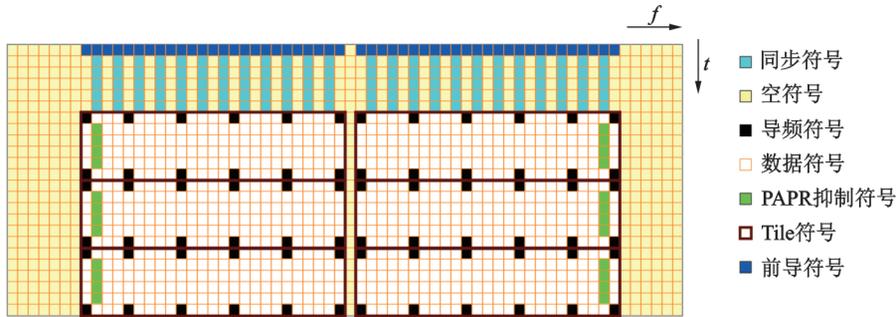


图 12 L-DACS 系统RL 帧结构

Fig.12 L-DACS reverse link framework structure

通过对频域的OFDM符号做傅里叶变换可以得到OFDM符号的时域波形图,图13显示了OFDM符号的时域结构。L-DACS的FL和RL有着相同的时域结构。信号时长表征为有用符号的持续时间。从图13中可以看到,最后一部分有用符号时间的符号作为循环前缀被拷贝到该有用符号周期的最前端,并且循环前缀中的一小部分又作为窗函数,而剩余部分用于容忍符号时间的同步错

误以及抵消符号间干扰的产生。除此之外,和窗函数同等时长的循环后缀被加在了该有用符号时间的末尾,并与下一个有用符号时间的循环前缀重叠,这样在时域上连续的OFDM符号就串联起来了。在RL中不同的是,每个航空器用户创建自己的OFDM时域符号,而由于每两个航空器用户共用一个OFDMA突发脉冲,地面站接收机收到的是两个在时域上重合的OFDM信号。此时需要通

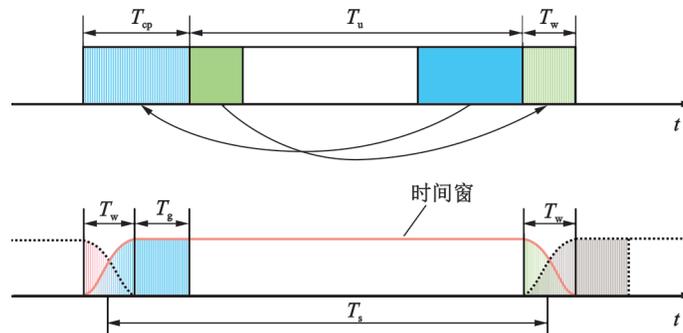


图 13 L-DACS 前向链路符号时域结构

Fig.13 Time domain structure of L-DACS forward link symbol

过利用这两个信号在时域和频域上的同步信息,以及功率差别将二者加以区分。在时间维度上的符号碎片能够被不同的航空器用户所使用,可以使得L-DACS系统在RL中传输来自不同航空器用户的数据信息。

### 3 L-DACS技术面临的挑战及发展建议

从国际发展现状来看,新一代航空通信系统从窄带向宽带的技术演进,已经是必然的发展趋势。然而为了实现这一远期发展目标,仍有许多重点问题与技术挑战待进一步解决。

#### 3.1 面临的挑战

(1)频谱资源受限的高速通信。虽然L-DACS系统相较于VHF数据链的能力有所提升,但随着机载飞行数据实时下传、航路运行态势实时监视、机间态势共享等航空业务运行数据量的大幅度提升,对航空通信能力提出了更高的要求。由于ITU对航空通信系统所分配的频谱资源被局限在L波段,并且现阶段所采用的OFDM技术依然存在频谱资源未高效利用的问题<sup>[32]</sup>。因此如何在有限带宽的条件下,实现高速率大容量的数据传输是L-DACS系统需要进一步解决的技术瓶颈。

(2)低延迟广覆盖的高效通信。作为下一代航空通信系统的目标之一,L-DACS不仅需要为航空器提供广域覆盖能力,也需要具备面向多类型航空器提供服务的能力,能够满足不同空域、不同场景、不同业务条件下的通信需求。与此同时,由于基于四维航迹运行概念的引入也要求航空器具备定时到达能力,航路或进近阶段所需到达时间的误差为秒级,需要管制系统响应延迟处于毫秒级,数字化管制指令的正确传输也对实时性提出了更高的要求<sup>[33]</sup>。因此如何向航空器提供低延迟的高效通信,实现通信范围的广域覆盖是L-DACS发展所面临的重要技术挑战。

(3)高动态复杂环境的可靠通信。航空通信系统需要同时支持ATC、AOC与AAC的服务,因此对其运行状态的可靠性与安全性有着极其严苛的要求。航空器运行阶段气象态势动态变化,雷暴天气对电磁环境干扰显著;航空器巡航阶段时速接近1 000 km/h,多普勒扩展效应明显,虽然现阶段L-DACS A/G能够解决1 kHz的多普勒频偏问题,但是对于L-DACS A/A系统高频偏移仍是需要解

决的技术难点<sup>[34]</sup>;此外当航空器处于起降运行阶段时,由于在有限空域范围内存在密集的通信、导航、监视等功能的无线电设备<sup>[35]</sup>,L-DACS系统存在着同信道干扰、带外干扰、邻接信道干扰等问题<sup>[36]</sup>。因此,如何在高动态的复杂环境条件下,实现L-DACS系的高可靠安全通信是另一项需要解决的难题。

#### 3.2 发展建议

(1)持续开展频谱资源高效利用的技术研究,进一步提高频谱资源受限约束条件下L-DACS系统的高速传输能力。基于频谱感知技术与调制识别技术的认知无线电,可以显著的提高频谱利用率;以大规模天线多入多出技术<sup>[37]</sup>、非正交多址接入技术以及Polar信道编码等新兴技术为代表的5G空口技术<sup>[38]</sup>,能够有效地解决频谱资源受限的问题。与此同时,无线电传输环境复杂多变,传统的静态频谱分配与接入方案难以满足频谱高效利用的需求,需要开展频谱资源动态分配的实时优化技术,以实现L-DACS系统支持大规模航空器运行的接入需求。

(2)进一步推进基于L-DACS系统子网的网络架构与组网机制的技术研究,可靠融入ATN网络,以支撑低延迟广覆盖的高效通信能力,进而实现全球区域航空器的高效运行。研究设计安全可靠的网络接口与通信协议,确定鲁棒高效的网络结构,融合航空移动卫星系统技术<sup>[39]</sup>,有助于加装L-DACS系统的航空器具备入网区域频繁切换的能力,实现基站覆盖范围内的无缝通信,确保有效数据信息的正确传输<sup>[40]</sup>;利用动态组网、航空自组网<sup>[41]</sup>等技术优势,通过灵活可靠的组网机制以实现机间态势的高效共享。

(3)针对实际运行需求进行抗干扰技术研究,并推进L-DACS系统的适航审定进程,以应对高动态复杂环境下安全可靠通信的挑战。为了应对航空器实际运行通信环境高动态变化的运行需求,可以从时域/频域/空域等多资源维度解决问题:通过高精度或自适应的时频同步技术解决高速环境下的多普勒拓展问题<sup>[42-43]</sup>,采用压缩感知技术利用空地信道的稀疏特性还原接收信号<sup>[44]</sup>,基于四维航迹运行的先验信息进行子载波间隔干扰抑制处理<sup>[45-46]</sup>。与此同时,L-DACS系统的发展需要突破适航性认证的基础理论和关键技术,使得所部署L-DACS具备消除与现行航空导航/通信系统间干

扰的能力,这也是支撑航空宽带通信系统发展的必要条件。

## 4 结 论

从全球航空通信技术发展的全景来看,L波段数字航空通信(L-DACS)数据链技术作为新一代航空通信系统发展的未来目标,是有效解决频谱资源饱和难题、满足高速率传输需求的有效途径,能够进一步提升集成的CNS系统能力,促进航空通信系统的技术革新。正如本文所强调,现阶段L-DACS系统技术已经趋于成熟,但航空通信系统对于适航性、安全性与标准化要求很高,需要进一步对L-DACS系统的部署与应用进行合理的顶层设计与实验验证,同时对于L-DACS A/A的研究也是未来技术发展的重要关注点。

### 参考文献:

- [1] ZHANG Jun. Aeronautical mobile communication: The evolution from narrowband to broadband[J]. *Engineering*, 2021, 7(4): 431-434.
- [2] LIU Zhaoxuan, CAI Kaiquan, ZHU Yanbo. Civil unmanned aircraft system operation in national airspace: A survey from air navigation service provider perspective[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(3): 200-224.
- [3] JAMES M, HALL E. Aeronautical mobile airport communications system (AeroMACS): NASA/TM-2011-217236[R]. [S.l.]: NASA, 2011.
- [4] PULINI P, PLASS S, TAPONETTO L, et al. AeroMACS evolution-analysis during landing, take-off, and approach phases[J]. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2014, 50(3): 1899-1912.
- [5] JACKSON M, HOWE-VEENSTRA R, WALKER D. 4D trajectory based operations-speed control interoperability[C]//Proceedings of IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC). [S.l.]: IEEE, 2019.
- [6] SCHNELL M, EPPLE U, SHUTIN D, et al. LDA-CS: Future aeronautical communications for air-traffic management[J]. *IEEE Commun Mag*, 2014, 52(5): 104-110.
- [7] 中国民用航空管理局. 中国民航管现代化战略(CAAMS)实施路线图: IB-ATMB-2020-001[R]. 北京: 中国民用航空管理局, 2020.  
Civil Aviation Administration of China. Civil aviation ATM modernization strategy implementation road-  
map: IB-ATMB-2020-001 [R]. Beijing: CAAC, 2020.
- [8] 中国民用航空管理局. 中国民航新一代航空宽带通信技术路线图[EB/OL]. (2021-05-18). <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/202105/P020210518575556219897.pdf>.  
Civil Aviation Administration of China. Civil aviation of China new generation aviation broadband communication technology roadmap [EB/OL]. (2021-05-18). <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/202105/P020210518575556219897.pdf>.
- [9] BELLIDO-MANGANELL M A, GRAUPL T, SCHNELL M. Impact assessment of the L-band digital aeronautical communications system on the joint tactical information distribution system[J]. *IEEE Trans Veh Technol*, 2019, 68(4): 3629-3641.
- [10] SCHNELL M, BRANDES S, GLIGOREVIC S, et al. Interference mitigation for broadband L-DACS [C]//Proceedings of 2008 IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference. St Paul, USA: IEEE, 2008: 1-12.
- [11] 刘海涛, 成玮, 张学军. 联合正交变换与信号交织的测距仪脉冲干扰抑制方法[J]. *航空学报*, 2014, 35(5): 1365-1373.  
LIU Haitao, CHENG Wei, ZHANG Xuejun. DME pulse interference mitigation method based on joint orthogonal transform and signal interleaving[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(5): 1365-1373.
- [12] EUROCONTROL. Updated LDACS1 prototype specification [EB/OL]. (2014-02-01). <https://www.ldacs.com/wp-content/uploads/2014/02/LDACS1-Updated-Prototype-Specifications-D3-Deliverable.pdf>.
- [13] GRÄUPL T, SCHNECKENBURGER N, JOST T, et al. L-band digital aeronautical communications system flight trials in the national German project MI-CONAV[C]//Proceedings of 2018 Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS). Herndon, USA: IEEE, 2018: 1-19.
- [14] ICAO. LDACS white paper—A roll-out scenario[EB/OL]. (2013-12-01). <https://www.ldacs.com/wp-content/uploads/2013/12/ACP-DCIWG-IP01-LDACS-White-Paper.pdf>.
- [15] EUROCONTROL. L-DACS1 system definition proposal : Deliverable D2 [EB/OL]. (2014-02-01). <https://www.ldacs.com/wp-content/uploads/2014/02/LDACS1-Specification-Proposal-D2-Deliverable.pdf>.

- [16] KAMALI B. An overview of VHF civil radio network and the resolution of spectrum depletion[C]//Proceedings of 2010 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings. Herndon, USA: IEEE, 2010.
- [17] NEJI N, DE LACERDA R, AZOULAY A, et al. Survey on the future aeronautical communication system and its development for continental communications[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2013, 62(1): 182-191.
- [18] JAMAL H, MATOLAK D W. FBMC and L-DACS performance for future air-to-ground communication systems[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2017, 66(6): 5043-5055.
- [19] GAO G. DME/TACAN interference and its mitigation in L5/E5 bands[C]//Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2007). Fort Worth, USA: [s.n.], 2007: 1191-1200.
- [20] BELLIDO-MANGANELL M A, SCHNELL M. Towards modern air-to-air communications: The LDACS A2A mode[C]//Proceedings of 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC). San Diego, USA: IEEE, 2019: 1-10.
- [21] 刘海涛, 李广雪, 孙海霞, 等. L-DACS1系统干扰抑制与循环自适应波束形成方法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(8): 1850-1856.
- LIU Haitao, LI Guangxue, SUN Haixia, et al. L-DACS1 system interference suppression and cyclic adaptive beamforming method[J]. System Engineering and Electronics, 2020, 42(8): 1850-1856.
- [22] NEJI N, DE LACERDA R, AZOULAY A, et al. Effect of the aeronautical L-DACS2 radio-frequency signals on the DME system performance[C]//Proceedings of 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference. Ottawa, Canada: IEEE, 2010.
- [23] MAURER N, GRÄUPL T, MIGUEL A, et al. Flight trial demonstration of secure GBAS via the L-band digital aeronautical communications system (LDACS)[J]. IEEE Aerosp Electron Syst Mag, 2021, 36(4): 8-17.
- [24] SCHNECKENBURGER N, FRANZEN N, GLIGOREVIC S, et al. L-band compatibility of LDACS1 [C]//Proceedings of 2011 IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference. Seattle, USA: IEEE, 2011.
- [25] GRÄUPL T. L-DACS1: Analysis, design and evaluation of the quality-of-service protocols of the future aeronautical communication system[M]. Saarbrücken, Germany: Südwestdeutscher Verlag Für Hochschulschriften, 2012.
- [26] MARKOVSKII V S, FOMINYKH A A, MATVEEV N V. Simulation of air-to-ground based on cellular network [C]//Proceedings of 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St Petersburg, Russia: IEEE, 2021: 4-7.
- [27] GRAUPL T, EHAMMER M. The LDACS1 link layer design [EB/OL]. (2011-01-01). <https://www.intechopen.com/chapters/20438>.
- [28] GLIGOREVIC S, EPPLE U, SCHNELL M. The LDACS1 physical layer design [EB/OL]. (2011-01-01). <https://www.intechopen.com/chapters/20439>.
- [29] BRANDES S, EPPLE U, GLIGOREVIC S, et al. Physical layer specification of the L-band digital aeronautical communications system (L-DACS1)[C]//Proceedings of 2009 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. Crystal City, USA: IEEE, 2009.
- [30] LI Chongyi, LIU Haitao, YANG Zhiqiang, et al. FPGA implementation of a L-band digital aeronautical communications system (L-DACS1)[C]//Proceedings of International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC). [S.l.]:[s.n.], 2013: 3227-3230.
- [31] EPPLE U, SCHNELL M. Overview of interference situation and mitigation techniques for LDACS1[C]//Proceedings of 2011 IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference. Seattle, USA: IEEE, 2011.
- [32] FANTAPPIE P. L-DACS Spectral Efficiency [C]//Proceedings of Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS).[S.l.]:[s.n.], 2019: 1-5.
- [33] SGORCEA R, SYMIONOW W, BALAKRISHNA M, et al. Integrating avionics standards with ground air traffic management systems to meet 2025 operational needs[C]//Proceedings of 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Sacramento, USA: IEEE, 2016.
- [34] BELLIDO-MANGANELL M A. Design approach of a future air-to-air data link [C]//Proceedings of 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). London, UK: IEEE, 2018: 1-9.
- [35] MIGUEL B M A. Impact assessment of LDACS on JTIDS[C]//Proceedings of 2017 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference

- (ICNS). Herndon, USA: IEEE, 2017: 1-24.
- [36] MÄURER N, GRÄUPL T, SCHMITT C. Evaluation of the LDACS cybersecurity implementation [C]//Proceedings of 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC). San Diego, USA: IEEE, 2019.
- [37] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. IEEE Trans Commun, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [38] NAVARRO-ORTIZ J, ROMERO-DIAZ P, SENDRA S, et al. A survey on 5G usage scenarios and traffic models[J]. IEEE Commun Surv Tutor, 2020, 22(2): 905-929.
- [39] MOSTAFA M, BELLIDO-MANGANELL M A, GRAUPL T. Feasibility of cell planning for the L-band digital aeronautical communications system under the constraint of secondary spectrum usage[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2018, 67(10): 9721-9733.
- [40] FELUX M, GRÄUPL T, MÄURER N, et al. Transmitting GBAS messages via LDACS[C]//Proceedings of 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). London, UK: IEEE, 2018.
- [41] KUMAR V, RANA A, KUMAR S. Aircraft Ad-hoc network (AANET)[J]. Int J Adv Res Comput Commun Eng, 2014, 3(5): 6679-6684.
- [42] LIU H, ZHANG J, WU Q, et al. RIS-aided next-generation high-speed train communications: Challenges, solutions, and future directions[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(6): 1-7.
- [43] BELLIDO-MANGANELL M A, SCHNELL M. Feasibility of the frequency planning for LDACS air-to-air communications in the L-band[C]//Proceedings of 2021 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS). Dulles, USA: IEEE, 2021.
- [44] 刘海涛, 张智美, 成玮, 等. 联合压缩感知与干扰白化的脉冲干扰抑制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(8): 1367-1373.  
LIU Haitao, ZHANG Zhimei, CHENG Wei, et al. Impulse interference mitigation method based on joint compressed sensing and whitening of interference[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(8): 1367-1373.
- [45] AI B, MOLISCH A A F, RUPP M, et al. 5G key technologies for smart railways[J]. Proc IEEE, 2020, 108(6): 856-893.
- [46] YANG L, REN G, YANG B, et al. Fast time-varying channel estimation technique for LTE uplink in HST environment[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2012, 61(9): 4009-4019.

(编辑:张蓓)