



Interference Mitigation Methods and
Performance for L-DACS1 System

L频段数字航空通信系统 干扰抑制方法与性能

刘海涛 张学军 李冬霞 王 磊 著



科学出版社

L 频段数字航空通信系统 干扰抑制方法与性能

Interference Mitigation Methods and
Performance for L-DACS1 System

刘海涛 张学军 李冬霞 王 磊 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

L 频段数字航空通信系统 1 (L-DACS1) 是民航未来沿陆地航路部署的空地蜂窝通信系统, 该系统为陆地航路、终端区及机场等区域飞行的航空器提供空中交通管制, 以及为航空公司运行控制业务提供数据与话音通信服务。本书围绕测距仪 (DME) 干扰 L-DACS1 系统正交频分复用 (OFDM) 接收机的关键技术问题, 介绍了 4 类测距仪干扰抑制方法, 并定量分析了非线性干扰抑制法对 OFDM 系统链路传输可靠性的影响。

全书 11 章分为 3 个部分。第 1 部分由第 1~3 章组成, 主要介绍了 L-DACS1 系统基本概念、DME 干扰 L-DACS1 系统 OFDM 接收机问题的来源及该领域国内外研究现状; 第 2 部分由第 4~8 章组成, 该部分主要介绍 OFDM 接收机 DME 干扰抑制方法, 主要包括非线性干扰抑制法、压缩感知信号重构干扰抑制法、阵列天线空域滤波法及脉冲熄灭子载波间干扰补偿法; 第 3 部分由第 9~11 章组成, 主要介绍了脉冲熄灭法对 OFDM 系统链路传输性能的影响。

本书结构完整、逻辑严谨、叙述简明, 可作为高等学校航空通信专业本科生及研究生的参考书, 也可作为航空通信及航空电子领域科技工作者的参考读物。

图书在版编目 (CIP) 数据

L 频段数字航空通信系统干扰抑制方法与性能/刘海涛等著. —北京: 科学出版社, 2018.5

ISBN 978-7-03-055760-5

I. ①L… II. ①刘… III. ①航空通信—数字通信系统—通信干扰—研究 IV. ①V243.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 298633 号

责任编辑: 赵丽欣 常晓敏 / 责任校对: 马英菊

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行

各地新华书店经销

*

2018 年 5 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张: 13

字数: 290 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62134021

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303



前 言

L 频段数字航空通信系统 1 (L-band digital aeronautical communication system 1, L-DACS1) 是一个民航未来沿陆地航路部署的空地蜂窝通信系统, 该系统主要为陆地航路、终端区及机场飞行的航空器提供空中交通管制, 以及为航空公司运行控制等业务提供数据与话音通信服务。L-DACS1 系统是民航新一代空中交通管理系统的重要通信基础设施。为解决 L-DACS1 系统频率资源匮乏的问题, 国际民航组织 (International Civil Aviation Organization, ICAO) 建议, L-DACS1 系统未来部署在航空无线电导航频段的测距仪 (distance measure equipment, DME) 波道间, 由于 DME 与 L-DACS1 信号的频谱存在部分重叠, 因此不可避免产生 DME 信号干扰 L-DACS1 系统正交频分复用 (orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) 接收机的问题。相关研究表明: 如果 L-DACS1 系统 OFDM 接收机不采取干扰抑制措施, L-DACS1 系统链路传输的可靠性将显著恶化, 无法满足新一代空中交通管理系统高速、大容量、可靠空地数据通信的需求。因此, 针对 DME 干扰 L-DACS1 系统 OFDM 接收机的关键技术问题, 开展 OFDM 接收机 DME 干扰抑制的研究具有重要意义, 本书是作者六年来在该领域持续研究的一个总结。全书共 11 章:

第 1 章首先介绍航空移动通信的基础知识, 并概要介绍民航典型的航空移动通信系统, 包括甚高频话音通信系统、高频话音通信系统、飞机通信寻址与报告系统、甚高频数据链系统及航空移动卫星通信系统; 随后阐述民航航空移动通信系统的未来发展趋势及 L-DACS1 系统存在的 DME 脉冲干扰问题; 最后, 对 L-DACS1 系统 OFDM 接收机干扰抑制问题的国内外研究现状进行综述。

第 2 章首先介绍 L-DACS1 系统的基础知识; 其次介绍 L-DACS1 系统物理层参数及物理层帧结构; 随后叙述 L-DACS1 系统物理层编码与调制的过程; 最后对 L-DACS1 系统物理层提供的服务进行总结。

第 3 章首先介绍 DME 系统无线电脉冲测距的工作原理; 然后理论分析给出 DME 信号带外泄漏功率的计算方法; 随后, 在典型干扰场景下, 通过链路预算给出 L-DACS1 系统机载接收机输入信干比; 最后, 构建 L-DACS1 系统 DME 干扰抑制仿真平台, 仿真验证 DME 对 L-DACS1 系统链路差错性能的影响。

第 4 章围绕 OFDM 接收机非线性干扰抑制方法, 重点介绍脉冲熄灭法、脉冲限幅方法、联合脉冲熄灭与限幅法的工作原理, 并构建仿真平台, 仿真比较以上三种非线性脉冲干扰抑制方法的性能。

针对 OFDM 接收机脉冲熄灭干扰抑制方法产生的子载波间干扰恶化 OFDM 系统链路传输可靠性的问题, 第 5 章介绍两种子载波间干扰补偿方法: 硬判决反馈迭代子载波间干扰抑制方法及软符号重构迭代子载波间干扰补偿方法; 最后构建 L-DACS1 系统 DME 干扰抑制仿真平台, 仿真比较以上两种子载波间干扰补偿方法的性能。

第 6 章针对 DME 信号干扰 L-DACS1 系统 OFDM 接收机, 显著恶化 L-DACS1 系统

链路传输可靠性的问题,提出了基于联合压缩感知信号重构与残留 DME 信号白化的抑制方法,最后构建联合压缩感知信号重构及残留 DME 信号白化的仿真平台,仿真比较了所提出干扰抑制方法的性能。

针对 DME 干扰恶化 L-DACS1 系统 OFDM 接收机链路传输可靠性的问题,第 7 章开展了基于阵列天线空域滤波的 DME 干扰抑制方法研究,共提出三种空域滤波方法:联合 DOA 估计与主波束形成的干扰抑制方法、联合正交投影与盲波束形成的干扰抑制方法及联合正交投影与 CLEAN 的干扰抑制方法,最后构建基于空域滤波的 L-DACS1 系统干扰抑制仿真平台,仿真验证了所提出方法的性能。

第 8 章为解决频率选择性衰落信道下脉冲熄灭 OFDM 接收机最佳熄灭门限的设置问题,提出了基于解调器输出信噪比最大准则的门限设置方法,并仿真验证了所提出方法的正确性与有效性。

为定量给出频率选择性衰落信道下脉冲熄灭 OFDM 接收机的链路差错性能,第 9 章通过理论分析给出了理想脉冲熄灭 OFDM 接收机的符号差错概率计算公式,并进一步分析给出了基于最大比值合并的理想脉冲熄灭 OFDM 接收机的符号差错概率计算公式,最后构建仿真平台仿真验证了理论分析结果的正确性。

采用与第 9 章相同的研究方法,第 10 章将第 9 章的研究成果进一步推广到峰值脉冲熄灭 OFDM 系统,得到了频率选择性衰落信道下峰值脉冲熄灭 OFDM 系统的链路差错性能计算公式。

为定量给出脉冲熄灭方法对 OFDM 系统信道容量的影响,第 11 章通过分析给出理想脉冲熄灭、峰值脉冲熄灭及任意脉冲熄灭 OFDM 系统的信道容量计算公式,并仿真比较不同方法对 OFDM 系统信道容量的影响。

本书是项目组近六年研究成果的结晶,是 L-DACS1 系统 DME 干扰抑制研究工作的一个总结,本书的撰写得到了国家自然科学基金项目 U1233117、U1733120 及 U1633108 的资助,同时也得到了国家重点研发计划项目 2016YFB0502402 的资助,在此作者对国家自然科学基金委员会及科技部的支持表示衷心的感谢。

本书由刘海涛、张学军、李冬霞及王磊共同撰写。其中,刘海涛撰写了第 1 章、第 3 章、第 7~10 章,张学军撰写了第 2 章、第 4 章及第 6 章,王磊撰写了第 5 章,李冬霞撰写了第 11 章。在本书的撰写过程中,作者还得到实验室历届研究生的帮助,他们是成玮、张智美、崔颜敏、刘亚洲、尹志胜、李思、张慧敏、丛婉、曾伟忠、赵文强、陈仟及刘国庆,作者在此表示感谢!限于作者的水平,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 航空移动通信系统	1
1.1 民航典型航空移动通信系统	1
1.1.1 甚高频话音通信系统	1
1.1.2 高频话音通信系统	2
1.1.3 飞机通信寻址与报告系统	2
1.1.4 甚高频数据链系统	3
1.1.5 航空移动卫星通信系统	3
1.2 民航宽带航空数据链系统	3
1.2.1 L 频段数字航空通信系统简介	3
1.2.2 L 频段数字航空通信系统 DME 干扰抑制	4
1.2.3 国内外研究现状	4
1.3 本章小结	5
参考文献	6
第 2 章 L 频段数字航空通信系统	8
2.1 L-DACS1 系统	8
2.1.1 L-DACS1 系统概述	8
2.1.2 L-DACS1 系统帧结构	9
2.1.3 L-DACS1 系统协议结构	9
2.1.4 L-DACS1 系统逻辑信道	10
2.2 L-DACS1 系统时频符号结构与物理层参数	12
2.2.1 前向链路符号结构	12
2.2.2 反向链路符号结构	13
2.2.3 物理层技术参数	13
2.3 物理层帧结构	14
2.3.1 前向链路帧结构	14
2.3.2 反向链路帧结构	16
2.3.3 前向链路反向链路成帧	19
2.4 编码与调制	20
2.4.1 比特扰码器	20
2.4.2 信道编码	20
2.4.3 调制器	22
2.4.4 调制符号的映射	23
2.5 导频、同步、AGC 序列及 PAPR 符号	24
2.5.1 导频序列	24
2.5.2 同步序列	25

2.5.3	AGC 序列	26
2.5.4	PAPR 符号	26
2.6	物理层服务	26
2.6.1	机载站物理层服务	27
2.6.2	地面站物理层服务	28
2.7	本章小结	30
	参考文献	30
第 3 章	测距仪对 L 频段数字航空通信系统的影响	31
3.1	DME 系统简介	31
3.2	L-DACS 1 系统的未来部署	32
3.3	DME 信号带外泄漏功率	34
3.3.1	截断高斯脉冲信号	34
3.3.2	截断高斯脉冲对信号	35
3.3.3	DME 信号带外泄漏功率	36
3.4	L-DACS1 前向链路干扰链路预算	38
3.4.1	L-DACS1 系统前向链路预算	38
3.4.2	地面 DME 应答器至机载接收机干扰链路预算	39
3.4.3	L-DACS1 机载接收机输入信干比	40
3.5	DME 对 L-DACS1 系统 OFDM 接收机的影响	41
3.5.1	等效中频低通滤波器及抗混叠滤波器	41
3.5.2	残留 DME 信号对前向链路可靠性的影响	44
3.6	本章小结	46
	参考文献	46
第 4 章	OFDM 接收机非线性脉冲干扰抑制方法	48
4.1	引言	48
4.2	脉冲熄灭与脉冲限幅干扰抑制方法	48
4.2.1	发射机模型	48
4.2.2	脉冲熄灭 OFDM 接收机模型	49
4.2.3	脉冲限幅 OFDM 接收机模型	50
4.2.4	仿真参数设置	52
4.2.5	仿真结果分析	52
4.3	联合脉冲熄灭与脉冲限幅的干扰抑制方法	53
4.3.1	联合脉冲熄灭与限幅接收机模型	53
4.3.2	仿真参数设置	54
4.3.3	仿真结果分析	54
4.4	DME 脉冲起始位置估计方法	56
4.4.1	信号模型	56
4.4.2	基于差分相关的 DME 脉冲起始位置估计方法	57
4.5	本章小结	58
	参考文献	58

第 5 章 非线性 OFDM 接收机子载波间干扰抑制方法	60
5.1 引言	60
5.2 硬判决反馈迭代子载波间干扰抑制方法	60
5.2.1 硬判决反馈迭代 ICI 干扰补偿接收机模型	60
5.2.2 仿真参数设置	62
5.2.3 仿真结果分析	63
5.3 软符号重构迭代子载波间干扰补偿方法	65
5.3.1 软符号重构迭代 ICI 干扰补偿接收机	65
5.3.2 DME 干扰检测方法	67
5.3.3 DME 脉冲起始位置估计	68
5.3.4 软符号解调器	68
5.3.5 软符号重构器	69
5.3.6 仿真参数设置	70
5.3.7 仿真结果分析	70
5.4 本章小结	74
参考文献	75
第 6 章 联合压缩感知与残留信号白化的干扰抑制方法	76
6.1 引言	76
6.2 压缩感知基本概念	77
6.2.1 信号的稀疏表示	78
6.2.2 测量矩阵的选取	78
6.2.3 信号重建算法	79
6.3 联合压缩感知信号重构与残留测距仪信号白化的抑制方法	80
6.3.1 发射机模型	80
6.3.2 接收机模型	81
6.3.3 凸优化脉冲干扰重构	83
6.3.4 残留干扰白化	84
6.3.5 仿真参数设置	84
6.3.6 DME 脉冲信号重构效果	85
6.3.7 干扰白化效果	87
6.3.8 比特差错性能	88
6.4 本章小结	90
参考文献	90
第 7 章 基于阵列天线空域滤波的测距仪干扰抑制	92
7.1 引言	92
7.2 联合 DOA 估计与主波束形成的干扰抑制方法	92
7.2.1 联合 DOA 估计与主波束形成的接收机模型	93
7.2.2 DOA 估计器	93
7.2.3 主波束形成器	94
7.2.4 信号分类器	95

7.2.5	数值仿真结果	97
7.3	联合正交投影与盲波束形成的干扰抑制方法	101
7.3.1	联合正交投影与盲波束形成接收机模型	101
7.3.2	正交投影干扰抑制算法	102
7.3.3	基于循环前缀对称特性的盲波束形成算法	103
7.3.4	数值仿真结果	105
7.4	联合正交投影与 CLEAN 的干扰抑制方法	108
7.4.1	联合正交投影与 CLEAN 的接收机模型	109
7.4.2	基于信号来向估计的常规波束形成算法	109
7.4.3	数值仿真结果	111
7.5	本章小结	114
	参考文献	115
第 8 章	频率选择性瑞利衰落信道 OFDM 接收机脉冲熄灭门限设置方法	116
8.1	引言	116
8.2	脉冲熄灭 OFDM 系统模型	117
8.3	频率选择性衰落信道脉冲熄灭门限设置方法	118
8.3.1	脉冲熄灭 OFDM 接收机解调器输出 SINR	118
8.3.2	脉冲熄灭器的最佳熄灭门限	120
8.3.3	脉冲熄灭 OFDM 接收机符号差错概率	120
8.3.4	仿真参数设置	122
8.3.5	仿真结果	122
8.4	本章小结	126
	参考文献	126
	附录	127
	附录 A 事件 q_n 与 b_n 的联合概率	127
	附录 B 等效噪声分量的条件方差	129
第 9 章	脉冲熄灭 OFDM 接收机链路差错性能	132
9.1	引言	132
9.2	脉冲噪声对 OFDM 接收机差错性能的影响	133
9.2.1	OFDM 发射机模型	133
9.2.2	OFDM 接收机模型	134
9.2.3	OFDM 接收机解调器输出信噪比	135
9.2.4	脉冲噪声环境下 OFDM 接收机符号差错概率	136
9.2.5	数值仿真结果	137
9.3	理想脉冲熄灭 OFDM 接收机链路差错性能	138
9.3.1	脉冲熄灭 OFDM 接收机模型	139
9.3.2	脉冲熄灭 OFDM 接收机输出信噪比	140
9.3.3	脉冲熄灭 OFDM 接收机符号差错概率	142
9.3.4	数值仿真结果	143
9.4	理想脉冲熄灭最大比值合并 OFDM 接收机符号差错性能	147

9.4.1	脉冲熄灭最大比值合并 OFDM 接收机模型	147
9.4.2	脉冲熄灭最大比值合并 OFDM 接收机输出信干噪比	149
9.4.3	瑞利衰落信道脉冲熄灭最大比值合并 OFDM 接收机符号差错概率	151
9.4.4	莱斯衰落信道脉冲熄灭最大比值合并 OFDM 接收机差错性能	153
9.4.5	数值仿真结果	155
9.5	本章小结	159
	参考文献	160
第 10 章	基于峰值门限的非线性 OFDM 接收机性能	162
10.1	引言	162
10.2	系统模型	163
10.2.1	OFDM 发射机模型	163
10.2.2	基于峰值门限的非线性 OFDM 接收机模型	163
10.3	基于峰值门限的非线性 OFDM 接收机输出信干噪比	164
10.3.1	常规 OFDM 接收机输出信干噪比	164
10.3.2	峰值门限熄灭 OFDM 接收机输出信干噪比	166
10.3.3	峰值脉冲限幅 OFDM 接收机输出信干噪比	167
10.4	基于峰值门限的非线性 OFDM 接收机差错性能	168
10.4.1	瑞利衰落信道 OFDM 接收机符号差错概率	168
10.4.2	莱斯衰落信道 OFDM 接收机符号差错概率	170
10.5	数值仿真结果	171
10.5.1	仿真参数设置	171
10.5.2	频率选择性瑞利衰落信道仿真结果	171
10.5.3	频率选择性莱斯衰落信道仿真结果	173
10.6	本章小结	174
	参考文献	174
	附录	176
	附录 A 峰值门限脉冲熄灭等效噪声信号的方差	176
	附录 B 峰值门限脉冲限幅等效噪声信号的方差	177
第 11 章	非线性脉冲熄灭 OFDM 系统信道容量	179
11.1	引言	179
11.2	系统模型	180
11.2.1	OFDM 发射机模型	180
11.2.2	脉冲熄灭 OFDM 接收机模型	180
11.3	脉冲熄灭 OFDM 接收机输出信噪比	181
11.3.1	常规 OFDM 接收机输出信噪比	182
11.3.2	理想脉冲熄灭 OFDM 接收机输出信噪比	183
11.3.3	峰值门限脉冲熄灭 OFDM 接收机输出信噪比	184
11.3.4	任意门限脉冲熄灭 OFDM 接收机输出信噪比	185
11.4	脉冲熄灭 OFDM 系统的信道容量	186
11.5	仿真结果	187

11.5.1 仿真参数设置187

11.5.2 频率选择性瑞利衰落信道的遍历容量与中断概率187

11.5.3 频率选择性莱斯衰落信道的遍历容量与中断容量191

11.6 本章小结192

参考文献193

附录195

附录 A 式 (11-22) 的推导.....195

附录 B FM-EM 算法195

第 1 章 航空移动通信系统

1.1 民航典型航空移动通信系统

航空移动业务定义为^[1]：飞行员与地面管制人员、飞行员与航空公司调度员之间或飞行员与飞行员之间的无线电通信业务。承载航空移动业务的电信系统称为航空移动通信系统。民航典型航空移动通信系统包括甚高频（very high frequency, VHF）话音通信系统、高频（high frequency, HF）话音通信系统、飞机通信寻址与报告系统（aircraft communications addressing and reporting system, ACARS）、甚高频数据链系统（very high frequency digital link, VDL）、航空移动卫星通信系统（aeronautical mobile satellite system, AMSS）。按照国际民航组织（ICAO）的规定^[1]，航空移动通信系统主要提供四种类型的通信服务：空中交通服务（air traffic service, ATS）、航空运行控制（aeronautical operational control, AOC）、航空行政管理（airline administrative control, AAC）及航空旅客通信（airline passenger communication, APC）。

空中交通服务通信是指与空中交通服务有关的通信，此类通信通常与飞行安全、航班正常运行密切相关。通信内容包括管制指令、航行情报、气象信息、位置报告等。通信可能发生在飞行员与地面空中交通管制（air traffic control, ATC）服务人员之间，如管制指令的发布；也可能在不同的地面空中交通服务人员之间进行，如管制中心之间进行管制移交。航空运行控制通信是飞行过程中航空公司运行控制中心工作人员与航空器机组之间的通信，通信的主要目的是保障飞行的安全和航班正常运行，提高运行效率。航空运行控制通信的内容比较丰富，包括航班计划、航班执行情况、航空器状态监视等，其中部分信息与飞行安全相关。航空行政管理通信通常是航空运输企业有关航班运营和运输服务方面的商务信息，如运输服务预定、飞机与机组安排或其他后勤保障类的信息，通信的目的是提高运营的效率。航空旅客通信指乘客或机组成员出于个人目的的话音通信和数据通信，这类通信与飞行安全无关。

1.1.1 甚高频话音通信系统

甚高频话音通信系统主要利用甚高频无线电距传播的特性来提供航空器电台与地面电台间的话音通信。航空甚高频话音通信系统主要用于空中交通管制部门、航空公司运行控制部门与飞行员之间的话音通信服务。根据《国际民用航空公约》附件 10《航空电信》第 3 卷关于地空移动通信业务的规定^[1]，民航甚高频话音通信系统调制方式为双边带调幅（amplitude modulation, AM），工作频段为 118~136.975MHz，信道间隔为 25kHz。1995 年《国际民用航空公约》附件 10 修订版进一步规定在航空繁忙区域可使用 8.33kHz 的信道间隔。

相对于高频话音通信系统,甚高频话音通信具有信号质量稳定、话音清晰等优点,单个甚高频地面站的通信覆盖范围达 350km,因此甚高频话音通信系统非常适合机场、终端区及航路飞行阶段飞行员与管制员间的话音通信服务。目前甚高频话音通信系统是使用最广泛的航空移动通信系统。

1.1.2 高频话音通信系统

高频话音通信系统主要利用高频无线电波通过电离层反射来实现远距离航空器电台与地面电台间的话音通信。高频话音通信系统主要用于空中交通管制部门、航空公司航务管理部门与飞行员之间的话音通信服务。根据《国际民用航空公约》附件 10《航空电信》的规定^[1],民航高频话音通信系统的调制方式为单边带(single side band, SSB)调制,发射边带为上边带,工作频段为 2.8~22MHz。

相对于甚高频话音通信系统,高频话音通信系统存在以下几个方面的缺陷:①电离层的传播特性随昼夜及季节的变化而改变,导致接收信号不稳定;②高频信道容易受太阳黑子活动的影响,导致接收信号强度产生扰动;③高频信道中存在多径传播的现象,导致接收信号的强度快速变化;④高频频带较窄,接收机容易受到同频及邻台的干扰。总之,相对于甚高频话音通信系统及航空移动卫星通信系统,高频话音通信系统的通信质量较差。

目前,高频话音通信系统主要用于越洋飞行及偏远地区等甚高频话音通信系统无法覆盖区域的航路飞行通信,而在陆地甚高频话音通信系统已覆盖区域,高频话音通信系统则主要作为甚高频话音通信系统的备份系统。

1.1.3 飞机通信寻址与报告系统

飞机通信寻址与报告系统^[2](ACARS)是 20 世纪 70 年代美国航空无线电通信公司(aeronautical radio incorporated, ARINC)开发的一种在航空器和地面站之间通过甚高频无线电传输短消息的空地数据链通信系统。ACARS 的工作频段为民航甚高频通信频段,采用半双工方式工作,传输带宽为 25kHz,调制方式为最小移频键控(minimum shift keying, MSK),比特传输速率为 2400bit/s,媒体存取访问采用非坚持-载波侦听多路访问协议,数据链路层差错控制采用“停-等”协议。

ACARS 广泛应用于航空公司运行控制通信领域,典型应用包括舱单上传、飞机位置报告、飞行计划变更报告及气象信息传输等。目前 ACARS 也开始应用于空中交通管制服务领域,典型应用包括数字化起飞放行服务(digital pre-departure clearance, D-PDC)、数字化终端区信息服务(digital automatic terminal information service, D-ATIS)、航路气象信息服务(digital broadcast meteorological information, D-VOLMET)、管制员飞行员数据链通信(controller pilot data link communication, CPDLC)与合同式自动相关监视服务(automatic dependent surveillance-contract, ADS-C)。

相对于甚高频话音通信系统,ACARS 数据链系统具有以下几个方面的优势:①提高了空地之间数据传输的准确性和快速性;②方便实现数据的共享,提高了航空公司的管理效率;③提高了空地数据传输的实时性,降低航空公司的运营成本。

1.1.4 甚高频数据链系统

尽管 ACARS 在航空公司运行控制通信领域获得广泛应用,但 ACARS 仍存在某些先天不足和缺陷,如数据传输速率低、不支持实时业务、无优先权功能、存在共信道干扰及保密性差等。为克服 ACARS 存在的以上缺陷,1997 年 ICAO 组织制定了四个甚高频数据链技术标准^[2]:甚高频数据链模式 1 (VDL Mode 1)、甚高频数据链模式 2 (VDL Mode 2)、甚高频数据链模式 3 (VDL Mode 3) 及甚高频数据链模式 4 (VDL Mode 4)。经过 20 年的发展,目前甚高频数据链模式 2 系统标准获得国内外业界的广泛认可。

甚高频数据链模式 2 系统工作频段为民航甚高频频段,传输带宽为 25kHz,调制方式为 D8PSK、码元速率为 10 500Bd,信息速率为 31.5kbit/s,媒体存取访问采用了非自适应 p-持续的载波侦听多路访问 (p-CSMA),数据链路层采用了航空甚高频链路控制 (aviation VHF link control, AVLC) 协议,空地链路间采用交换虚电路连接方式,数据链可提供航空电信子网服务,数据分组的比特差错率达到 10^{-6} ,系统可用性达到 99.9%。甚高频数据链模式 2 系统主要作为 ACARS 升级换代的空地通信的技术手段,其应用的领域与 ACARS 完全相同。

1.1.5 航空移动卫星通信系统

随着卫星通信技术的发展,20 世纪 90 年代卫星通信也逐渐应用于民用航空通信领域。航空移动卫星通信系统主要由机载卫星地球站、卫星转发器 (中继卫星) 及地面地球站三个部分组成。典型的航空移动卫星通信系统包括国际移动卫星组织 (International Mobile Satellite Organization, INMSART) 及铱星通信系统 (Iridium Satellite Communication System, IRIDIUM) 等。利用卫星通信链路,飞行员可实现与空中交通管制部门、航空公司航务管理部门的双向话音通信,此外卫星通信系统也可为航空旅客与地面人员间提供双向话音通信服务。

相对于其他空地通信手段,航空移动卫星通信系统具有技术先进、通信覆盖范围广 (除南北极地区)、通信距离远、话音质量好的优点,但卫星通信系统也存在机载卫星通信终端设备昂贵、单位时间通话成本高等缺点。目前航空移动卫星通信系统主要用于航空公司跨洋飞行过程中的航务管理通信及航空旅客通信。

1.2 民航宽带航空数据链系统

1.2.1 L 频段数字航空通信系统简介

进入 21 世纪,全球民用航空运输业的飞速发展给民航空中交通管理系统带来巨大挑战,据研究预测^[3,4]:未来 15~20 年,欧洲各国、美国及亚洲各国空中交通繁忙区域航空器的数量将达到空中交通管理系统容量的极限。为应对全球民用航空运输业飞速发展带来的挑战,2005—2006 年在 ICAO 的协调下欧洲各国与美国相继启动了“SESAR^[5]”与“NextGen^[6]”研究计划。这些计划的共同目标:研究新一代空中交通管理系统,保障民用航空器安全、可靠、高效的飞行。

新一代空中交通管理系统对民航未来航空移动通信系统提出更高的要求,为寻找未

来航空移动通信的解决方案,2007 年 ICAO 启动了“未来通信研究”研究计划^[7]。该计划的研究结果^[8]:未来航空移动通信系统主要依赖三种通信技术手段:①L 频段数字航空通信系统^[9](L-Band digital aeronautical communication system, L-DACS);②航空移动机场通信系统^[10](aeronautical mobile airport communication system, AeroMACS);③新一代航空移动卫星通信系统^[11]。以上三种航空通信系统将构成新一代空中交通管理系统的通信基础设施。

L-DACS^[12]是未来民航沿陆地航路部署的空-地蜂窝通信系统,该系统为陆地航路、终端区及机场区域飞行的航空器提供空中交通管制,以及为航空公司运行控制业务提供数据与语音通信服务。目前,L-DACS 有两种候选的技术方案:L-DACS1^[13]与 L-DACS2^[14]。L-DACS1 采用多载波 OFDM 传输体制,L-DACS2 采用单载波高斯最小频移键控(gaussian filtered minimum shift keying, GMSK)传输体制。两种技术方案比较表明^[15-17],L-DACS1 具有以下几个方面的优势:频谱效率高、传输容量大、系统吞吐量高,多载波传输体制更适合航空移动信道,系统同时支持话音与数据业务,系统扩展后可支持航空导航与非合作监视。鉴于以上优势,L-DACS1 获得航空制造界与学术界的广泛关注,该系统被视为民航未来航空数据链系统的重要技术手段。

1.2.2 L 频段数字航空通信系统 DME 干扰抑制

为推动 L-DACS 的研究、开发与标准化,2007 年世界无线电大会 417 号决议批准了 ICAO 提出的将 L-DACS 系统部署于航空无线电导航 L 频段的建议^[18],其中,L-DACS1 系统以内嵌方式部署在 L 频段 DME 的波道间。航空无线电导航频段原主要分配给无线电导航设备使用,该频段的主要设备是 DME 系统。DME 系统带宽 0.5MHz,波道间隔 1.0MHz,根据 ICAO 的建议,L-DACS1 系统将部署在 DME 系统的波道中央,占用带宽 0.5MHz。由于 DME 与 OFDM 信号频谱存在部分交叠,且 DME 系统发射功率较高,因此不可避免地产生 DME 信号干扰 L-DACS1 系统 OFDM 接收机的问题^[19]。

根据德国宇航研究中心(German Aerospace Center,德文简称 DLR)的相关研究^[19,20]:DME 对 L-DACS1 系统 OFDM 接收机的干扰呈现以下特点:①干扰强度大,典型干扰场景下 OFDM 接收机解调器输入信干比(signal to interference ratio, SIR)达 -3.8dB;②干扰密集,典型干扰场景下单个 OFDM 符号传输时间内,OFDM 接收机被单个 DME 脉冲干扰的概率为 88%;③干扰持续时间长,由于 DME 台站沿陆地航路部署,航空器在沿航路飞行过程中会持续收到 DME 的干扰信号。此外,DLR 的研究结果还表明^[21]:如果 L-DACS1 系统 OFDM 接收机不采取干扰抑制措施,L-DACS1 系统空地链路传输可靠性将显著恶化,从而无法满足新一代空中交通管理系统高速、大容量、可靠空地数据通信的需求。因此,针对 DME 信号干扰显著恶化 L-DACS1 系统 OFDM 接收机的关键问题,开展 OFDM 接收机脉冲干扰抑制与信号解调技术的研究具有重要意义。

1.2.3 国内外研究现状

DME 信号干扰 L-DACS1 系统 OFDM 接收机的本质原因:由于 L-DACS1 系统以内嵌方式部署在 DME 系统波道的中央,造成 OFDM 与 DME 信号频谱存在部分交叠,而 OFDM 接收机射频、中频及基带抗混叠滤波器无法完全消除邻道 DME 信号的干扰,造成 OFDM 解调器输入信号包含高强度的 DME 信号分量,最终造成 OFDM 接收机链路

可靠性显著下降。

L-DACS1 系统 OFDM 接收机 DME 信号抑制的科学问题：如何充分利用 DME 与 OFDM 信号在时域、频域、空域特性的差异，基于统计信号处理方法消除 DME 信号的干扰，提高 L-DACS1 系统 OFDM 接收机的可靠性。

1. 国外研究状况

针对 DME 信号干扰 L-DACS1 系统 OFDM 接收机的问题，DLR 组成了以 M. Schell 为核心的研究团队。近年来，该研究团队开展了以下五个方面的研究：①DME 干扰信号的建模^[22]；②DME 干扰对 OFDM 接收机链路传输可靠性影响的评估^[22]；③利用 DME 信号呈现为脉冲干扰的特性，提出了脉冲熄灭干扰抑制方法^[23]；④为克服脉冲熄灭导致 OFDM 接收机产生子载波间干扰（inter carrier interference, ICI）的问题，提出脉冲熄灭 ICI 干扰补偿方法^[24,25]；⑤针对脉冲熄灭门限设置困难的问题，提出了自适应脉冲熄灭门限设置方法^[26]。此外，新加坡南洋理工大学的研究人员也提出一种基于判决反馈脉冲噪声估计的 DME 干扰抑制方法^[27]。

DLR 团队的学术思想：①利用 DME 信号在时域呈现为脉冲干扰的特点，基于脉冲熄灭方法消除 DME 干扰；②针对脉冲熄灭产生的 ICI 干扰，利用迭代干扰补偿方法进一步消除 ICI 干扰。所提出的方法应用于实际系统时，存在以下几个方面的问题：①脉冲熄灭将导致 OFDM 信号产生 ICI，而 ICI 干扰仍将恶化 OFDM 接收机的可靠性；②ICI 干扰补偿法要求精确知晓各个子信道的衰落信息，而在干扰环境下各个子信道衰落信息的精确获得本身就非常困难。

2. 国内研究状况

围绕 DME 信号干扰 L-DACS1 系统 OFDM 接收机的问题，国内相关研究主要由北京航空航天大学与中国民航大学联合开展，主要研究内容包括：①利用 DME 信号在时域呈现为脉冲干扰且稀疏的特性，提出压缩感知 DME 信号重构，然后进行干扰消除的方法^[28,29]；②利用 DME 与 OFDM 信号在小波域特性的差异，提出基于小波变换 DME 信号重构与干扰消除的方法^[30]；③利用 DME 与 OFDM 信号空域波达方向不同的特性，提出基于阵列天线空域滤波的 DME 信号干扰抑制方法^[31-33]；④定量分析给出脉冲熄灭法对 OFDM 接收机链路差错性能的影响^[34-37]。此外，重庆大学曾孝平教授也提出了基于高阶统计量的 DME 脉冲干扰抑制方法^[38]。

以上研究存在的不足：①压缩感知干扰消除后的信号存在残留干扰，降低了 OFDM 解调器输入信噪比，限制接收机链路可靠性的进一步提高；②基于小波变换脉冲重构的方法也存在类似的问题；③基于空域滤波的方法虽可取得较好的干扰抑制效果，但需要接收机安装阵列天线，限制了该方法的应用范围；④基于高阶累积量的方法存在运算复杂度高的缺陷。

1.3 本章小结

本章首先概要介绍了航空移动通信系统的基本概念，然后介绍了民航典型的航空移动通信系统，包括甚高频话音通信系统、高频话音通信系统、飞机通信寻址与报告系统、

甚高频数据链系统及航空移动卫星通信系统；随后阐明了民航宽带航空数据链系统的未来发展趋势，重点介绍了 L 频段数字航空通信系统及 DME 信号干扰 L-DACS1 系统 OFDM 接收机的问题；最后对 L-DACS1 系统 DME 信号干扰抑制的国内外研究现状进行综述。

参 考 文 献

- [1] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Annex 10 to the convention on international civil aviation: aeronautical telecommunications[M]. Catalogue of ICAO Publications, 2013.
- [2] 张军. 现代空中交通管理[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [3] STATISTICS AND FORECAST. Challenges of growth, task 4: European air traffic in 2035 [EB/OL]. (2013-06-01) [2017-06-22]. <http://www.eurocontrol.int/statfor>.
- [4] SOLOMOS G, URLASS S, BHADRA D, et al. Capacity needs in the national airspace system: analysis of airport and metropolitan area demand and operational capacity in the future[R]. MITRE center for advance aviation system development. McLean, VA, MP 04W0000109, 2004.
- [5] GERALD L. Next Generation Air Transportation System[EB/OL]. (2012-09-01)[2017-06-22]. <http://www.faa.gov/nextgen/>.
- [6] SESAR Joint Undertakings (JU) News[N/OL]. (2013-08-01)[2017-06-22]. <http://www.sesarju.eu/>.
- [7] EUROCONTROL/FAA FUTURE COMMUNICATIONS STUDY OPERATIONAL CONCEPTS AND REQUIREMENTS TEAM. Communications operating concept and requirements for the future radio System [Z]. Version 2.0, Tech. Rep., 2007, 2:1-172.
- [8] ICAO. Future communication study action plan 17 final conclusions and recommendations report[R]. ACPWGT/1-WP/06_AP17, Montreal, 2007.
- [9] SCHNELL M, EPPL U, SHUTIN D, et al. LDACS: Future aeronautical communications for air traffic management[J]. IEEE communications magazine, 2014, 52(5):104-110.
- [10] BARTOLI G, FANTACCI R, MARABISSI D. AeroMACS: A new perspective for mobile airport communications and services[J]. IEEE wireless communications, 2013, 20(6):44-50.
- [11] MORLET C, ONGARO F, RICARD N, et al. ESA Iris programme: design options for the satellite communication sub-network of the European air traffic management system[C]// 29th Digital Avionics Systems Conference, Salt Lake City: IEEE/AIAA 2010:3.C.1-1 - 3.C.1-13.
- [12] NEJI N, LACERDA R D, AZOULAY A E, et al. Survey on the future aeronautical communication system and its development for continental communications[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2013, 62(1):182-191.
- [13] SAJATOVIC M, HAINDL B, SCHNELL M. L-DACS1 system definition proposal: deliverable D2[Z]. EUROCONTROL, Version 1.0, Brussels, Belgium, 2009.
- [14] FISTAS N. L-DACS2 system definition proposal: deliverable D2[Z]. EUROCONTROL, Version 1.0, Brussels, Belgium, Tech. Rep., 2009.
- [15] JAIN R, TEMPLIN F, YIN K S. Analysis of L-band digital aeronautical communication systems: L-DACS1 and L-DACS2[C]// Aerospace Conference, Montana, 2011:1-10.
- [16] FILIP A, SHUTIN D, SCHNELL M. LDACS1-based non-cooperative surveillance[C]// Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, Herndon, VA, 2014:O1-1 - O1-10.
- [17] SCHNECKENBURGER N, SHUTIN D, SCHNELL M. Precise aeronautical ground based navigation using LDACS1[C] // Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, Herndon, VA, 2012: B1-1-B1-10.