

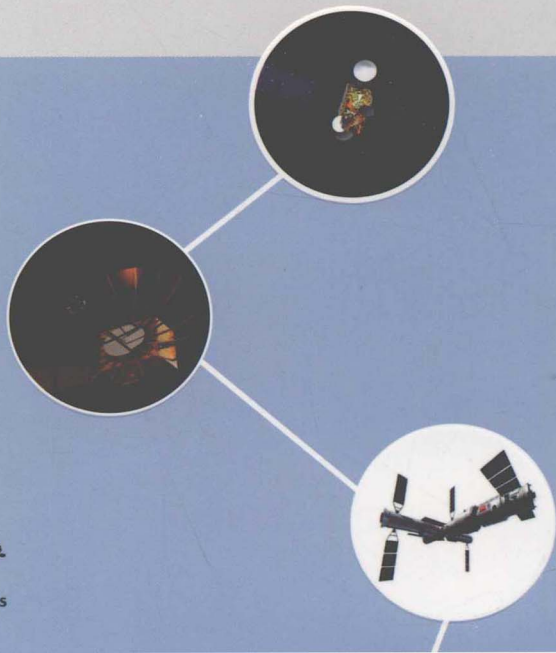
“十三五”国家重点出版规划项目

空间飞行器工程丛书

航天器 通信

spacecraft Communication

李力田 张拯宁 郑晓天 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

“十三五”国家重点出版规划项目
空间飞行器工程丛书

航天器通信

Spacecraft Communication

■ 李力田 张拯宁 郑晓天 著



国防工业出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书系统讲解了航天器通信系统的主要理论知识和工程技术。主要包括基本概念、设计思想、频率和轨道资源、系统构成、空间段和地面段的基本原理、通信链路设计、通信容量的扩展、安全与防护、系统测试、工程中的特殊问题及典型应用,并介绍了近年来刚得到应用的一些新技术。

本书可作为空间飞行器设计专业和卫星、航天器通信专业方向高年级本科生或研究生的专业教材,也可供从事航天器通信系统设计的总体或分系统设计师、相关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

航天器通信/李力田,张拯宁,郑晓天著. —北京:
国防工业出版社, 2018.9

(空间飞行器工程丛书)

ISBN 978-7-118-11569-7

I. ①航… II. ①李… ②张… ③郑… III. ①航天通
信 IV. ①TN927

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第101243号

航天器通信

丛 书 策 划	管明林
责 任 编 辑	管明林
出 版 发 行	国防工业出版社 (010-88540717 010-88540777)
地 址 邮 编	北京市海淀区紫竹院南路23号, 100048
经 售	新华书店
印 刷	北京龙世杰印刷有限公司印刷
开 本	710×1000 1/16
印 张	19 ¹ / ₂
印 数	1-2000册
字 数	376千字
版 印 次	2018年9月第1版第1次印刷
定 价	98.00元 (本书如有印装错误, 我社负责调换)

“空间飞行器工程丛书” 编审委员会

顾 问 吴宏鑫 叶培建

主 任 委 员 李 明

副主任委员 刘瑞生

委 员 王 翔 王永富 朱北园 刘天雄
(按姓氏笔画排序) 刘战捷 向树红 李 杰 李劲东

邱家稳 张 明 张柏楠 周志成

赵和平 徐 鹏 曹桂兴

秘 书 蒋耀光 管明林

《航天器通信》主要总结了作者多年从事航天器通信系统研究与设计工作的经验,同时也吸纳了近几年航天器通信技术发展的最新成果。本书主要包括四部分内容,第一部分“系统概述”阐述航天器通信的概念、应用领域、系统的构成以及可用的轨道和频率资源;第二部分“基本原理”阐述通信链路设计以及航天器通信涉及的模拟信号及数字信号传输的基本原理;第三部分“系统技术”阐述空间段、地面段的组成和基本原理,通信容量的扩展、系统的安全与防护、网络化、系统测试以及工程中的特殊问题;第四部分“发展与展望”介绍新型技术的发展与应用、应用领域的扩展以及对发展趋势的展望。

本书以航天器通信系统空间段的相关技术为重点,特点是与工程实践紧密结合,吸纳了国内外航天器通信系统设计和应用中的许多工程经验。书中结合具体工程实例以及故障和失败案例给出了系统设计、分析以及重要分系统设计的实例。

本书的主要内容原为李力田研究员在中国空间技术研究院神舟学院给研究生和博士生授课的讲稿。张拯宁同志在其后使用此讲稿授课,根据最新的技术发展趋势作了必要的补充并将它整理成书稿;郑晓天同志补充了关于航天器通信地面系统的一些内容。本书的写作过程先后历经三年,充分总结了中国空间技术研究院在航天器通信技术领域几十年的工程经验和神舟学院数十年的《航天器通信》课程教学经验,并尽可能引入了近几年来快速发展的空间量子通信、空间激光通信等新技术以便拓展思路。此外,中国空间技术研究院的其他专家也对本书的成稿给予了许多建议和帮助,作者的家人也给予了大力支持和

鼓励,在此一并致谢。

中国空间技术研究院组织“空间飞行器工程丛书”,内容涉及航天器总体设计、空间数据系统、航天器天线等内容,本书作为丛书中的一本,与其他教材相互协调,共同组成航天器设计研究生教材的完整体系。由于航天器通信势必与其他相关技术产生交集,因此,与丛书中其他教材有重叠的部分,本书不予详述,只介绍一些重要和必备的知识。

本书面向高等院校学生以及从事航天器通信系统研究、设计、制造、使用的工程技术人员,也可以作为高校通信专业、飞行器设计专业高年级本科生和研究生的教材或参考书。适合具备一定通信专业基础并且即将从事航天器通信系统设计的总体和分系统设计师学习参考。

作者

2017年10月

第 1 章 概论	1
1.1 航天器通信的定义	1
1.2 航天器通信的应用领域	2
1.3 航天器通信技术与系统的快速发展	3
1.4 通信系统的模型	4
1.5 航天器的分类	5
1.6 航天器通信简史	5
1.6.1 航天器通信技术的发展历程	5
1.6.2 中国航天器通信技术的发展历程	8
1.7 航天器通信系统组成	10
1.7.1 空间段	10
1.7.2 地面段	10
1.7.3 用户段	11
1.8 航天器通信的特点	11
第 2 章 频率与轨道资源	13
2.1 频率资源	13
2.1.1 频段划分	13
2.1.2 空间通信用频率资源	15
2.2 轨道资源	17
2.2.1 轨道理论概述	17
2.2.2 航天器通信常用轨道	25
2.2.3 轨道覆盖	31
2.3 频率和轨道位置的分配和协调	32
第 3 章 模拟信号传输	37
3.1 消息与信息	37

3.2	调制与解调	38
3.3	模拟通信系统	38
3.4	角度调制信号的频谱	40
3.5	调频与鉴频	42
3.6	调相与鉴相	46
第4章	数字信号传输	49
4.1	概述	49
4.2	模拟信号的数字化传输	49
4.2.1	采样	50
4.2.2	量化	51
4.2.3	编码	52
4.3	数字信号的基带传输	53
4.3.1	数字基带信号	53
4.3.2	数字基带信号传输	54
4.4	数字信号的射频传输	57
4.4.1	BPSK 调制	57
4.4.2	QPSK 与高阶调制	59
4.4.3	同步误差及其影响	61
4.4.4	不同调制和解调方式的抗噪声性能	62
第5章	信源编码与信道编码	63
5.1	概述	63
5.2	信息论与香农定理	65
5.3	信源编码与数据压缩	66
5.4	差错控制编码	68
5.4.1	差错控制	68
5.4.2	信道编码	69
5.4.3	码距与检错纠错能力	72
5.4.4	线性分组码	74
5.4.5	卷积码	76
5.4.6	交织	79
5.4.7	级联码	80
5.4.8	迭代译码	81

第 6 章 航天器平台	83
6.1 概述	83
6.2 结构与机构分系统	86
6.2.1 平台结构	86
6.2.2 太阳电池翼	88
6.3 姿轨控与推进分系统	89
6.3.1 姿轨控与推进分系统的功能与组成	89
6.3.2 姿态敏感器	90
6.3.3 执行机构	90
6.3.4 姿态控制方式	92
6.3.5 轨道测量与控制	94
6.4 热控分系统	95
6.4.1 热控技术	95
6.4.2 热控方法	96
6.5 测控和数管分系统	97
6.5.1 遥测	97
6.5.2 遥控	98
6.5.3 数据管理	98
6.5.4 CCSDS 标准	99
6.6 电源与供配电分系统	100
6.6.1 能量产生装置	100
6.6.2 能量储存装置	101
6.6.3 电源管理和供配电	102
第 7 章 通信有效载荷	103
7.1 概述	103
7.2 主要性能参数	104
7.2.1 通信功能指标	104
7.2.2 通信效率指标	104
7.2.3 通信质量指标	107
7.3 通信转发器	107
7.3.1 透明型转发器	107
7.3.2 处理型转发器	118
7.4 通信天线	120

7.4.1	天线基本知识	120
7.4.2	反射面天线	123
7.4.3	喇叭天线与馈源	127
7.4.4	天线结构与机构	128
7.5	跟踪与捕获	133
7.5.1	单向搜索跟踪	133
7.5.2	双向跟踪	134
7.5.3	引导跟踪	135
7.5.4	信号捕获	135
第8章	航天器通信地面系统	137
8.1	地面测控网	137
8.1.1	地面测控网的组成	137
8.1.2	地面测控网在各阶段的任务	139
8.1.3	测量体制	140
8.1.4	地面测控站	141
8.2	地面应用系统	147
8.2.1	典型地面应用系统组成	147
8.2.2	地面关口站组成及工作原理	149
8.2.3	用户终端	156
第9章	通信链路设计	158
9.1	信息速率	158
9.2	带宽	159
9.3	信噪比	159
9.4	等效全向辐射功率	160
9.5	路径损耗	162
9.5.1	自由空间传输损耗	162
9.5.2	大气衰减	163
9.6	接收端的噪声	170
9.6.1	天线噪声	170
9.6.2	接收机噪声	171
9.6.3	馈线影响	171
9.6.4	接收系统噪声	172
9.7	接收系统品质	172

9.8 链路设计	174
9.8.1 链路可用度	174
9.8.2 上行链路	174
9.8.3 下行链路	176
9.8.4 再生处理型转发器的链路设计	177
9.8.5 星间链路	177
第10章 通信容量的扩展	178
10.1 天线优化	178
10.1.1 天线波束覆形	178
10.1.2 多波束天线	181
10.1.3 地形匹配天线	184
10.1.4 双栅天线	184
10.2 提高信噪比	185
10.2.1 系统设计	185
10.2.2 降低天线噪声	186
10.2.3 降低接收机噪声	186
10.2.4 减少馈线损耗	186
10.3 通道化放大和动态功率分配	187
10.4 充分利用带宽	188
10.4.1 频率复用	188
10.4.2 星上切换	189
第11章 信息安全与防护	192
11.1 信息安全的内涵	192
11.2 加密技术	194
11.2.1 对称密钥加密	194
11.2.2 公开密钥加密	195
11.2.3 数字签名	196
11.3 抗干扰	197
11.3.1 航天器通信中的干扰	197
11.3.2 抗干扰技术	198
11.3.3 干扰源定位	199
11.4 扩谱通信	200
11.4.1 伪随机码	200

11.4.2	直接序列扩谱	202
11.4.3	跳频扩谱	204
11.4.4	跳时扩谱	205
11.4.5	线性调频扩谱	206
11.4.6	混合扩谱系统	207
11.4.7	应用情况	207
11.5	量子通信	208
11.6	航天器通信系统安全防护实例	208
第 12 章	航天器通信系统的特殊问题	211
12.1	电磁兼容性	211
12.1.1	电磁兼容性设计原理	211
12.1.2	航天器通信系统的 EMC 设计	212
12.1.3	杂散干扰	214
12.1.4	无源互调干扰	216
12.2	可靠性设计与备份	217
12.3	空间环境有关问题	222
12.3.1	低气压放电	222
12.3.2	微放电	224
12.3.3	微重力	225
12.3.4	热控制	226
12.3.5	防辐照	228
12.3.6	气压、湿度变化	230
12.4	设备状态的检查和监测	231
12.4.1	检测、维护点的设置	231
12.4.2	星地设备性能匹配性的验证	232
第 13 章	航天器通信系统的测试	233
13.1	地面支持设备	234
13.2	低气压放电和微放电测试	235
13.3	互调测试	236
13.3.1	闭合场元、部件测试	237
13.3.2	开放场元、部件测试	237
13.3.3	系统级测试	238
13.4	与微重力有关的测试问题	238

13.5	星载通信系统的测试	240
13.6	星地对接试验	243
13.7	在轨测试	244
第 14 章	航天器通信系统的接入和网络化	246
14.1	多址接入	246
14.1.1	频分多址	246
14.1.2	时分多址	248
14.1.3	码分多址	251
14.1.4	空分多址	251
14.2	网络的分层结构	253
14.2.1	OSI 参考模型	253
14.2.2	TCP/IP 模型	254
14.3	卫星网络	255
14.3.1	ATM 卫星网络	255
14.3.2	TCP/IP 卫星网络	256
第 15 章	航天器通信系统实例与典型应用系统	260
15.1	鑫诺一号卫星通信系统实例	260
15.1.1	系统简介	260
15.1.2	有效载荷	261
15.1.3	卫星平台	266
15.1.4	发射入轨	269
15.1.5	卫星运行	270
15.1.6	应用系统	272
15.2	典型应用系统	274
15.2.1	VSAT 专用网络	274
15.2.2	Inmarsat 卫星宽带网络	275
15.2.3	卫星电视	277
15.2.4	卫星数字广播服务	281
15.2.5	移动通信应用	286
第 16 章	应用领域的扩展和技术展望	290
16.1	卫星遥感	290
16.2	卫星导航定位	292

16.3	载人航天通信	293
16.4	深空探测通信	293
16.5	量子空间通信	295
16.6	技术发展趋势及展望	295
参考文献		297

第 1 章

概 论

1.1 航天器通信的定义

自人类社会形成以来,每一次重大的社会进步都必然伴随着通信技术的进步,或者说,通信技术的进步也极大地促进了人类社会生产力的进步。进入互联网时代,通信的便捷和快速彻底改变了人类的生产和生活方式。21 世纪的第二个十年,移动互联网的快速发展,更是将每一个人类个体几乎无时无刻、随时随地地联系在一起,这一切都离不开通信技术的发展与进步。

自苏联发射第一颗人造卫星,加加林作为第一个人类成员进入太空,人类社会正式进入了太空时代。实际上人类发射的早期应用卫星就是用于通信的目的,借助卫星作中继站,可以极大地拓展通信的范围。

将通过卫星进行中继的地面通信体之间的通信称为卫星通信,并将用于这一目的的卫星称为通信卫星。卫星通信的信源和信宿都在地球上,这些直接对卫星发射/接收卫星中继信号的设备称为卫星通信地球站或地球站,有时也称为卫星通信的终端。更广义地讲,凡是通过卫星进行的通信均可称为卫星通信,此时有可能卫星本身就是信源或者信宿,或者既是信源又是信宿。

卫星、载人飞船、空间站、深空探测器都属于航天器的概念,因此,所有通过航天器进行的通信就可以称为航天器通信。不仅通信卫星对地的中继通信,保障各类航天器发射和运行的测控通信、对地观测卫星的数传通信、导航卫星的导航报文传输等,广义上都属于航天器通信的范畴。

展望航天活动的未来,人类开展各种各样的空间活动,终归是要到距离地球更远的地方去,但是不论走多远,总要与地球这个共同和永恒的家园联络。距离地球越远,遇到的困难越大。这其中少不了能源、制导与导航等关键问题的解决,但是通信问题的解决始终是其中最重要的一环。

1.2 航天器通信的应用领域

航天器通信在所有的航天领域都有应用,目前主要的应用方向包括以下方面:

(1) 在整个航天任务中,需要运载火箭与地面测控站之间保持测轨、测控的畅通;卫星或飞船与地面控制中心之间的通信、测控;航天器之间的通信、测控等。

(2) 在各种卫星应用系统中,卫星通信应用最为广泛。大量的静止轨道通信卫星为全世界提供了繁多的固定或移动地球站之间的语音、图像和数据通信服务;广播卫星承担了可靠、便捷的直接到户甚至直接到手持终端的电视和高音质音频广播服务;移动卫星系统使身处在地球任意两个角落的个人可以使用手持终端进行双向通信;中继通信卫星使不可见弧段上的卫星或飞船与地面站的通信得以维持;宽带多媒体卫星使多媒体网络如虎添翼;各种各样的军用通信卫星提供了高保密、高抗干扰、战争环境下高存活力的通信保障。

(3) 卫星通信与其他卫星应用系统,特别是与它们的通信功能配合,可以形成更多种功能强大的系统。例如个人救援、搜救系统;巡航导弹的“人在回路”制导;导弹预警、反导等各种各样的武器系统。

(4) 卫星遥感系统中,传输型遥感卫星需要将遥感器获得的数据用数传设备直接或经过中继卫星发送到地面数据接收站。遥感器中除了光学等遥感器外,无线电遥感设备采用的技术也属于通信领域。微波辐射计、微波高度计、微波散射计、合成孔径雷达,无线电侦察、侦听设备等广义上也可以认为属于航天器通信技术的应用领域。

(5) 卫星导航定位系统中,地面管理站网对卫星的测控、数据注入;卫星对地面进行的定位、授时信号广播;有些系统中卫星定位系统,例如北斗一号卫星定位系统,用户通过地面控制中心进行的数据通信。

(6) 气象卫星除了作为遥感卫星需要用通信手段将原始气象数据下传外,有些气象卫星,例如风云二号卫星,含有两类通信业务:其一是广播转发经气象中心处理后的云图,供各地用户接收使用;其二是将气象数据采集平台上传的信息转发到卫星的地面控制及数据采集中心,向气象中心提供各个当地的实时气象数据。

(7) 载人航天飞行任务中,航天员的语音、形象、生命数据,飞船的测控显然也属于航天器通信的范畴。

(8) 深空探测任务中,以探月为例,地面、运载、指令舱、登月舱、月球车等各部分都需要多种互为备份的通信手段。

现代社会,通信网络早已成为社会的神经系统,无时无刻不在传递着话音、数据、文本、图像、视频等各种信息。航天器通信系统已成为国家通信基础设施的重要组成部分,同时也是空间基础设施的核心内容。

由于航天器通信系统涉及面很广,本书主要聚焦于卫星通信,并以通信卫星有效载荷为重点,同时兼顾各种航天器的通信技术。

1.3 航天器通信技术与系统的快速发展

截至2015年底,全球已成功发射7293个航天器,其中通信卫星2056颗;保持在轨的有1311个航天器,其中超过一半都属于广播和通信卫星。2015年全球总共发射约259个航天器(含小卫星和微小卫星),其中广播通信卫星53个,约占到全部数量的1/4。

总体来讲,随着人类活动范围的不断扩大和信息消费的不断增长,对移动通信、宽带通信、大范围通信乃至全球通信的需求日益增加。通信技术按照通信手段可以划分为有线通信和无线通信。无线通信又可以按照使用电磁波的波长不同进一步划分为长波通信、中波通信、短波通信和微波通信,近年来又发展出光通信。有线通信手段由于需要布设电缆或光缆,通信距离的增长与通信成本的增长成正比,并且难以覆盖全球任意地区;中波和长波通信由于电磁波长的问题,难以发射;短波通信依赖于地球电离层的反射,容易受到干扰而难以稳定工作;微波通信的容量大,通信质量好,但是地面微波通信由于只能在无线电视距范围内进行,受到地球曲率的限制,通常作用距离都难以超过百公里量级(平原地区20m高的微波中继塔,通信距离约32km),如图1-1所示。为了克服地球曲率对微波通信的遮挡效应,人类将微波中继站搬到天上,从而诞生了能够覆盖全球的卫星通信。

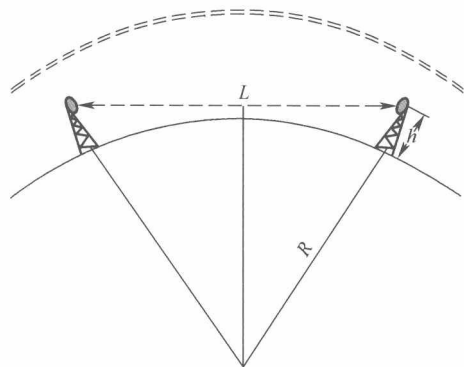


图 1-1 地面微波中继通信