



飞行器测控通信工程

Spacecraft TT&C and
Communication Engineering

刘嘉兴 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资

飞行器测控通信工程

Spacecraft TT&C and Communication Engineering

刘嘉兴 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

飞行器测控通信工程 / 刘嘉兴编著. —北京:国防工业出版社, 2010. 9

ISBN 978-7-118-06872-6

I. ①飞... II. ①刘... III. ①飞行器—飞行控制系统②飞行器—通信技术 IV. ①V249②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 151178 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 30½ 字数 540 千字

2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

飞行器测控通信是指对航天飞行器、临近空间飞行器和航空飞行器进行跟踪测轨、遥测、遥控和信息传输,它的功用:一是对飞行器进行跟踪测轨,即测量飞行器的位置、速度、加速度,以精确测定飞行器的轨道参数,确保其精确地进入预定轨道,或精确地打击目标,或提供飞行试验鉴定的数据;二是进行遥测,即将飞行器内传感器所采集到的数据,通过多路通信信道传输到远方的地面遥测接收点,以便及时了解飞行器的飞行状态、飞行器内仪器的工作情况和飞行员的生理状态,从而保证飞行任务的圆满完成;三是进行遥控,即利用多路通信信道,在地面对飞行器进行远距离的指令控制,以实现对飞行器的机动控制和在飞行器发生故障时发射“自毁”的“安全控制”指令;四是利用测控系统传输各种信息,这一功能使过去的测控系统在近代扩展为测控通信系统。可见,飞行器的试验与应用都离不开测控通信系统的支持,在当前对宇宙的开发和争夺制天权的竞争中,测控通信系统的重要性将更为突出。

测控通信系统的发展与其军事应用息息相关,它发展的第一个高峰始于第二次世界大战期间,德国对 V-2 火箭的研制,当时就利用由测轨设备、遥控设备、遥测设备组成的分离测控系统对火箭试验进行支持。第二次世界大战后,大国间的军备竞赛,使测控技术得到了飞速的发展,第二个高峰出现于 1966 年,当时美国用于“阿波罗”飞船登月的“统一 S 频段”测控系统(USB),将分离设备合而为一,解决了分离设备过于复杂、电磁兼容性差、飞行器负荷过重等缺陷。但当时的测控设备都安装于地面,受地球曲率限制,使其覆盖率不高。这类地基测控网的覆盖率仅 20% 左右,为克服这个缺陷,继而在 1983 年又出现了天基测控网——跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS)。形象地讲,TDRSS 是将测控站搬到同步轨道上,由上向下俯视地球,因而大大提高了测控覆盖率,利用三颗 TDRS 卫星及其星间链路就可使覆盖率达到 100%。当前的一个新的发展是深空测控通信系统,为了解开宇宙之谜,它所测控的飞行器是那样的遥远,飞行器所发出的电波要经过几个小时的传输才能到达地面,其信息的微弱可想而知,它需要采用最先进的电子信息技术,其技术水平处于测控通信领域的最前沿。以上的分离测控系统、USB 系统、TDRSS 和深空测控通信系统是测控通信系统发展的四

个里程碑。

在航天测控技术中,我国历经了几代产品的研制,现已具有自己的特色,不仅测控通信网的综合能力强,采用了较多的新技术,而且符合国际标准,具有国际联网能力,在国际上处于先进水平。

由于飞行器测控通信系统的应用日益广泛,特别在军事应用中的重要性日益增加,在很多情况下它是飞行器升空后和地面联系的唯一信息线,因此从事该工程系统研制、生产、使用、教学的人员越来越多,而这个技术领域的书籍又较少,为此作者结合多年来从事多个工程设备研制的实践、以作者承担的三个预研基金项目的研究结果和所发表的论文为基础,并学习、归纳了有关资料,完成了本书的撰写,希望能对研制、设计、生产、使用的科技工作者和大专院校的师生有所帮助。

测控通信系统的应用很广,已经不限于飞行器,在海、陆、空、天中都有应用。本书仅对较为重要的并在我国实用中已经应用或正在研制的七种系统,分为9章进行了介绍,它们是绪论、统一载波测控通信系统、跟踪与数据中继卫星系统、深空测控通信系统、相控阵测控通信系统、导弹靶场测量系统、临近空间飞行器测控与信息传输系统、混沌测控系统以及测控系统模拟、标校的新方法。

本书的撰写得到了作者工作单位——中国电子科技集团公司第十研究所和国防工业出版社的大力支持,很多内容体现了中国电子科技集团公司第十研究所多年来研制测控通信系统的成果,是大家共同奋斗的结晶,其中第8章的很多资料来自于作者与重庆通信学院何世彪教授等的协作课题结果。在本书撰写过程中杨士中院士审阅了原稿,雷厉研究员、张汉三研究员提出了宝贵意见,杨红俊同志提供了很多资料,大量的文字处理工作是由刘渝、刘燕萌完成的,在此一并致谢!

刘嘉兴
2010年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 测控通信系统的功能、地位和作用	3
1.3 测控通信系统的应用	5
1.3.1 对卫星的测控通信	5
1.3.2 导弹的测控	7
1.3.3 巡航导弹的测控	7
1.3.4 在常规靶场兵器外弹道测量中的应用	8
1.3.5 在无人机测控中的应用	8
1.3.6 在飞机遥测、遥控中的应用	9
1.3.7 在临近空间飞行器中的应用	9
1.3.8 在载人航天中的应用	9
1.3.9 在探月中的应用	10
1.3.10 在深空探测通信中的应用	14
参考文献	14
第 2 章 统一载波测控通信系统	15
2.1 引言	15
2.2 标准统一测控系统	15
2.2.1 概述	15
2.2.2 标准统一测控系统的组成及工作原理	19
2.2.3 标准统一测控系统的特点和主要技术问题	25
2.2.4 USB 系统对目标的捕获	33
2.2.5 标准统一测控系统中的组合干扰	43

2.3	扩频统一测控系统	51
2.3.1	引言	51
2.3.2	扩频统一测控系统多功能综合方法	52
2.3.3	扩频统一测控系统的组成及工作原理	57
2.3.4	扩频统一测控系统的特点和主要技术问题	59
2.4	Ka 频段测控通信系统	67
2.4.1	问题的提出	67
2.4.2	Ka 频段测控通信系统的特点	69
2.4.3	Ka 频段测控通信系统的主要技术问题	71
	参考文献	73
第 3 章	跟踪与数据中继卫星系统 (TDRSS)	74
3.1	引言	74
3.1.1	TDRSS 的基本概念	74
3.1.2	TDRSS 的发展历程	78
3.2	TDRSS 的特点及其多功能综合的基本原理	84
3.2.1	TDRSS 的特点	84
3.2.2	TDRSS 的定轨原理	87
3.2.3	目标跟踪体制	90
3.2.4	扩频测控与高速数据传输	92
3.3	TDRSS 的组成及工作原理	94
3.3.1	地面终端站	94
3.3.2	跟踪与数据中继卫星	99
3.3.3	用户航天器应答机	103
3.3.4	TDRSS 的捕获	104
3.3.5	TDRSS 的信号流程	106
3.4	TDRSS 中的 SMA	112
3.4.1	TDRSS 中多址业务的特点	112
3.4.2	SMA 的工作原理	114
3.4.3	TDRS 星上的阵列天线	121
3.4.4	星—地间的 FDM 传输	125

3.4.5	地面多波束形成	130
3.4.6	SMA 中的按需分配制度	148
3.4.7	SMA 中的数据传输体制	155
3.4.8	SMA 中的多址干扰	158
3.4.9	SMA“二重扩频”方案的设想	163
3.5	TDRSS 中信息传输与测控的关键技术	170
	参考文献	174
第4章	深空测控通信系统	175
4.1	引言	175
4.2	深空测控通信的特点	175
4.3	深空测控通信中的主要技术问题及其发展趋势	178
4.4	深空测控面临的挑战	190
4.5	深空测控中的测速技术	197
4.5.1	深空测速的特点	197
4.5.2	三种主要的深空测速体制	198
4.5.3	深空测速精度	198
4.5.4	日冕引起的测速误差	202
4.6	深空测控中的测距技术	204
4.6.1	深空测距的特点	204
4.6.2	深空测距的三种体制	205
4.6.3	三种测距体制的比较	232
4.7	深空测控中的测角技术	236
4.7.1	深空测角的特点	236
4.7.2	深空测角体制	236
4.8	深空测控中的数传体制	245
4.8.1	深空数传的特点	245
4.8.2	深空数传的信号形式	246
4.8.3	深空遥测	248
4.8.4	深空遥控	265
4.9	深空站天线的指向定位	268

4.9.1	概述	268
4.9.2	指向模式	268
4.9.3	盲指向	270
4.9.4	闭环指向	272
4.9.5	波束对准	274
4.9.6	70m 天线 X 频段波束偏移和 Ka 频段发射波束偏离	274
4.10	深空站的时/频系统	274
4.10.1	概述	274
4.10.2	功能	276
4.10.3	组成	276
4.10.4	频率与时间同步	280
4.11	深空测控工作频段的选择	281
4.12	深空站的低噪声工作模式	282
4.13	典型的深空测控通信系统	290
4.13.1	概述	290
4.13.2	美国深空网的天线	291
4.13.3	美国深空网的时/频系统	293
4.13.4	美国深空网的遥测接收系统	296
4.13.5	美国深空网的遥控系统	298
4.13.6	美国深空网的测距系统	300
4.13.7	美国深空网的测速系统	301
4.13.8	美国 34m 波束波导天线及其高频收/发系统	303
参考文献		312
第 5 章 相控阵测控通信系统		313
5.1	引言	313
5.2	相控阵测控通信系统的特点	314
5.3	相控阵测控通信系统的主要技术问题	315
5.4	相控阵天线的瞬时带宽	322
5.5	相控阵测角与测角精度	325

5.5.1	测角体制	325
5.5.2	相控阵的跟踪测角	328
5.5.3	相控阵的测角精度	335
5.6	“机扫+相扫”测控通信系统	338
5.6.1	概述	338
5.6.2	“机—相”扫相控阵测控系统的特点	339
5.6.3	“机—相”扫相控阵测控系统的组成与精度	341
5.7	一种“机—相”扫无人机多目标测控通信系统	342
5.7.1	概述	342
5.7.2	用途与功能	343
5.7.3	系统组成及框图	348
5.8	网格球形相控阵天线	350
	参考文献	352
第6章	导弹靶场测量系统	353
6.1	引言	353
6.2	导弹靶场高精度测量系统的特点	357
6.3	系统的功能及组成	358
6.3.1	导弹测控的功能	358
6.3.2	导弹测控系统的组成	359
6.4	多 RR 测量系统	361
6.4.1	中精度多 RR 测量系统	362
6.4.2	高精度多 RR 测量系统	366
6.5	靶场安控系统	374
6.5.1	概述	374
6.5.2	多站接力、备份的靶场安控系统	375
6.5.3	新型靶场安控系统	381
6.6	天基靶场及空基靶场	382
6.6.1	天基靶场	382
6.6.2	空基靶场	383
	参考文献	387

第 7 章 临近空间飞行器测控与信息传输系统	388
7.1 引言	388
7.2 临近空间飞行器测控系统的特点	388
7.3 临近空间飞行器测控系统的主要技术问题	395
7.4 高超声速飞行器的“黑障”问题	401
7.4.1 引言	401
7.4.2 产生黑障的原因	402
7.4.3 碰撞等离子吸收衰减的近似估算	403
7.4.4 “黑障”实例	407
7.4.5 减小黑障影响的措施	410
7.4.6 火焰衰减	412
7.5 X-43A 飞行试验靶场测控系统	413
7.5.1 靶场设备	414
7.5.2 数据捕获与传输	415
7.5.3 遥测数据捕获结果	418
参考文献	420
第 8 章 混沌测控系统	421
8.1 引言	421
8.2 混沌序列与 m、Gold 序列的比较	423
8.3 混沌序列的种类、比较和产生	426
8.3.1 混沌序列的种类	426
8.3.2 混沌序列的选择	429
8.3.3 码库的生成	431
8.3.4 混沌序列的产生方法	432
8.4 混沌同步	435
8.4.1 同一种混沌映射且输入相同的同步方案	436
8.4.2 差分混沌键控方案	437
8.5 截断混沌序列扩频测控通信系统	439
8.5.1 截断的周期混沌直扩测控系统	439

8.5.2 截断的周期混沌跳扩测控系统	440
8.6 无限混沌序列的测控通信系统	442
8.6.1 无限混沌序列的测速、测距方案	442
8.6.2 一种无限混沌序列测控方案	445
参考文献	447
第9章 模拟、标校的新方法	448
9.1 基于运动方程的动态模拟方法	448
9.1.1 基本原理	448
9.1.2 实现方案	449
9.2 利用射电星噪声的无塔校相方法	453
9.2.1 宽带信号下的比幅单脉冲跟踪	454
9.2.2 射电星宽带校相	455
9.2.3 射电星窄带校相	457
9.3 应用几何光学的距离标校方法	459
9.3.1 几何光学和物理光学	459
9.3.2 抛物面天线的几何关系	460
9.3.3 基于几何光学的偏馈校零法	461
参考文献	464

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Preface	1
1.2	Function, Position and Purpose	3
1.3	Applications	5
1.3.1	TT&C System for Satellite	5
1.3.2	TT&C System for Missile	7
1.3.3	TT&C System for Cruise Missile	7
1.3.4	Application in Weapon Outer Trajectory Measurement in Conventional Range	8
1.3.5	Application in UAV TT&C	8
1.3.6	Application in Aircraft Telemetry and Command	9
1.3.7	Application in Near Space Vehicle	9
1.3.8	Application in Manned Space Flight	9
1.3.9	Application in Lunar Observation	10
1.3.10	Application in Deep Space Observation	14
	References	14
Chapter 2	United Carrier TT&C and Telecommunication System	15
2.1	Introduction	15
2.2	Standard United Carrier TT&C System	15
2.2.1	General	15
2.2.2	Composition and Operation Principle	19
2.2.3	Features and Main Technical Problems	25

2.2.4	USB Target Acquisition	33
2.2.5	Combination Interference	43
2.3	Spread Spectrum United TT&C System	51
2.3.1	Introduction	51
2.3.2	Multi-Purpose Integration Methods	52
2.3.3	Composition and Operation Principle	57
2.3.4	Features and Main Technical Problems	59
2.4	Ka-band TT&C and Telecommunication System	67
2.4.1	Proposed Problems	67
2.4.2	Features	69
2.4.3	Main Technical Problems	71
	References	73
Chapter 3	Tracking and Data Relay Satellite System(TDRSS)	74
3.1	Introduction	74
3.1.1	Basic Concepts	74
3.1.2	History	78
3.2	Features and Basic Principle for Multi-purpose Integration Concept	84
3.2.1	Features	84
3.2.2	Orbit Determination Principle	87
3.2.3	Target Tracking System	90
3.2.4	Spread Spectrum TT&C and High-speed Data Transmission	92
3.3	Composition and Operation Principle	94
3.3.1	Ground Terminal Complex	94
3.3.2	Tracking and Data Relay Satellite	99
3.3.3	Transponder onboard User Spacecraft	103
3.3.4	Acquisition	104

3.3.5	Signal Flow	106
3.4	S-band Multiple Access (SMA) Service	112
3.4.1	Features	112
3.4.2	Operation Principle	114
3.4.3	Array Antenna onboard TDRS	121
3.4.4	Space-Ground FDM Transmission	125
3.4.5	Multiple Beam forming at Ground Station	130
3.4.6	Demand Assignment	148
3.4.7	Data Transmission System	155
3.4.8	MA Interference	158
3.4.9	Proposed Duplicate Spread Spectrum Concept	163
3.5	Key Technologies	170
	References	174
Chapter 4	Deep Space TT&C and Telecommunication System	175
4.1	Introduction	175
4.2	Features	175
4.3	Main Technical Problems and Development Trends	178
4.4	Challenges	190
4.5	Range Rate Measurement	197
4.5.1	Features	197
4.5.2	Three Major Range Rate Measurement Systems	198
4.5.3	Accuracy	198
4.5.4	Range Rate Measurement Error due to Sun glow	202
4.6	Range Measurement	204
4.6.1	Features	204
4.6.2	Three Major Range Measurement Systems	205
4.6.3	Comparison of Three Range Measurement Systems	232
4.7	Angle Measurement	236

4.7.1	Features	236
4.7.2	Systems	236
4.8	Data Transmission	245
4.8.1	Features	245
4.8.2	Signal Waveform	246
4.8.3	Telemetry	248
4.8.4	Telecommand	265
4.9	Antenna Pointing and Positioning at Deep Space Ground Station	268
4.9.1	General	268
4.9.2	Pointing Modes	268
4.9.3	Blind Pointing	270
4.9.4	Closed-Loop Pointing	272
4.9.5	Beam Aligning	274
4.9.6	70m Antenna X-band Beam Offset and Ka-band Transmitting Beam Deviation	274
4.10	Timing and Frequency System	274
4.10.1	General	274
4.10.2	Function	276
4.10.3	Composition	276
4.10.4	Frequency and Time Synchronization	280
4.11	Operational Band Selection	281
4.12	Low-Noise Operation Mode for Deep Space Ground Station	282
4.13	Typical Systems	290
4.13.1	General	290
4.13.2	Antenna in Deep Space Network(DSN)	291
4.13.3	Timing and Frequency Reference System in DSN	293
4.13.4	Telemetry Receiving System in DSN	296
4.13.5	Telecommand System in DSN	298

4.13.6	Range Measurement System in DSN	300
4.13.7	Range Rate Measurement System in DSN	301
4.13.8	34m Beam Waveguide Antenna and Its HF Tx/Rx System	303
	References	312
Chapter 5	Phased Array TT&C and Telecommunication System	313
5.1	Introduction	313
5.2	Features	314
5.3	Main Technical Problems	315
5.4	Antenna Instantaneous Bandwidth	322
5.5	Angle Measurement and Accuracy	325
5.5.1	Angle Measurement Systems	325
5.5.2	Tracking and Angle Measurement	328
5.5.3	Angle Measurement Accuracy	335
5.6	Mechanical/Phase Scanning System	338
5.6.1	General	338
5.6.2	Features	339
5.6.3	Composition and Accuracy	341
5.7	A Multiple-UAV TT&C and Telecommunication System Based on Mechanical/Phase Scanning Antenna	342
5.7.1	Purpose and Functions	342
5.7.2	Main Technical Problems	343
5.7.3	System Composition and Block Diagram	348
5.8	Grid Dome Phased Array Antenna	350
	References	352
Chapter 6	Missile Range Measurement System	353
6.1	Introduction	353