

飞行器

测控与信息传输技术

Spacecraft TT&C and Information
Transmission Technology



刘嘉兴 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

飞行器测控 与信息传输技术

Spacecraft TT&C and Information
Transmission Technology

刘嘉兴 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

飞行器测控与信息传输技术/刘嘉兴编著. —北京:国防工业出版社, 2011. 10

ISBN 978-7-118-07213-6

I. ①飞... II. ①刘... III. ①飞行器—飞行控制系统
IV. ①V249.122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 110099 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 28 $\frac{1}{4}$ 字数 502 千字

2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 86.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作

需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海			
副主任委员	宋家树	蔡 镭	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	彭华良	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	吴有生	吴宏鑫
	何新贵	张信威	陈良惠	陈冀胜
	周一宇	赵万生	赵凤起	崔尔杰
	韩祖南	傅惠民	魏炳波	

前 言

测控是测量与控制的简称,测量是指对飞行器飞行轨迹的测量和遥测,控制是指对飞行器进行遥控。“飞行器信息传输”是指将飞行器上和地面站中获取或产生的信息进行相互传输,所传输的信息包括遥测、遥控、遥感、侦察、探测、制导、科学试验、空间环境观察以及传统的声音、图像等,这些信息既包含了空中平台正常工作所必须的遥控、遥测信息(通常称为工程测控),又包含了空中平台的有效载荷(P/L)所获得或转发的各种应用信息以及对(P/L)进行遥控、遥测的信息(通常称为业务测控),在当今信息时代,其含义还在进一步扩展和深化。

随着技术的发展,测控与信息传输已有机地联系在一起,密不可分,表现在:功能上是相辅相成的,信号设计上是统一的,设备上综合在一起的,内容上遥测、遥控技术本身就是信息传输,从发展上看信息战及综合电子信息系统要求测控与信息传输统一设计并综合到一个设备中。因此,本书的内容突出了测控与信息传输相结合的特点,特别是加强了信息传输方面的内容,着重介绍各类飞行器测控通信系统共有的基础技术,以期能为读者更深刻地认识各类测控系统和解决工程实际问题提供理论基础。

全书包括测控与信息传输两大部分,共分为5章,第1章介绍了测控与信息传输技术的过去、现在与未来;第2章介绍了飞行器的跟踪测轨技术,主要介绍了连续波雷达的测速、测距、测角技术以及定位技术;第3章介绍了模拟传输和数字传输技术,除结合测控通信特点介绍了基本理论知识外,还介绍了遥测、遥控、遥感技术;第4章介绍了扩频技术在测控通信中的应用;第5章结合测控通信中无线传输通道中的特殊问题介绍了测控频段的发展,传输中的雨衰和大气衰减、电波传播对测轨精度的影响、多径传输的影响、极化分集成等。

本书的特点是全书贯穿测控与信息传输相结合的思想,结合了设备研制的实践,理论结合实际,以介绍技术理论基础为主要目的。

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,在所发表的论文和培训教材的基础上学习、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。

本书的撰写得到了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第十研究所近 50 年来研制测控通信系统的成果,是大家共同奋斗的结晶。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

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 测控与信息传输	1
1.3 测控与信息传输系统的任务、功能和分类	4
1.4 测控通信技术的过去	7
1.5 测控通信技术的现在	11
1.6 测控通信技术的未来	13
1.6.1 测控信息网的发展趋势	14
1.6.2 测控通信设备的发展趋势	17
1.6.3 测控通信中共性单项技术的发展趋势	22
参考文献	25
第 2 章 跟踪测轨技术	26
2.1 概述	26
2.2 飞行器定位及其轨迹测量	27
2.2.1 定位	27
2.2.2 布站几何与定位精度	30
2.2.3 轨迹测量体制	37
2.3 测速技术	39
2.3.1 多普勒测速原理	39
2.3.2 多普勒频率测量方法	43
2.3.3 测速精度分析及其频域分析法	45
2.4 测距技术	77
2.4.1 连续波测距原理	77
2.4.2 测距误差分析及其矢量分析法	94

2.4.3	测距精度计算	117
2.5	测角技术	122
2.5.1	天线跟踪测角技术	122
2.5.2	干涉仪测角	130
2.5.3	干涉仪在深空测控中的应用	133
2.5.4	角跟踪精度计算	141
2.5.5	宽带信号的角跟踪和四通道单脉冲方案	144
	参考文献	155
第3章	信息传输技术	156
3.1	测控通信中的模拟传输技术	156
3.1.1	模拟调制	157
3.1.2	模拟信号的解调	164
3.2	测控通信中的数字传输技术	176
3.2.1	概述	176
3.2.2	数字信息传输的最佳传输响应	178
3.2.3	数字调制/解调技术	185
3.2.4	信道编/译码技术	198
3.2.5	噪声对数传误码率的影响	214
3.2.6	线性失真对数传误码率的影响	218
3.2.7	非线性失真对数传误码率的影响	230
3.3	遥测信息传输技术	245
3.3.1	概述	245
3.3.2	遥测信息传输系统的基本模型	247
3.3.3	数字遥测的同步技术	251
3.3.4	分包遥测技术	253
3.3.5	深空遥测技术	256
3.4	遥控信息传输技术	262
3.4.1	概述	262
3.4.2	遥控信息传输系统基本模型	266
3.4.3	遥控差错控制技术	273
3.5	遥感信息传输技术	276

3.5.1	概述	276
3.5.2	遥感信息传输的基本模型及主要技术问题	279
3.5.3	遥感数据地面接收站的功能、组成和工作原理	287
3.5.4	高速数据的调制/解调	291
参考文献		296
第4章	扩频测控技术	298
4.1	概述	298
4.2	扩频测控的特点	298
4.3	扩频测控的基本方式	301
4.3.1	直接序列扩频	302
4.3.2	跳频扩频	309
4.3.3	直扩、跳扩的混合扩频	315
4.3.4	跳时扩频	316
4.4	扩频测控信号的捕获与跟踪	316
4.5	直接扩频测控的测量精度和跟踪门限	325
4.5.1	扩频接收机载波环的相位误差	325
4.5.2	扩频测控的距离测量误差	327
4.5.3	扩频测控的速度测量误差	328
4.6	扩频测控系统的抗干扰	329
4.6.1	干扰类型	329
4.6.2	对抗脉冲干扰和智能干扰	330
4.6.3	阻塞噪声干扰情况下的误码率	331
4.6.4	部分带宽干扰或脉冲干扰下的误码率	333
4.7	混沌扩频测控技术	334
4.7.1	混沌序列的特性	334
4.7.2	混沌直扩测控系统	337
4.7.3	混沌跳扩测控系统	338
4.7.4	混沌跳码	340
参考文献		340
第5章	测控通信中无线传输信道的特殊问题	341
5.1	测控通信的工作频段	341

5.1.1	测控频段选择的原则	341
5.1.2	测控频段选择的限制	343
5.1.3	国外发展情况	345
5.1.4	测控通信系统向 Ka 频段发展	349
5.2	信号传输信道中的降雨衰减和大气衰减	360
5.2.1	雨衰研究的重要性	360
5.2.2	雨衰的特点	360
5.2.3	雨衰的计算	361
5.2.4	降雨引起的系统噪声温度增加	366
5.2.5	抗雨衰技术	367
5.2.6	信号传输信道中的大气衰减	370
5.3	电波传播特性对测轨精度的影响	373
5.3.1	概述	373
5.3.2	对流层电波折射误差的修正	378
5.3.3	电离层电波折射误差的修正	381
5.3.4	影响修正精度的因素	385
5.4	多径传输的影响	385
5.4.1	多径效应引起的三种快衰落	386
5.4.2	反射系数的性质	389
5.4.3	多径传播时的路径损耗和起伏衰落	394
5.4.4	多径传播引起的测轨误差	398
5.4.5	减小多径干扰的措施	402
5.5	极化分集合成技术	416
5.5.1	概述	416
5.5.2	信号合成方式和合成准则	418
5.5.3	测控通信中常用的极化分集合成技术	421
5.5.4	测控通信系统中一种典型的极化分集合成方案	428
	参考文献	432

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 General	1
1.2 TT&C and Information Transmission	1
1.3 Missions, Functions and Categories of TT&C and Data Transmission System	4
1.4 History of TT&C and Communication Technology	7
1.5 Present of TT&C and Communication Technology	11
1.6 Future of TT&C and Communication Technology	13
1.6.1 Development Trend of TT&C Information Network	14
1.6.2 Development Trend of TT&C and Communication Equipment	17
1.6.3 Development Trend of Common Technologies in TT&C and Communication	22
References	25
Chapter 2 Tracking and Orbit Measurement	26
2.1 General	26
2.2 Spacecraft Locating and Trajectory Measurement	27
2.2.1 Location	27
2.2.2 Station Distribution Geometry and Location Accuracy	30
2.2.3 Trajectory Measurement Systems	37
2.3 Range Rate Measurement	39
2.3.1 Doppler Range Rate Measurement Concept	39

2.3.2	Doppler Frequency Measurement Methods	43
2.3.3	Range Rate Measurement Accuracy Analysis and Its Frequency Domain Analysis Method	45
2.4	Range Measurement	77
2.4.1	Continuous Wave Range Measurement Concept	77
2.4.2	Range Measurement Error Analysis Analysis	94
2.4.3	Calculation of Range Measurement Accuracy and Its Vector Analysis Method	117
2.5	Angle Measurement	122
2.5.1	Antenna Tracking Technology for Angle Measurement	122
2.5.2	Interferometer for Angle Measurement	130
2.5.3	Application of Interferometer in Deep Space TT&C	133
2.5.4	Calculation of Angle Tracking Accuracy	141
2.5.5	Angle tracking of Wideband signal and Its Four-channel Monopulse Solution	144
	References	155
Chapter 3	Data Transmission	156
3.1	Analog Transmission	156
3.1.1	Analog Modulation	157
3.1.2	Analog Signal Demodulation	164
3.2	Digital Transmission	176
3.2.1	General	176
3.2.2	Optimal Responding for Digital Data Transmission	178
3.2.3	Digital Modulation/demodulation	185
3.2.4	Channel Encoding/Decoding	198
3.2.5	Noise Effect on Data Transmission BER	214
3.2.6	Linear Distortion Effect on Data Transmission BER	218
3.2.7	Non-linear Distortion Effect on Data	

Transmission BER	230
3.3 Telemetry Data Transmission	245
3.3.1 General	245
3.3.2 Base Model of Telemetry Data Transmission System	247
3.3.3 Digital Telemetry Synchronization	251
3.3.4 Package Telemetry	253
3.3.5 Deep Space Telemetry	256
3.4 Telecommand Data Transmission	262
3.4.1 General	262
3.4.2 Base Model of Telecommand Data Transmission System	266
3.4.3 Telecommand Error Control	273
3.5 Remote Sense Information Transmission	276
3.5.1 General	276
3.5.2 Base model and Main Technical Issues for Remote Sense Information Transmission	279
3.5.3 Functions, Composition and Operational Concept of Ground Receiving Station for Remote Sense Satellite	287
3.5.4 High Speed Data Modulation/Demodulation	291
References	296
Chapter 4 Spread Spectrum TT&C	298
4.1 General	298
4.2 Spread Spectrum TT&C Features	298
4.3 Basic Methods for Spread Spectrum TT&C	301
4.3.1 Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)	302
4.3.2 Hopping Frequency Spread Spectrum (HFSS)	309
4.3.3 Composed Spread Spectrum of DSSS and HF	315
4.3.4 Hopping Time Spread Spectrum	316
4.4 Acquisition and Tracking of Spread Spectrum	

TT&C Signals	316
4.5 Measurement Accuracy and Tracking Threshold for direct Spread Spectrum TT&C	325
4.5.1 Phase Error in Carrier Loop of Spread Spectrum Receiver	325
4.5.2 Range Measurement Error for Spread Spectrum TT&C	327
4.5.3 Range Rate Measurement Error for Spread Spectrum TT&C	328
4.6 Anti-jamming for Spread Spectrum TT&C	329
4.6.1 Kinds of Interferences	329
4.6.2 Countermeasure to Pulse and Intelligence Interferences	330
4.6.3 BER with Blocking Noise Interference	331
4.6.4 BER with Part of Bandwidth or Pulse Interference	333
4.7 Chaotic Spread Spectrum TT&C	334
4.7.1 Characteristics of Chaotic Sequence	334
4.7.2 Chaotic DSSS TT&C System	337
4.7.3 Chaotic HFSS TT&C System	338
4.7.4 Chaotic Codes Hopping	340
References	340

Chapter 5 Special Issues in Radio Transmission Channel for TT&C and Communication	341
5.1 Operation Band for TT&C and Communication	341
5.1.1 Principle for selection of TT&C Band	341
5.1.2 Limitation in Selection of TT&C Band	343
5.1.3 Foreign Development	345
5.1.4 TT&C and Communication System toward to Ka band	349
5.2 Rain Attenuation and Atmospheric Attenuation	360
5.2.1 Importance of Rain Attenuation Study	360

5.2.2	Rain Attenuation Features	360
5.2.3	Calculation of Rain Attenuation	361
5.2.4	Increased System Noise Temperature Caused by Rain	366
5.2.5	Countermeasure of Rain Attenuation	367
5.2.6	Atmospheric Attenuation in Signal Transmission Channel	370
5.3	Radio Propagation Characteristics Effect on Orbit Measurement	373
5.3.1	Overview	373
5.3.2	Correction of Radio Refraction Error in Troposphere	378
5.3.3	Correction of Radio Refraction Error in Ionosphere	381
5.3.4	Factors on Correct Accuracy	385
5.4	Multi-path Transmission Effect	385
5.4.1	Three kinds of Fast Fading caused by Multi-path Effect	386
5.4.2	Nature of Reflection Factor	389
5.4.3	Path Loss and Fading Caused by Multi-Path Propagation	394
5.4.4	Orbit Measurement Error caused by Multi-path Propagation	398
5.4.5	Measures for Mitigating Multi-path	402
5.5	Polarization Diversity Synthesis	416
5.5.1	General	416
5.5.2	Signal Synthesis Modes and Principle	418
5.5.3	Polarization Diversity Synthesis for TT&C and Communication	421
5.5.4	A Typical Polarization Diversity Synthesis Solution in TT&C and Communication System	428
	References	432