

船载微波 统一测控系统概论

瞿元新 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

船载微波统一测控 系统概论

瞿元新 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书综合了船载微波统一测控系统设计涉及的先进技术和方法,着重从基本概念、基本理念、基础技术、基本方法和实用工程参考入手阐述系统的设计。本书的编写目的就是为研究船载微波统一测控系统提供参考,具有内容全面、时效性和针对性较强、理论知识和应用知识较为均衡等特点。

本书的读者对象是设计、研制、生产和使用微波统一测控系统的工程技术人员,也可作为飞行器测量领域专业的研究生作为选修课教材。

图书在版编目(CIP)数据

船载微波统一测控系统概论/瞿元新编著. —北京:
国防工业出版社, 2016. 7
ISBN 978 - 7 - 118 - 10836 - 1

I. ①船… II. ①瞿… III. ①船舶系统—自动检测
系统 IV. ①U664. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 130122 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印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 24 $\frac{3}{4}$ 字数 480 千字
2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 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)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

《船载微波统一测控系统概论》

编 写 组

主 编 瞿元新

副主编 陈德明

编著者 瞿元新 陈德明 吴有杏 丛 波

张永亮 李红艳 谢 勇 毛南平

邹惠之 潘高峰

PREFACE | 前言

航天技术是 20 世纪 50 年代发展起来的一项高新技术,它对人类社会的政治、经济、科技、军事等方面起过并仍将起着重大作用。发展航天技术必须以运载器技术为基础,以空间飞行器技术为主导,并相应地发展天地一体的航天测控技术。航天测控技术是指对火箭、卫星、飞船等飞行器的各个飞行阶段进行跟踪、测量和控制的专门技术。过去 50 多年来,我国航天测控系统经历了从无到有、从单一到综合的发展历程,具备了对各类不同轨道卫星、载人飞船、空间探测器的发射、在轨运行以及返回提供测控支持的能力。

航天测量船是我国航天测控网的重要组成部分,具有综合测控能力强、布设灵活等特点,主要为飞行器发射任务关键弧段提供测控支持。目前,测量船上装载了 S/C/X 频段微波统一测控系统、C 频段脉冲跟踪测量雷达和光学经纬仪等测量设备,是我国航天测控网中综合功能最强的测站之一,具有代表性。微波统一测控系统工作在 S、C、X 或 Ka 频段,集跟踪、测距、测速、遥测、遥控、通信、数传等功能于一体,具有作用距离远、中等精度测轨、可全天候工作、统一载波、统一基带功能可动态加载、便于国际合作联网等特点。在微波统一测控体制的基础上,又发展了扩频测控体制、数传一体化测控体制。

与陆站测控系统相比,船载测控系统的最大特点是要克服船舶摇摆对目标捕获跟踪的影响,这一点对窄波束天线稳定跟踪尤为重要。船载微波统一测控系统涉及的主要关键技术包括统一载波信道技术、多模馈源技术、窄波束天线跟踪技术、多目标跟踪和测控技术、软件无线电技术、扩频测控技术、船摇稳定技术、电磁兼容技术等。

本书的编写目的就是为研究船载微波统一测控系统提供参考,具有内容全面、时效性和针对性较强(特别是对船载系统存在的特殊问题及其解决方法进行了阐述)、理论知识和应用知识较为均衡等特点,同时适合普通技术人员和高层次研发人员阅读参考,也适合飞行器测量领域专业的研究生作为选修课教材。

本书综合目前船载微波统一测控系统涉及的先进设计技术和方法,着重从基本概念、基本理论、基础技术、基本方法和实用工程参考入手阐述系统的设计。共分 10 章:第 1 章主要介绍船载微波统一测控系统的定义、体制、作用和功能,航天测控主要协议和标准,船载无线电测控系统的发展历程,船载微波统一测控系统的组成、工作原理、特点、关键技术以及应用与发展趋势等;第 2 章主要介绍

电波传输和频率选择、雷达方程及参数计算、信号的调制与解调、锁相环技术、频率合成器、软件无线电技术基础、极化分集合成技术等;第3章主要介绍信号设计、频率流程、系统信道电平计算及功率分配、干扰抑制、系统捕获、天线合建技术、多目标跟踪测量、电磁兼容、可靠性设计等;第4章主要介绍跟踪测角体制、天线技术、馈线技术、伺服传动装置、船载伺服控制技术、目标前馈及船摇稳定技术等;第5章主要介绍侧音测距、伪码测距、音码混合测距、扩频测距技术以及测距精度分析等;第6章主要介绍多普勒测速原理、多普勒频率测量技术、扩频测控体制测速技术、测速精度分析等;第7章主要介绍遥测信号的基本理论、信道编译码技术、遥测功能设计、分包遥测等;第8章主要介绍遥控体制、遥控指令种类和发送方式、遥控信道编译码技术、遥控功能设计、分包遥控等;第9章主要介绍扩频测控技术的概念及特点、扩频测控的基本方式、相干/非相干直接序列扩频测控技术、扩跳频测控技术、测控数传一体化技术等;第10章主要介绍角度标校、距离零值标校、相位标校以及海上标校新技术等。

本书编著工作得到中国卫星海上测控部的资助和大力支持,在此表示感谢。同时感谢北京跟踪与通信技术研究所李国民研究员、北京遥测技术研究所卢满宏研究员、中国西南电子技术研究所施为华研究员以及中国卫星海上测控部赵文华高级工程师为本书审校。

由于本书内容涉及面广泛,加之作者水平有限,难免有不足或者错误之处,敬请读者指正。

编著者
2015年9月

CONTENTS | 目录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 航天技术概述	1
1.1.2 航天测控技术概述	2
1.1.3 船载微波统一测控系统概述	2
1.2 航天测控主要协议和标准	6
1.2.1 IRIG 标准	6
1.2.2 ESA 标准	7
1.2.3 CCSDS 标准	8
1.3 无线电测控系统的发展历程	9
1.3.1 航天无线电测控系统的发展	9
1.3.2 船载无线电测控系统的发展	13
1.4 微波统一测控系统的组成、原理及对外信息接口	14
1.4.1 系统组成	14
1.4.2 工作原理	17
1.4.3 对外信息接口	18
1.5 微波统一测控系统的特点和关键技术	19
1.5.1 特点	19
1.5.2 关键技术	20
1.6 微波统一测控系统的应用和发展趋势	25
1.6.1 应用	25
1.6.2 发展趋势	27
参考文献	29
第 2 章 基本理论与基础技术	30
2.1 电波传输和频率选择	30
2.1.1 选择原则	30
2.1.2 测控频率的选择	33

2.2	信标雷达方程及参数计算	34
2.2.1	信标雷达方程	35
2.2.2	信标功率计算	36
2.2.3	天线参数计算	36
2.3	测控信号的调制与解调	44
2.3.1	概述	44
2.3.2	数字信号对副载波的调制与解调	45
2.3.3	副载波对载波的调制与解调	46
2.4	锁相环技术	49
2.4.1	锁相环的基本原理	49
2.4.2	锁相环路在相干解调技术中的应用	57
2.5	频率合成器	62
2.5.1	概述	62
2.5.2	DDS 的基本原理	63
2.5.3	DDS 的设计结构及工作原理	64
2.6	软件无线电技术基础	65
2.6.1	软件无线电的概念	66
2.6.2	信号采样理论	68
2.6.3	抽取与内插	69
2.6.4	A/D 和 D/A 技术	71
2.6.5	数字信号正交变换	73
2.6.6	数字滤波	76
2.6.7	数字分离/合成技术	78
2.7	极化分集合成技术	80
2.7.1	概述	80
2.7.2	信号合成方式	80
2.7.3	微波统一测控系统中常用的极化分集合成技术	81
	参考文献	87
	第3章 总体设计	88
3.1	信号设计	88
3.1.1	基带信号的设计	88
3.1.2	副载波组合方式的选择	89
3.1.3	射频信号的设计	91
3.2	频率流程	92
3.2.1	S 频段系统的频率流程	92

3.2.2	C 频段系统的频率流程	93
3.2.3	X 频段系统的频率流程	93
3.3	系统信道电平计算及功率分配	94
3.3.1	系统信道电平计算	94
3.3.2	系统工作门限电平计算	97
3.3.3	功率分配	101
3.4	干扰抑制	107
3.4.1	非线性失真	107
3.4.2	混频干扰	111
3.4.3	减小干扰和非线性失真的措施	113
3.5	系统捕获	116
3.5.1	PM/PM 的系统捕获过程	116
3.5.2	FM/PM 的系统捕获过程	117
3.5.3	扩频测控的系统捕获过程	117
3.5.4	测控数传一体化的系统捕获过程	119
3.5.5	捕获时间	119
3.6	天线合建及多目标跟踪测量	120
3.6.1	天馈线合用技术	120
3.6.2	船载 USB 双点频跟踪链路设计	127
3.6.3	船载 USB 多目标测量链路设计	129
3.6.4	码分多址多目标测控技术	130
3.7	电磁兼容设计	131
3.7.1	基本概念	131
3.7.2	电磁干扰三要素	131
3.7.3	电磁干扰的抑制	132
3.8	可靠性设计	134
3.8.1	系统可靠性典型指标	135
3.8.2	系统可靠性模型的建立与分析	135
3.8.3	系统可靠性预计与分配	136
3.8.4	可靠性设计准则	138
	参考文献	142

第 4 章 天馈与跟踪测角技术

4.1	天线跟踪测角系统概述	143
4.1.1	组成与原理	143
4.1.2	基本要求	144

4.1.3	工作方式	145
4.2	跟踪测角体制	146
4.2.1	圆锥扫描跟踪体制	146
4.2.2	振幅比较单脉冲跟踪体制	148
4.3	天线技术	152
4.3.1	天线类型	152
4.3.2	天线结构	154
4.3.3	天线座结构	155
4.4	馈线技术	157
4.4.1	馈源喇叭	157
4.4.2	馈电网络	157
4.5	伺服传动装置	161
4.5.1	伺服传动装置设计要求	161
4.5.2	典型负载分析	161
4.5.3	伺服传动装置的机构设计	164
4.5.4	传动链的传动精度	164
4.6	船载伺服控制技术	166
4.6.1	船载伺服控制的作用与特点	166
4.6.2	船载伺服控制系统的组成与工作原理	167
4.6.3	方位—俯仰型天线的正割补偿	169
4.6.4	船载伺服控制系统的主要技术指标	170
4.6.5	船载伺服控制系统稳态指标计算	173
4.7	目标前馈技术	174
4.7.1	动态滞后误差分析	175
4.7.2	复合控制的基本原理	177
4.7.3	目标前馈的实现方法	182
4.8	船摇稳定技术	184
4.8.1	陀螺稳定技术	184
4.8.2	干扰补偿的基本原理	187
4.8.3	船摇前馈的实现方法	188
	参考文献	191
	第5章 测距技术	192
5.1	概述	192
5.2	侧音测距	193
5.2.1	信号设计	193

5.2.2	侧音的组合方式	193
5.2.3	侧音测距的设计	194
5.3	伪码测距	197
5.3.1	伪码的概念及其性质	197
5.3.2	伪码测距的原理	203
5.3.3	伪码测距的设计	204
5.4	音码混合测距	208
5.4.1	侧音 + 伪码混合测距技术	208
5.4.2	侧音 + 序列码混合测距技术	208
5.5	扩频测距技术	210
5.5.1	相干扩频测距	210
5.5.2	非相干扩频测距	212
5.6	测距精度分析	214
5.6.1	侧音测距精度分析	214
5.6.2	音码混合测距精度分析	216
5.6.3	相干扩频测距精度分析	216
5.6.4	非相干扩频测距精度分析	217
	参考文献	217
第6章 测速技术		218
6.1	多普勒测速原理	218
6.1.1	多普勒频率的产生过程	218
6.1.2	多普勒频率测速的方法	220
6.2	多普勒频率测量技术	221
6.3	扩频测控体制测速技术	224
6.3.1	相干扩频测速技术	224
6.3.2	非相干扩频测速技术	224
6.4	测速精度分析	226
6.4.1	双向相干载波多普勒测速精度分析	226
6.4.2	扩频测速精度分析	227
	参考文献	228
第7章 遥测技术		229
7.1	概述	229
7.1.1	遥测的定义和作用	229
7.1.2	遥测系统的组成和工作原理	229

7.1.3	遥测系统的分类和发展	230
7.1.4	遥测技术在船载微波统一测控系统中的应用	232
7.2	遥测信号的基本理论	232
7.2.1	脉冲调制	233
7.2.2	基本数字信号调制	236
7.3	遥测信道编译码技术	239
7.3.1	概述	239
7.3.2	卷积码与 Viterbi 译码	244
7.3.3	RS 码	246
7.3.4	级联码	249
7.3.5	Turbo 码	249
7.3.6	LDPC 码	251
7.3.7	MSD + TPC 技术	253
7.3.8	遥测加解扰规则	257
7.4	遥测功能设计	258
7.4.1	标准 TT&C 遥测功能	258
7.4.2	PCM - FM 遥测功能	267
7.4.3	数传功能	271
7.5	分包遥测	278
7.5.1	分包遥测概念	278
7.5.2	源包与传送帧结构	279
	参考文献	281
第 8 章 遥控技术		282
8.1	概述	282
8.1.1	遥控的基本概念	282
8.1.2	遥控的分类	282
8.1.3	遥控的工作过程	283
8.2	遥控体制	284
8.2.1	差错控制体制	284
8.2.2	调制体制	285
8.2.3	信道体制	286
8.3	遥控指令种类和发送方式	286
8.3.1	指令信息的种类	286
8.3.2	遥控指令信息的发送方式	286
8.3.3	遥控的环回比对	288

8.3.4	遥控指令码的组成	288
8.4	遥控信道编译码技术	289
8.4.1	信道的差错图样	289
8.4.2	遥控中常用的编码类型	290
8.5	遥控功能设计	293
8.5.1	遥控功能组成	293
8.5.2	遥控工作方式	293
8.5.3	遥控指令格式设计	295
8.6	分包遥控	299
8.6.1	分包遥控的概念和产生的背景	299
8.6.2	分包遥控的结构	299
8.6.3	分包遥控与传统遥控的区别	301
	参考文献	303
第9章 扩频测控技术		304
9.1	扩频测控技术原理	304
9.1.1	扩频测控的基本概念	304
9.1.2	扩频测控的主要性能指标	305
9.1.3	扩频测控的特点	307
9.2	扩频测控的基本方式	309
9.2.1	直接序列扩频	310
9.2.2	跳频扩频	312
9.2.3	混合扩频	315
9.3	相干直接序列扩频测控技术	316
9.3.1	工作原理	316
9.3.2	相干扩频测控工作模式设计	317
9.4	非相干直接序列扩频测控技术	320
9.4.1	工作原理	320
9.4.2	非相干扩频测控工作模式设计	322
9.5	非相干 DS/FH 混合扩频测控技术	324
9.5.1	工作原理	324
9.5.2	扩跳频测控工作模式设计	326
9.6	测控数传一体化技术	334
9.6.1	工作原理	334
9.6.2	测控数传一体化设计	335
	参考文献	342

第 10 章 系统标校技术	343
10.1 概述	343
10.2 角度标校技术	345
10.2.1 角度标校的原理	345
10.2.2 测角系统误差修正模型	346
10.2.3 测角系统误差系数标定	352
10.3 距离零值标校技术	356
10.3.1 距离零值标校的原理和方法	356
10.3.2 PM/PM 体制及相干扩频距离零值标校	358
10.3.3 FM/PM 体制距离零值标校	359
10.3.4 非相干扩频距离零值标校	361
10.3.5 扩跳频距离零值标校	361
10.3.6 测控数传一体化距离零值标校	362
10.4 相位标校技术	363
10.4.1 相位标校的原理	364
10.4.2 有塔相位标校	365
10.4.3 偏馈无线相位标校	366
10.4.4 有线闭环相位标校	366
10.4.5 信标球相位标校	367
10.4.6 同步星相位标校	367
10.4.7 扩频测控相位标校	368
10.4.8 海上相位标校	368
10.5 海上标校新技术	369
10.5.1 快速校相技术	369
10.5.2 星体标校技术	372
10.5.3 动态标校技术	377
10.5.4 卫星标校技术	379
参考文献	381

第1章 绪论

1.1 概述

1.1.1 航天技术概述

航天技术是探索、开发和利用宇宙空间的技术,又称为太空技术或空间技术,目的是利用空间飞行器作为手段来研究发生在空间的物理、化学和生物等自然现象。航天技术的主要内容包括三个方面:

第一,空间飞行器技术是研究、制造和发展能在空间完成各种任务的空间飞行器的技术。空间飞行器包括航空飞行器(高度在20km以下的飞行器)、临近空间飞行器(高度在20~100km之间的飞行器)、航天器(高度在100km以上的飞行器),高度超过 2×10^6 km时又称为深空飞行器,具体的飞行器有卫星、飞船、空间站、深空探测器、近空间飞行器、无人机、飞艇、气球等。

第二,运载器技术是研究、制造和发展将空间飞行器送入外层空间,使其开始规定的轨道上运行的技术。运载器基本上是大型多级火箭,故将该项技术称为“多级火箭技术”。多级火箭通常由二级或三级火箭组成,重达数百吨,高达数十米。每一级火箭都包括结构、发动机和制导系统三部分。

第三,航天测控技术是研究和实现对运行中的空间飞行器进行监视、测量、控制和管理的技术。航天测控技术要保证在轨道上运行的空间飞行器和地面之间的联系。空间飞行器在运行中,地面需要及时了解和掌握飞行器各个分系统的工作情况、飞行器内的环境条件以及宇航员的生理状况等,测量和预报飞行器的轨道,对其进行遥控,使飞行器按照规定的要求完成各项任务,如轨道或姿态的改变、各种星上仪器的操作等。想满足上述各项需要,地面要建立一定数量的测控站(包括航天测量船),或者建设跟踪和数据中继卫星系统(TDRSS)。研制和发展各种测控设备和建设陆/海基测控站以及天基测控网,是航天测控技术的具体内容。测控站执行任务所需的设备,除某些光学观测设备外,基本上都是无线电测量和控制设备。

综上所述,航天技术是一门高度复杂、高度综合的工程技术。发展航天技术

必须以运载器技术为基础,以空间飞行器技术为主导,相应地发展天地一体的航天测控技术。

1.1.2 航天测控技术概述

自从1957年10月苏联发射人类第一颗人造卫星以来,世界各发达国家都竞相发展航天技术、争夺空间优势并借以发展本国经济、增强国家军事实力。航天测控系统就是对火箭、卫星、飞船、深空探测器等多种航天器进行跟踪测量、遥测遥控、信息采集的综合电子系统。美国20世纪在50年代末,为地球轨道航天器测控建立了由遍布全球的比相干涉仪、测量雷达等组成的空间跟踪和数据汇集网(STADAN);其后为“水星”“阿波罗”飞船等载人航天飞行计划建立了载人航天飞行网(MSFN);为实施星际航行计划,保障星际航行的跟踪、数据获取和通信建立了深空网(DSN)。

测控系统是航天工程的重要组成部分,它既是航天运载器和航天器发射、在轨及返回段的重要支持保障系统,又是运行大回路中的重要环节。测控系统可以分为低轨(数百至数千千米)测控系统、高轨(如地球同步轨道)测控系统和深空(大于月距)测控系统。根据测控位置的不同,测控系统可以分为陆/海基测控系统和天基测控系统。

在过去的50多年的时间内,我国航天测控通信系统经历了从无到有、从单一到综合的发展历程,逐步形成了符合我国国情的航天测控系统,具备了对载人飞船和各类不同轨道卫星的发射以及在轨运行、返回式卫星提供测控支持的能力。以C频段微波统一测控网起步,发展了多个地面测控站,在20世纪90年代,为适应载人航天任务的特殊需求,逐步建立了陆基/海基S频段微波统一测控网。2008年4月发射升空的第一颗中继卫星的投入使用,标志着我国天基测控通信网开始建设。

1.1.3 船载微波统一测控系统概述

航天测量船是我国航天测控网的重要组成部分,具有综合测控能力强、布设灵活等特点,为航天器发射任务关键弧段提供测控支持。

目前我国的航天测量船上安装了S频段、C频段、X频段三种频段的微波统一测控系统。

1.1.3.1 定义

在普通在轨系统(COS)建议中,微波统一测控系统是一种模拟的系统,它的定义是:在一个载波上,用多个副载波调制,实现频分复用的多路信号传输,每一个副载波实现一个功能,从而实现测控中的多功能综合,即将测控的多种功能统一在一个载波上,故称为微波统一测控系统。当采用同一频段多载波时,还可综合调频(FM)遥测、数传(DDT)等功能。

随着从普通在轨系统(COS)到高级在轨系统(AOS)的发展,模拟体制逐步在向全数字体制发展过渡,即在AOS中,取消副载波,测距将采用伪码体制,遥测、遥控等均采用数字编码,直接对载波进行数字调制,于是出现了扩频统一测控体制、测控数传一体化等数字化系统。

船载微波统一测控系统与陆站系统相比最大的特点是要克服船舶摇摆对目标捕获跟踪的影响,这一点对窄波束天线捕获跟踪尤为重要。

1.1.3.2 体制

微波统一测控体制集跟踪、测距、测速、遥测、遥控、通信、数传等功能于一体,设备简单,可靠性高,测量精度适中,已在国内外航天测控中得到广泛应用,工作频率为S、C、X、Ka等频段。在微波统一测控体制之后,又发展了扩频统一测控体制、测控数传一体化体制。其工作体制简要介绍如下。

1. 载波调制体制

微波统一测控系统通常具有对载波调相或调频两种体制。调频体制发展较早,所以国外早期的测控系统以及从继承特别是组网角度考虑所建的后续测控系统也广泛采用调频体制。从20世纪60年代开始,随着锁相技术日趋完善,测控系统迅速采用了对载波的调相体制。

(1) PM/PM,即上行载波与下行载波均采用调相体制。在这种体制下,航天器载应答机工作在有一定转发比要求的相参转发状态,系统可以获取目标的径向速度信息(从星—地双向锁定的载波信号中提取多普勒频率),船载S/X频段微波统一测控系统均采用该体制。

(2) FM/PM,即上行载波调频、下行载波调相的体制。在这种体制下,航天器载应答机工作在非相参转发状态,系统无测速功能,船载C频段微波统一测控系统即采用该体制。

2. 测距体制

测距体制包括纯侧音测距体制、伪随机码(PN码)测距体制或音码混合测距体制。采用侧音测距时,最高侧音用来保精度,次侧音用来解距离模糊。

目前微波统一测控系统中用得最多的是纯侧音测距,如船载C频段微波统一测控系统采用4个侧音,主侧音为27.7kHz,次侧音为3968Hz、283Hz、35Hz,次侧音副载波频率为19kHz;船载S频段微波统一测控系统采用9个侧音,主侧音为100kHz,次侧音为20kHz、4kHz、800Hz、160Hz、32Hz、8Hz、2Hz、0.5Hz,侧音经频谱折叠处理后变为100kHz、20kHz、16kHz、16.8kHz、16.16kHz、16.032kHz、16.008kHz、16.002kHz、16.0005kHz,最低次侧音可设8Hz、2Hz或0.5Hz。其中最高侧音的选择与测距精度要求有关,次侧音是侧音匹配解模糊所必需的;船载X频段微波统一测控系统有侧音测距和音码混合测距两种方式,侧音测距的主侧音频率100kHz、500kHz可选,次侧音为100kHz(主音为500kHz时)、20kHz、