



中国航天科技前沿出版工程·中国航空间信息技术系列



“十三五”国家重点图书出版规划项目



China Deep Space Network: System Design and Key Technologies (I)

S/X-Band Deep Space TT&C System

中国深空网： 系统设计与关键技术（上） S/X双频段深空测控通信系统

北京跟踪与通信技术研究所 组编
董光亮 李国民 雷厉 等著



清华大学出版社



中国航天科技前沿出版工程·中国航天空间信息技术系列

“十三五”国家重点图书出版规划项目

China Deep Space Network:
System Design and Key Technologies (I)
S/X-Band Deep Space TT&C System

中国深空网：
系统设计与关键技术（上）
S/X双频段深空测控通信系统

董光亮 李国民 雷厉 等 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书对中国深空网佳木斯 66m S/X 双频段深空测控通信系统的工作原理与技术实现进行了系统详实的描述,对波束波导馈电系统、10kW 速调管功放、超低温制冷场放、微弱信号超窄带接收机、氢原子钟等三十多项关键技术进行了深入讲解。全书共 14 章。第 1 章介绍系统总体的技术指标、工作原理、方案设计等内容;第 2 章至第 11 章分别介绍各分系统的功能与技术指标、组成及工作原理、方案设计及关键技术解决途径;第 12 章至第 14 章介绍了系统接口设计、结构设计以及指标测试方法。

本书反映了我国深空测控通信领域的最新科研成果,具有系统性强、与工程实践结合紧密等特色,为我国深空网的高效运行、后续建设乃至我国未来深空探测任务的设计与实施提供了一套详实的基础技术资料,对航天测控通信及相关领域的科研人员和工程技术人员具有重要的参考价值。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

中国深空网:系统设计与关键技术. 上, S/X 双频段深空测控通信系统/董光亮等著. —北京:清华大学出版社, 2016

(中国航天科技前沿出版工程·中国航空气息信息技术系列/董光亮主编)

ISBN 978-7-302-45877-7

I. ①中… II. ①董… III. ①深空激光通信系统—地面测控系统 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 295456 号

责任编辑:石磊 魏贺佳

封面设计:李海涛

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京雅昌艺术印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×235mm 印张:44.75 插页:1 字 数:825 千字

版 次:2016 年 12 月第 1 版

印 次:2016 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~1200

定 价:185.00 元

产品编号:069707-01

“中国航天空间信息技术系列”

编审委员会

主任：董光亮

副主任：吴正容 孙 威

委员：李国民 郭军海 金 胜 李海涛

高 昕 张 艳 柳仲贵 马 岩

秘书：韩晓亚

《中国深空网：系统设计与关键技术》

编审委员会

主任：董光亮

副主任：李国民 雷 厉 王新永

委员：孙 威 黄 英 许 东 柴 霖 耿虎军 高振喜

段玉虎 李小平 李晓东 孙世瑞 卢满宏 孙甲琦

王元钦 侯孝民 杨 斌

秘 书：喻 韬 朱智勇 冯修二 马立霞 魏 峰 鞠崇兴

吴春水 魏建民 门 利

《S/X 双频段深空测控通信系统》分册

编 写 组

组 长：董光亮

副 组 长：李国民 雷 厉

成 员：刘 敏 于益农 闫春生 杜小鸣 施为华
汪晓燕 杜 丹 李天虹 赵 平 宋玉辉
汪远玲 陈 玲 张 静 王贤良 兰宏志
邓永铭 江晓凤 卢华强 官山林 贺定国
裴 莹 王 雁 庞 毅 李 华 郭建设
李红兴 王力生 高 亮 汪广瑞 郑光崇
张 萍 郭忠凯 张宏伟 侯满宏 韩来辉
丁海兵 于 波 郭 伟 唐卫涛 左 涛
李 平 姚 旭

“中国航天空间信息技术系列”序

自古以来,仰望星空,探索浩瀚宇宙,就是人类不懈追求的梦想。从1957年10月4日苏联发射第一颗人造地球卫星以来,航天技术已成为世界各主要大国竞相发展的尖端技术之一。当前,航天技术的应用已经渗透到生活的方方面面,并成为国家科技、经济领域的重要增长点和保障国家安全的重要力量。

中国航天通过“两弹一星”、载人航天和探月工程三大里程碑式的跨越,已跻身于世界航天先进行列,航天技术也成为中国现代高科技领域的代表。航天技术的进步始终离不开信息技术发展的支撑,两大技术领域的交叉融合形成了空间信息技术,包括对空间和从空间的信息感知、获取、传输、处理、应用以及管理、安全等技术。在空间系统中,以测量、通信、遥测、遥控、信息处理任务为代表的导弹航天测控系统,以空间目标探测、识别、编目管理任务为代表的空间态势感知系统,都是典型的空间信息系统。随着现代电子和信息技术的快速发展,大量的技术成果被应用到空间信息系统中,成为航天系统效能发挥的倍增器。同时,航天任务和工程的实施又为空间信息技术的发展提供了源源不断的牵引和动力,并不断凝结出一系列新的成果和经验。

习主席指出,到2020年要使我国进入创新型国家行列。在空间领域,我国陆续实施的载人空间站、探月工程三期、二代导航二期、火星探测等航天工程将为引领和推动创新提供广阔的平台。其中,以空间信息技术为代表的创新和应用一样面临着众多新挑战。这些挑战既有认识层面的,也有理论、技术和工程实践层面的。如何解放思想,在先进理念和思维的牵引下,取得理论、技术以及工程实践上的突破,是我国相关领域科研、管理及工程技术人员必须思考和面对的问题。

北京跟踪与通信技术研究所作为直接参与国家重大航天工程的总体单位,主要承担着航天测控、导航通信、目标探测、空间操作等领域的总体规划与设计工作,长期致力于推动空间信息技术的研究、应用和发展。为传播知识、培养人才、推动创新,北京跟踪与通信技术研究所精心策划并组织一线科技人员总结相关理论成果、技术创新及工程实践经验,开展了“中国航天空间信息技术系列”丛书的编著工作。希望这套丛书的出版能够为我国空间信息技术领域的广大科技工作者和工程技术人员提供有益的帮助与借鉴。

沈岩骏

2016年9月10日

前言

深空网是人类与深空探测器联系的桥梁与纽带。深空网拥有深空测控通信能力,是开展月球探测必须具备的前提条件,也是探月工程最具挑战性的任务之一。探月工程启动后,我国的测控工程师们以探月工程为牵引,兼顾火星、小行星等深空探测任务的需求,描绘出中国深空网的蓝图——在布局上,由分布在中国东部、西部以及南美洲的3个深空站提供全球90%以上的测控覆盖;在频段上,兼容了目前国际上深空测控任务使用的所有频段;在天线口径上,按照4亿千米火星探测的基本要求设计。

佳木斯66m S/X双频段深空测控通信系统(DSF1)和喀什35m S/X/Ka三频段深空测控通信系统(DSF2)的设计建设正是在这一蓝图下进行的。经过5年的研制建设,这两套深空测控通信系统均于2013年正式投入使用。它们的建成,极大地提升了中国远距离测控通信能力,成为中国航天测控发展史上又一个重要的里程碑。

这两套深空测控通信系统基于国内自主研发,成功实现了波束波导馈电系统、10kW速调管功放、超低温制冷场放、微弱信号超窄带接收机、氢钟建造及干涉测量等技术。按照空间数据系统咨询委员会(CCSDS)建议书中的深空测控任务标准,这两套系统已经具有音码测距、伪码测距、载波相位测量、三向测量等功能,采用空间链路扩展(SLE)协议,可以和符合CCSDS建议的其他国外深空测控站实现深空测控任务的国际联测和数据交互。

2012年,两套深空测控通信系统在嫦娥二号与图塔蒂斯小行星交会飞越探测中获得成功应用,并于2013年作为主力测控通信设备圆满完成了嫦娥三号探月飞行任务。这标志着中国深空测控通信能力的形成,使中国成为国际上第四个具有独立完成深空测控任务能力的国家。

北京跟踪与通信技术研究所是这两套深空测控通信系统的总体设计单位,西南电子技术研究所是66m S/X双频段深空测控通信系统的总体研制单位,石家庄通信测控技术研究所是35m S/X/Ka三频段深空测控通信系统和深空干涉测量系统的总体研制单位,西北电子设备研究所、中原电子技术研究所、北京遥测技术研究所、中国西安卫星测控中心、中国人民解放军装备学院、合肥低温电子研究所等单位承担了这两套系统有关分系统的研制工作。在此,对他们为中国航天测控事业作出的努力和贡献表示衷心的感谢!

中国深空网及其深空测控通信系统的研制,为设计师队伍提供了极富挑战的创新实践平台。他们积极进取,勇于探索,采用大量电子与信息技术领域的尖端技术,攻克多项关键难题,取得了许多宝贵经验和科技成果,成为航天测控领域一笔宝贵的财富。把这些来之不易的技术成果固化下来,是编写本套图书的主要目的。

本套图书由三个分册组成,分别是《S/X 双频段深空测控通信系统》《S/X/Ka 三频段深空测控通信系统》和《深空干涉测量系统》,对应着佳木斯 66m 深空测控通信系统、喀什 35m 深空测控通信系统以及由这两套深空系统与数据处理中心组成的甚长基线干涉测量(VLBI)系统。书中对上述设备系统级和分系统级的功能与技术指标、组成及工作原理、方案设计、关键技术等进行了系统详尽的描述,希望为我国深空测控通信系统的使用者提供详尽系统的技术资料,为我国后续深空测控通信系统的设计提供有益的参考和借鉴,也希望能为对深空测控通信感兴趣的同行们提供有用的技术资讯。

本套图书的编写人员均为中国深空网的设计和研制人员。他们在承担繁重工程任务的同时,挤出时间从事写作工作,对深空测控通信系统涉及的技术进行了细致的归纳梳理和认真的分析总结。由于我们写作水平有限,书中难免有疏漏和不当之处,恳请读者批评指正。

《中国深空网：系统设计与关键技术》编审委员会

2016年5月

目录

第 1 章 系统	1
1.1 概述	2
1.1.1 深空测控通信系统的任务	2
1.1.2 深空测控通信的特点	3
1.1.3 关键技术	4
1.2 系统功能与技术指标	9
1.2.1 主要功能	9
1.2.2 技术指标	10
1.3 系统组成	11
1.3.1 天伺馈分系统	11
1.3.2 发射分系统	13
1.3.3 高频接收分系统	13
1.3.4 多功能数字基带分系统	13
1.3.5 监控分系统	14
1.3.6 数据传输分系统	14
1.3.7 SLE 服务终端分系统	14
1.3.8 时频分系统	14
1.3.9 标校分系统	15
1.3.10 自动测试分系统	15
1.4 系统工作原理	15
1.4.1 测距	15
1.4.2 测速	27
1.4.3 遥控	32
1.4.4 遥测和数传	34
1.4.5 跟踪测角	35
1.5 系统工作流程	38
1.5.1 系统信号流程	38
1.5.2 常规测控模式捕获流程	40
1.5.3 深空测控模式捕获流程	41
1.6 系统工作方式	43

1.6.1	一个目标的典型上/下行组合工作模式	43
1.6.2	干涉测量工作模式	44
1.7	系统指标计算分析	45
1.7.1	系统 G/T 分析	45
1.7.2	系统 EIRP 分析	48
1.7.3	测距精度分析	50
1.7.4	测速精度分析	52
1.7.5	测角精度分析	54
1.7.6	遥测数传解调损失及分配	57
1.8	系统距离零值标校	60
1.8.1	偏馈校零	60
1.8.2	短环校零	63
1.8.3	分段校零	64
1.9	系统校相	65
1.9.1	快速校相	66
1.9.2	射电星校相	70
1.10	系统电磁兼容设计	75
1.10.1	系统频率设计与干扰分析	75
1.10.2	波束波导网络中的隔离设计	81
1.10.3	原子钟屏蔽钟房设计	83
1.10.4	无源交调控制	83
1.11	系统安全性设计	86
1.11.1	功放联锁保护	87
1.11.2	大功率极化开关的安全保护	88
1.11.3	氢钟恒温箱安全性设计	89
第 2 章	天伺馈分系统	91
2.1	概述	92
2.2	功能与技术指标	93
2.2.1	主要功能	93
2.2.2	天线射频指标	93
2.2.3	天线机械结构指标	94
2.3	组成及工作原理	95
2.3.1	分系统组成	95

2.3.2	工作原理	96
2.4	方案设计	100
2.4.1	天线射频子系统	100
2.4.2	天线机械结构子系统	100
2.4.3	天线控制子系统	102
2.4.4	标校子系统	103
2.5	关键技术	104
2.5.1	波束波导设计技术	104
2.5.2	波束波导馈电系统波束倾斜补偿技术	110
2.5.3	高精度角位置编码技术	117
2.5.4	大口径天线副反射面调整技术	120
2.5.5	大口径天线标校测试技术	128
2.5.6	阵风扰动对天线的影晌及补偿技术	141
2.5.7	波束波导镜面位置的调整方法	143
2.5.8	天线反射体面精度测量及调整技术	150
2.5.9	波束波导天线三轴中心位置的确定及测量方法	154
第3章	发射分系统	159
3.1	概述	160
3.2	功能与技术指标	160
3.2.1	主要功能	160
3.2.2	技术指标	160
3.3	组成及工作原理	162
3.3.1	分系统组成	162
3.3.2	工作原理	162
3.4	方案设计	163
3.4.1	发射分系统的频率关系设计	163
3.4.2	发射分系统电平分配	164
3.4.3	变频器设计	166
3.4.4	低相噪本振源设计	168
3.4.5	设备的控制管理	172
3.4.6	高功放设计	173
3.4.7	S/X 频段 1kW 固态功放设计	189
3.5	关键技术	198

3.5.1	宽带大功率速调管技术	198
3.5.2	大功率散热技术	211
3.5.3	功率精确控制技术	225
3.5.4	PIM 噪声控制技术	229
3.5.5	功放与天馈的联锁保护措施	231
第 4 章	高频接收分系统	237
4.1	概述	238
4.2	功能与技术指标	238
4.2.1	主要功能	238
4.2.2	技术指标	239
4.3	组成及工作原理	240
4.3.1	分系统组成	240
4.3.2	工作原理	248
4.4	方案设计	250
4.4.1	下行频率配置	250
4.4.2	频综器设计	251
4.4.3	接收信道电平分配	253
4.4.4	噪声温度核算	254
4.4.5	低温接收组件设计	255
4.5	关键技术	261
4.5.1	超低相位噪声技术	261
4.5.2	低温接收组件设计技术	271
4.5.3	超导滤波器设计技术	275
4.5.4	极低噪声测试及不确定度评估技术	282
第 5 章	多功能数字基带分系统	287
5.1	概述	288
5.2	功能与技术指标	289
5.2.1	主要功能	289
5.2.2	技术指标	290
5.3	组成及工作原理	299
5.3.1	分系统组成	299
5.3.2	工作原理	303

5.4	方案设计	310
5.4.1	硬件设计	310
5.4.2	软件设计	332
5.5	关键技术	343
5.5.1	极低信噪比信号捕获技术	343
5.5.2	极窄带锁相环跟踪技术	359
5.5.3	低损耗解调译码技术	378
5.5.4	残留载波与抑制载波数据调制解调技术	384
第6章	监控分系统	393
6.1	概述	394
6.2	主要功能	394
6.3	组成及工作原理	395
6.3.1	分系统组成	395
6.3.2	工作原理	397
6.4	方案设计	402
6.4.1	硬件环境	402
6.4.2	软件环境	402
6.4.3	应用软件设计	402
6.4.4	任务过程设计	429
6.4.5	安全性设计	444
6.4.6	时码板	445
6.4.7	工业电视	445
6.5	自动运行设计	446
6.5.1	计划管理	446
6.5.2	测控任务自动运行设计	450
6.5.3	干涉测量自动运行设计	452
6.6	自动化测试设计	454
6.6.1	系统测试项目	456
6.6.2	发射分系统测试项目	458
6.6.3	高频接收分系统测试项目	460
6.6.4	天伺馈分系统测试项目	460
6.6.5	多功能数字基带分系统测试项目	461

第7章 时频分系统	463
7.1 概述	464
7.2 功能与技术指标	464
7.2.1 主要功能	464
7.2.2 技术指标	464
7.3 组成及工作原理	467
7.4 方案设计	469
7.4.1 氢钟	470
7.4.2 铷钟	472
7.4.3 频率信号净化器	473
7.4.4 GPS 定时接收机	476
7.4.5 时码产生器	477
7.4.6 时间信号巡检器与时间间隔计数器	477
7.4.7 时频监控	478
7.4.8 频率信号分配放大器	480
7.4.9 脉冲信号分配器	480
7.4.10 B 码信号分配器	481
7.4.11 GPS 共视接收机	481
7.5 关键技术	483
7.5.1 GPS 共视接收机	483
7.5.2 GPS 共视的数据处理方法	485
7.5.3 GPS 时间同步精度分析	486
第8章 标校分系统	487
8.1 概述	488
8.2 功能与技术指标	488
8.2.1 主要功能	488
8.2.2 技术指标	489
8.3 组成及工作原理	491
8.3.1 分系统组成	491
8.3.2 工作原理	494
8.4 方案设计	497
8.4.1 联试应答机设计	497
8.4.2 校零变频器设计	504

8.4.3	目标模拟源设计	508
8.5	关键技术	518
8.5.1	对超远距离的高精度模拟技术	518
8.5.2	距离和速度、加速度的严格相关模拟技术	519
第9章	自动测试分系统	523
9.1	概述	524
9.2	功能与技术指标	524
9.2.1	主要功能	524
9.2.2	自动测试精度要求	525
9.3	组成及工作原理	525
9.3.1	分系统组成	525
9.3.2	工作原理	526
9.4	方案设计	527
9.4.1	测试项目及测试点设计	527
9.4.2	分机方案设计	530
9.4.3	自动测试软件设计	532
9.4.4	与监控分系统的关系	538
9.4.5	测试方法	540
第10章	数据传输分系统	571
10.1	概述	572
10.2	功能与技术指标	573
10.2.1	主要功能	573
10.2.2	可靠性要求	573
10.2.3	效率要求	574
10.3	组成及工作原理	574
10.3.1	分系统组成	574
10.3.2	工作原理	575
10.3.3	信息传输流程	577
10.4	方案设计	578
10.4.1	计算机硬件环境	578
10.4.2	计算机软件环境	578
10.4.3	应用软件设计	578

10.5	关键技术	595
第 11 章	SLE 服务终端分系统	599
11.1	概述	600
11.2	功能与技术指标	602
11.2.1	主要功能	602
11.2.2	技术指标	603
11.3	组成及工作原理	604
11.3.1	分系统组成	604
11.3.2	工作原理	605
11.4	方案设计	607
11.4.1	计算机硬件环境	607
11.4.2	计算机软件环境	608
11.4.3	应用软件设计	608
11.4.4	时码板	623
11.5	关键技术	625
第 12 章	系统内外接口关系	627
12.1	概述	628
12.2	系统对外接口	629
12.2.1	对外接口	629
12.2.2	信息接口	630
12.3	系统内部接口	632
第 13 章	系统结构工艺与布局	641
13.1	概述	642
13.2	整站布局	642
13.2.1	地下天线塔基机房	642
13.2.2	地面机房	647
13.2.3	地面水泥平台	650
13.3	基建工艺要求	651
13.3.1	系统供电	651
13.3.2	天线基础要求及场坪要求	652
13.3.3	机房通用要求	652