



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

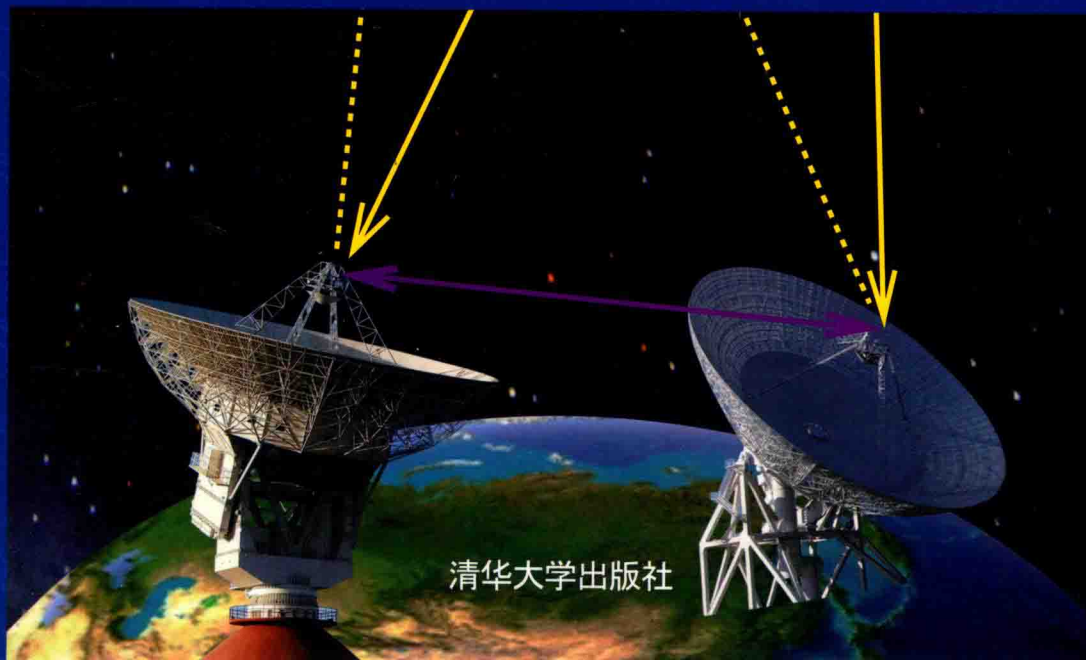


China Deep Space Network:
System Design and Key Technologies (III)
Deep Space Interferometric System

中国深空网： 系统设计与关键技术（下）

深空干涉测量系统

北京跟踪与通信技术研究所 组编
董光亮 耿虎军 李国民 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 (III)

Deep Space Interferometric System

中国深空网：
系统设计与关键技术（下）

深空干涉测量系统

董光亮 耿虎军 李国民 等著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书对中国深空网深空干涉测量系统的工作原理与技术实现进行了系统详实的描述,对基于信道化接收的宽带全频谱数字基带转换,VSI、VSR数据格式编辑及高速缓存,集群运算处理,相关处理的实现结构等关键技术进行了深入讲解。全书共12章。第1章介绍系统总体的技术指标、工作原理和 workflows 等内容;第2章至第9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;最后3章介绍了系统指标测试方法、接口关系以及结构设计等内容。

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. 下,深空干涉测量系统/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·中国航天空间信息技术系列/董光亮主编)

ISBN 978-7-302-45878-4

I. ①中… II. ①董… III. ①深空激光通信系统—干涉测量法 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 295457 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:19 插 页:2 字 数:348千字

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:95.00元

产品编号:069705-01

“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

《深空干涉测量系统》分册

编 写 组

组 长：董光亮

副 组 长：耿虎军 李国民

成 员：于益农 刘 敏 闫春生 杜小鸣 王 彬

刘友永 谷春平 张立哲 张志国 黄海锋

马 宏 史学书 姜 坤 廉 昕 焦义文

吴 涛 吴丽娟 王 红

“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上的,也有理论、技术和工程实践层面上的。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。

沈学骏

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 基本原理	2
1.1.2 技术特点	3
1.1.3 关键技术	4
1.2 系统技术指标	7
1.2.1 接收频段	7
1.2.2 中频接口	7
1.2.3 相关处理能力	7
1.2.4 测量精度	7
1.3 系统组成及工作原理	7
1.3.1 系统组成	7
1.3.2 VLBI/ Δ VLBI 的工作原理	9
1.3.3 DOR/DOD 测量的工作原理	11
1.3.4 Δ DOR/ Δ DOD 测量的工作原理	12
1.3.5 SBI 的工作原理	13
1.4 系统工作流程	14
1.4.1 深空干涉测量观测计划的编制	15
1.4.2 观测前的系统检测	17
1.4.3 DOR/DOD 测量实施	19
1.4.4 Δ DOR/ Δ DOD 测量实施	19
1.4.5 SBI 实施	20
1.4.6 站内设备的自动运行	20
1.5 系统指标计算分析	22
1.5.1 DOR 测量误差分析	22
1.5.2 DOD 测量误差分析	27
1.5.3 Δ DOR 测量误差分析	30
1.5.4 Δ DOD 测量误差分析	33
1.5.5 SBI 误差分析	34
1.5.6 误差分配	38

1.5.7 小结	40
第2章 天馈分系统	41
2.1 概述	42
2.2 35m 口径天线	42
2.2.1 功能与技术指标	42
2.2.2 组成	44
2.3 66m 口径天线	45
2.3.1 功能与技术指标	45
2.3.2 组成	46
2.4 干涉测量对天线的要求	47
第3章 时频分系统	49
3.1 概述	50
3.2 技术指标	50
3.3 分系统组成	51
3.4 频标稳定性对干涉测量的影响	51
第4章 干涉测量射频信道分系统	55
4.1 概述	56
4.2 功能与技术指标	56
4.2.1 主要功能	56
4.2.2 技术指标	56
4.3 组成及工作原理	57
4.4 方案设计	59
4.4.1 频率设计	59
4.4.2 增益、群时延和低相噪设计	63
4.4.3 S 频段干涉测量本振	69
4.4.4 S 频段干涉测量下变频器	70
4.4.5 X 频段干涉测量本振	71
4.4.6 X 频段干涉测量下变频器	72
4.4.7 干涉测量测试切换机箱	72
4.5 关键技术	73

第 5 章 数据采集与记录分系统	75
5.1 概述	76
5.2 功能与技术指标	77
5.2.1 主要功能	77
5.2.2 技术指标	77
5.3 组成及工作原理	79
5.3.1 基带转换单元	81
5.3.2 数据存储与传输单元	82
5.4 方案设计	82
5.4.1 各种方案的比较	82
5.4.2 全频谱接收处理数字基带转换结构设计	85
5.4.3 信号调理与频综模块设计	89
5.4.4 数据采集与基带转换板设计	90
5.4.5 数据存储与传输模块设计	101
5.4.6 系统自检与实时状态监测	106
5.5 关键技术	113
5.5.1 基于信道化接收的宽带全频谱数字基带转换技术	114
5.5.2 数字 AGC 设计方案	124
5.5.3 VSI 和 VSR 数据格式编辑及高速缓存技术	130
第 6 章 大气参数测量分系统	139
6.1 概述	140
6.2 功能与技术指标	140
6.2.1 主要功能	140
6.2.2 技术指标	140
6.3 组成及工作原理	141
6.4 方案设计	142
6.4.1 微波辐射计子系统	142
6.4.2 GNSS 子系统	144
6.4.3 地面五要素子系统	144
6.4.4 伺服转台子系统	147
6.4.5 中央信号处理子系统	149
6.4.6 多路电源子系统	149
6.4.7 折射修正服务终端	151

6.5	关键技术	155
第7章	延迟校准分系统	157
7.1	概述	158
7.2	功能与技术指标	158
7.2.1	主要功能	158
7.2.2	技术指标	158
7.3	组成及工作原理	159
7.4	方案设计	160
7.4.1	S频段 PCAL 信号发生器	160
7.4.2	X频段 PCAL 信号发生器	163
7.4.3	频标时延测量机箱	163
7.5	关键技术	164
7.5.1	高稳定 PCAL 信号生成技术	165
7.5.2	电缆时延在线标定技术	165
第8章	站内监控分系统	169
8.1	概述	170
8.2	功能与技术指标	170
8.2.1	主要功能	170
8.2.2	技术指标	170
8.3	组成及工作原理	170
8.4	监控协议格式	171
8.4.1	网络组播接口	171
8.4.2	YK-MCP	172
第9章	中心数据处理分系统	175
9.1	概述	176
9.2	功能与技术指标	176
9.2.1	主要功能	176
9.2.2	技术指标	177
9.3	组成及工作原理	179
9.3.1	数据接收及预处理子系统	179
9.3.2	相关处理子系统	179

9.3.3	监控子系统	180
9.4	方案设计	181
9.4.1	基本处理流程	181
9.4.2	数据接收及预处理子系统	183
9.4.3	相关处理子系统	190
9.4.4	监控子系统	206
9.5	关键技术	206
9.5.1	集群运算处理技术	206
9.5.2	相关处理的实现结构	211
9.5.3	传统相关和本地相关处理方法	218
9.5.4	通道时延不一致处理方法	224
第 10 章	测试方法	237
10.1	中心数据处理分系统指标测试方法	238
10.1.1	测试框图	238
10.1.2	DOR/DOD 精度测试	238
10.1.3	SBI 精度测试	240
10.1.4	相关处理能力	240
10.2	干涉测量射频信道指标测试方法	240
10.2.1	杂散指标测试	240
10.2.2	本振相位噪声测试	241
10.3	延迟校准设备指标测试方法	241
10.3.1	测试框图	241
10.3.2	延迟校准信号频率测试	242
10.3.3	相位抖动测试	242
10.3.4	在线标定电缆精度	242
10.4	数据采集与记录设备指标测试方法	243
10.4.1	基带信号中心频率分辨率测试	243
10.4.2	信道相频非线性测试	244
10.4.3	开机同步一致性测试	245
10.4.4	子带拼接性能	246
10.4.5	子带记录数据一致性测试	247
10.5	大气参数测量设备指标测试方法	249
10.5.1	中心工作频率测试	249

10.5.2	亮温测量量程测试	250
10.5.3	系统灵敏度测试	250
10.5.4	亮温测量精度测试	251
10.5.5	电离层修正精度测试	251
10.5.6	非降雨天气对流层总延迟修正精度	252
第 11 章	接口关系	253
11.1	系统外部接口	254
11.1.1	中心数据处理分系统对外接口关系	254
11.1.2	站内设备对外接口关系	257
11.2	站内设备分系统间接口	259
11.2.1	干涉测量射频信道分系统	259
11.2.2	延迟校准分系统	260
11.2.3	数据采集与记录分系统	261
11.2.4	大气参数测量分系统	261
第 12 章	系统结构	265
12.1	概述	266
12.2	站内设备结构布局	266
12.2.1	深空站布局	266
12.2.2	设备结构布局	267
12.2.3	数据采集与记录分系统结构	268
12.2.4	大气参数测量设备结构	270
12.3	中心数据处理分系统结构布局	274
12.3.1	北京中心数据处理分系统	274
12.3.2	西安中心数据处理分系统	275
缩写词	277
索引	280
参考文献	283

第1章

系统

1.1 概述

甚长基线干涉测量(VLBI)是当前天文学使用的一项高分辨率、高测量精度的观测技术,在天体物理方面主要应用于类星体、射电星系、星际脉泽源等致密射电源毫角秒级的精细结构研究和精确定位等。在天体和大地测量中,它在建立天球参考系、测定地球自转全部参数和地面参考系的基准点等方面具有不可替代的作用。

由于 VLBI 技术具有很高的测角精度,所以自 20 世纪 60 年代起,也逐步应用于深空探测。20 世纪 60—70 年代美国阿波罗登月计划中对于月球车运动路线的测量和 80 年代美国和苏联分别实施的金星大气风速测量中,均使用了 VLBI 技术,其测量精度分别达到了数米和几十厘米每秒。深空干涉测量系统是基于 VLBI 技术发展起来的,工程上称为单向时延差(DOR)测量和单向多普勒频差(DOD)测量。20 世纪 70 年代,为消除 DOR、DOD 测量过程中的站间时间同步、站址、电离层、对流层等公共误差,采用了分时工作、顺序观测或者同时观测深空航天器和射电星再对应做差的方法,其测量元素为差分单向距离差和差分单向距离变化率,所以又称之为双差分单向时延差(Δ DOR)和双差分单向多普勒频差(Δ DOD)测量技术。它实质上对应的是航天器和射电星之间的相对位置或相对位置变化率。利用同样的原理,如果两个以上的深空目标同时位于深空测控站的同一波束内,则可以测量同一波束内深空航天器间的相对位置,工程上称为同波束干涉测量(SBI)。

深空干涉测量系统具有 DOR/DOD 测量、 Δ DOR/ Δ DOD 测量和 SBI 的能力,具有航天器信号、射电星信号数字基带转换能力,具有 S/X 双频段 DOR/DOD 干涉测量的能力,具有 S/X 双频段 Δ DOR/ Δ DOD 干涉测量的能力,具有 S/X 双频段 SBI 的能力。

1.1.1 基本原理

干涉测量就是利用两座相距很远(数千千米)的观测站同时接收来自同一源的信号,测量其到达两站的 DOR 或 DOD,从而获得目标到两个站基线的夹角,如图 1-1 所示。

两个地面站的天线指向同一个深空目标,如射电星或航天器。由于目标距离遥远,到达两个地面站的信号是互相平行的。信号经过天线接收、低噪声放大并下变频至中频,由采集与格式化记录系统对信号进行 A/D 采样,经过格式化处理记录在磁盘上。在观测完毕后,将数据送到数据处理中心,经过回放和互相