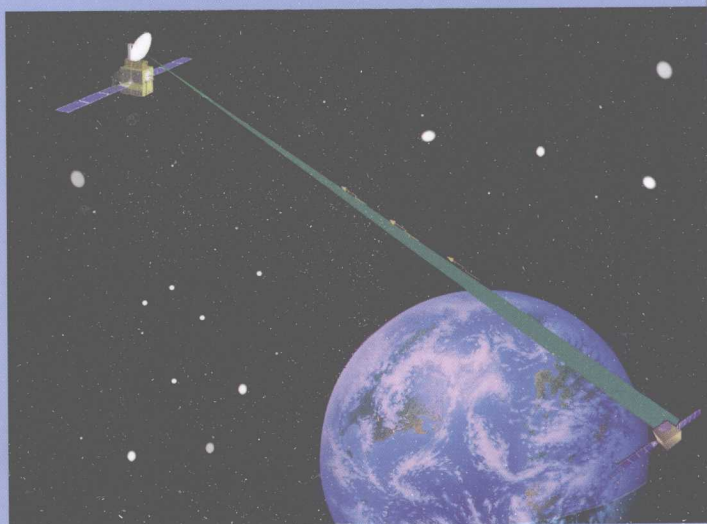


空间电子信息科学与技术系列



星间链路 天线跟踪指向系统

黎孝纯 邱乐德 等 编著
陈明章 余晓川



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

013033584

TN828.5

01

空间电子信息科学与技术系列

星间链路天线跟踪指向系统

黎孝纯 邱乐德 陈明章 余晓川 等 编著



上海交通大学出版社

TN828.5

01



北航

C1640348

内 容 提 要

本书是空间电子信息科学与技术系列之一。全书阐述中继星间链路天线跟踪指向系统的设计理论与方法,重点讲述星载 Ka 频段角跟踪系统的设计这一技术难题。在分析研究星地大回路跟踪指向系统的同时,论述星上自主闭环跟踪指向系统的工程设计理论与方法。全书共 16 章,分为三个部分。第一部分第 1~3 章论述中继星间链路天线跟踪指向系统组成、工作原理和技术性能;第二部分第 4~8 章论述分机(天线、结构与机构、跟踪接收机、控制处理器和驱动电路)的设计理论与方法;第三部分第 9~16 章分别介绍系统设计中几个技术难题的解决途径,如宽带数据传输信号的角跟踪理论,包括卫星姿态控制和天线指向控制的动力学数学模型及仿真分析,天线跟踪指向控制的解耦设计和鲁棒稳定性设计分析,角跟踪系统的在轨相位校准方法,星载角跟踪系统程控跟踪指向算法,星载角跟踪系统的扫描捕获方法,中继星天线星地大回路跟踪指向系统的性能等。

全书内容丰富,系统性和可读性较强,具有较高的实际应用价值。本书可作为高等院校跟踪测控工程、通信工程、自动控制工程、机械工程等专业本科生和研究生的教材或教学参考书,也可供相关专业的科研、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

星间链路天线跟踪指向系统/黎孝纯等编著. —上海:上海交通大学出版社,2013

(空间电子信息科学与技术系列)

ISBN 978-7-313-09344-8

I. 星... II. 黎... III. 卫星通信系统—天线跟踪 IV. TN828.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 296409 号

星间链路天线跟踪指向系统

黎孝纯 等编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

常熟市文化印刷有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:22.25 字数:547 千字

2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-09344-8/TN 定价:98.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-52219025

空间电子信息科学与技术系列编辑委员会



主 任 史平彦



副 主 任 李 军 陈 豪



委 员

崔万照 黄普明 何兵哲 李正军 李 立 马伊民
宋燕平 王五兔 韦娟芳 张立新 周 詮 于洪喜
殷新社

前 言

随着航天事业的发展,中低轨道卫星数目不断增多,高性能的对地观测卫星、宇宙飞船和空间站等都要求长弧段(甚至全球覆盖)连续实时的高速数据传输和测控。实现这种任务要求的技术手段就是跟踪与数据中继卫星系统。

跟踪与数据中继卫星系统 TDRSS(tracking and data relay satellite system)的建成,标志着对低轨道航天器的天基测控通信网的诞生,它的“天基”设计思想从根本上解决了测控、通信的高覆盖率问题,同时还解决了高速数传和多目标测控通信等技术难题,使航天测控通信技术发生了革命性的变化。

因为 TDRSS 要进行高速数据中继传输,传输码速率高达 $300\sim 800$ Mbps,而实现高速数据率中继传输的基础是 TDRS 星上高增益天线的应用,用来提高信号的有效发射功率 $EIRP$ 和接收信号的增益噪声温度比 G/T 值,否则不可能实现高速数传。例如 TDRS 星上的 Ka 频段天线直径为 $3\sim 4.9$ m,波束宽度约为 $0.18^\circ\sim 0.25^\circ$,它覆盖不了 23° 的区域,故要求窄波束天线扫描 23° 的空域捕获跟踪用户航天器,要求 Ka 频段天线波束指向损失 ≤ 0.5 dB,也要求 Ka 频段天线跟踪用户星的跟踪指向误差 $\leq 0.05^\circ$ 。同时,中继星 S/Ka 天线要对各种(例如只有 S 频段、或只有 Ka 频段、或有 S/Ka 频段,相应的 100 Kbps ~ 800 Mbps 的 BPSK 或 QPSK 数传信号的)用户航天器捕获跟踪,建立起星间链路。对于这样的星载角跟踪系统,美国一二代中继卫星系统都选择了星地大回路捕获跟踪方案,说明在这个历史时期,中继星 S/Ka 天线实现星上自主闭环捕获跟踪用户星是一大技术难题。

本书是从从事卫星测控通信的技术研究和教学人员多年通力合作完成的兼具学术著作和教材性质的书。本书既可作为高等院校无线电跟踪测控工程、通信工程、自动控制工程、机械工程专业本科生和研究生的教材或教学参考书,也可供相关专业的科研工程技术人员参考。

本书主要阐述星上自主闭环天线跟踪指向系统的设计理论与方法。全书共由 16 章构成,分为三个部分。第一部分包括第 1 $\sim$ 3 章,论述中继星星间链路天线跟踪指向系统的系统设计;第二部分包括第 4 $\sim$ 8 章,论述分机(天线、结构与机构、跟踪接收机、控制处理器和驱动电路)的设计理论与方法;第三部分包括第 9 $\sim$ 16 章,论述星上自主闭环天线跟踪指向系统中几个技术难题的解决途径。各章的内容如下:

第 1 章 概述中继星星间链路的组成和功能,说明星间链路天线捕获跟踪指向是建立中继星星间链路的前提条件,它的工程设计是一大技术难题。简述中继星天线星地大回路捕获跟踪指向系统的工作原理。

第 2 章 阐述中继星天线星上闭环跟踪指向系统的设计,包括系统的组成和工作原理、工作模式、技术难题及其解决途径。

第 3 章 阐述用户星天线跟踪指向系统的设计,包括系统的组成、工作原理、工作模式、技术难题及其解决途径。

第4章 介绍中继星单址 ka/S 天线的设计方法, 阐述双反射面正馈多模(TE_{11} 为和模, TM_{01} 为差模)跟踪天线的设计, 介绍单反射面偏馈多模馈源跟踪天线方案。

第5章 阐述用户星 ka/S 天线的设计方法, 重点是双反射面多模(TE_{11} 为和模, TE_{21} 为差模)跟踪天线的设计。

第6章 阐述中继星天线结构与机构的设计方法, 阐述用户星天线结构与机构的设计方法。

第7章 阐述中继星跟踪接收机的设计方法, 阐述用户终端跟踪接收机的设计方法。

第8章 阐述天线控制器的设计, 重点是天线指向控制即捕获跟踪控制器及驱动电路的设计方法。

第9章 阐述宽带数据传输信号的角跟踪理论, 并用数学推导、物理解释和实验验证来证明该理论的正确性。由此, 中继星 APS 的跟踪接收机用 2~3 个带通滤波器切换, 就能实现对 100 Kbps~300 Mbps 数传信号的角跟踪。

第10章 建立中继星卫星平台控制和天线指向控制的动力学模型, 并进行天线指向控制运动和星体姿态运动的动力耦合分析, 其结果为中继星大型天线设计和天线伺服控制设计提供了依据。

第11章 根据第10章建立的 APS 和 ACS 动力学模型和动力耦合分析结果, 分析论证确定 APS 和 ACS 的解耦方法即前馈补偿解耦方法, 用以单环设计天线指向控制器, 单环设计 ACS 控制器。必要时, 用鲁棒稳定性分析的 μ 方法, 检验包含 APS 和 ACS 的整个系统的多环稳定性。

第12章 阐述中继星 APS 在轨相位校准方法, 阐述用户星 APS 在轨相位校准方法。

第13章 用传统的坐标转换矩阵方法介绍中继星天线程控指向用户星的方位角和俯仰角计算过程。

第14章 阐述用户终端天线程控指向算法, 包括用户星 GPS 数据计算指向角方法。

第15章 介绍一种更适合星间链路天线扫描捕获的恒线速度螺旋扫描捕获方法。该方法既对卫星姿态冲击影响小, 又有利于对目标的发现与捕获。

第16章 阐述中继星单址天线星地大回路指向系统中长延时的影响分析与仿真。

本书的编写分工如下: 第1章(黎孝纯), 第2章(黎孝纯、邱乐德、陈明章、余晓川), 第3章(张剑、翟军涛、荣国志), 第4章(姚永田), 第5章(许智), 第6章(宋剑鸣), 第7章(王珊珊、关鹏), 第8章(闫剑虹、徐文强), 第9章(黎孝纯、薛丽、朱舸), 第10章(韦娟芳), 第11章(黎孝纯), 第12章(黎孝纯、陈明章、余晓川、刘翠翠), 第13章(黎孝纯), 第14章(李荣), 第15章(黎孝纯、于瑞霞、张剑), 第16章(于瑞霞)。

本书所涉及的天线跟踪指向系统的研究与教学得到张洪太研究员、谢军研究员、史平彦研究员、李军研究员、何兵哲研究员、熊之凡研究员的热心指导和支持。在本书的撰写过程中, 陈豪、崔万照、冀有志三位专家审阅了原稿, 在此, 一并致以诚挚的感谢。

空间电子信息科学与技术系列是中国空间技术研究院西安分院针对研究生培养和科研人员教育计划而组织编写的, 本书为空间电子信息科学与技术系列之一, 在编写过程中参阅了大量中外资料和经典著作, 均已列入书后的参考文献中, 在此谨向这些文献的作者表示深切的感谢。

书中有不妥之处, 敬请广大读者予以批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 中继星星间链路天线指向系统概述	1
1.1 跟踪与数据中继卫星系统的组成和功能	1
1.1.1 跟踪与数据中继卫星系统的发展	1
1.1.2 跟踪与数据中继卫星系统的组成	3
1.1.3 跟踪与数据中继卫星系统的功能	3
1.2 中继星星间链路的组成和功能	4
1.2.1 星间链路的定义	4
1.2.2 中继星星间链路的组成	4
1.2.3 中继星星间链路的功能	5
1.3 天线角跟踪系统的组成及工作原理	6
1.3.1 角跟踪系统的组成	6
1.3.2 分机功能及工作原理	7
1.3.3 角跟踪系统工作过程	11
1.3.4 角跟踪系统相位校准方法	11
1.4 中继星星间链路建立过程中的天线指向控制	11
1.4.1 天线程控跟踪指向和自动跟踪指向的定义	11
1.4.2 中继星星间链路建立过程中的天线指向控制	12
1.4.3 中继星对用户星的天线跟踪指向系统	13
1.4.4 中继星 S/Ka 天线星地大回路跟踪指向方案工作原理	15
1.4.5 用户星对中继星的天线跟踪指向系统	16
1.5 本章小结	16
第 2 章 中继星天线指向系统设计	17
2.1 中继星天线指向系统的顶层设计	17
2.1.1 参考 SNIP 协议	17
2.1.2 中继卫星整星设计	17
2.1.3 中继星天线指向系统链路计算	17
2.2 中继星 APS 的特点	23
2.3 中继星 APS 的组成及工作原理	23
2.4 中继星 APS 的工作模式	28
2.5 中继星 APS 的总体指标	29
2.6 中继星 APS 中几个技术难题的解决途径	30

2.7 跟踪指向误差和程序跟踪误差	35
2.7.1 跟踪指向误差	35
2.7.2 程序跟踪误差	36
2.8 本章小结	37
第3章 用户星天线跟踪指向系统设计	38
3.1 系统任务分析	38
3.2 工作体制简介	38
3.2.1 射频通道预算	40
3.2.2 工作模式及工作流程	40
3.3 系统功能仿真结果	42
3.3.1 程序跟踪控制仿真结果	42
3.3.2 自动跟踪功能仿真	42
第4章 中继星 Ka/S 天线	46
4.1 概述	46
4.1.1 中继星 Ka/S 天线的功能	47
4.1.2 中继星 Ka/S 天线的组成	48
4.1.3 Ka/S 天线技术指标要求	50
4.2 双反射面正馈多模跟踪天线	54
4.2.1 组成及基本原理	55
4.2.2 Ka 频段单脉冲和差信号的形成	64
4.2.3 主要性能分析	66
4.3 单反射面偏馈多模跟踪天线	67
4.4 交叉耦合分析	69
4.5 天线测试	71
4.5.1 端口特性测试	71
4.5.2 辐射特性测试	71
第5章 用户星天线电气设计	74
5.1 引言	74
5.2 TE_{21} 多模跟踪原理	75
5.3 天线重要部件	80
5.3.1 环焦天线	81
5.3.2 TE_{21} 模耦合器	83
5.3.3 旋转关节	89
5.3.4 S 频段馈电部分	89
5.4 天线测试及性能	90

第 6 章 结构与机构设计	95
6.1 概述	95
6.1.1 结构及机构设计的任务	95
6.1.2 星间链路天线结构与机构的发展情况	95
6.2 星间链路天线的机-电接口	98
6.2.1 天线的几个基本射频参数	98
6.2.2 抛物面天线的主要类型	99
6.2.3 结构设计所需的机电接口参数	100
6.2.4 回转抛物面的几何特征	101
6.2.5 组装误差对天线性能的影响	101
6.2.6 抛物面反射器制造误差	102
6.3 复合材料结构的一些基本知识	105
6.3.1 复合材料结构件的特点	105
6.3.2 卫星天线常用复合材料的主要机械性能数据	106
6.3.3 常用的基本计算	107
6.4 结构设计	110
6.4.1 可展开伞形反射器的结构设计	110
6.4.2 自回弹反射器天线结构设计	118
6.4.3 工作在同步轨道的固面反射器天线结构	120
6.4.4 用户终端天线	125
第 7 章 角跟踪接收机	148
7.1 引言	148
7.2 单脉冲单通道角跟踪接收机工作原理	149
7.2.1 和、差信号单通道合成	150
7.2.2 角误差信号解调	151
7.2.3 相位调整	152
7.2.4 单通道合成对信噪比影响分析	153
7.3 单脉冲单通道角跟踪接收机主要功能及组成	153
7.3.1 单脉冲单通道角跟踪接收机主要功能	153
7.3.2 单脉冲单通道角跟踪接收机组成	154
7.3.3 单脉冲单通道角跟踪接收机的主要技术参数	155
7.4 单脉冲单通道角跟踪接收机设计	157
7.4.1 低噪声放大器	157
7.4.2 滤波器	158
7.4.3 跟踪调制器	160
7.4.4 混频器	162
7.4.5 带 AGC 的中频放大器	163
7.4.6 角误差信号解调	166

7.5 相位调整方法改进设计	172
第8章 天线控制器设计	173
8.1 引言	173
8.1.1 星载天线控制器的发展	173
8.1.2 星载天线控制器分类	173
8.2 天线控制系统的组成	174
8.2.1 自动控制系统的分类	174
8.2.2 天线控制系统的基本组成	174
8.2.3 对控制系统的基本要求	175
8.2.4 天线座的结构形式	176
8.2.5 天线控制系统常用执行元件	177
8.2.6 角度传感器	185
8.3 天线控制器设计	188
8.3.1 天线控制器的主要功能及组成	188
8.3.2 控制模块设计	190
8.3.3 驱动模块设计	190
8.3.4 角编码模块设计	190
8.4 经典控制系统概述	190
8.4.1 控制系统的数学模型	190
8.4.2 控制系统的分析方法	191
8.4.3 控制系统的校正方法	198
8.4.4 离散控制系统分析与设计	204
第9章 对宽带数据传输信号的角跟踪理论	213
9.1 引言	213
9.2 单通道跟踪接收机方案	215
9.3 取数传信号频谱主瓣的任意部位小部分带宽内信号实现角跟踪理论的 数学推导	216
9.3.1 宽带单通道信号通过窄带带通滤波器的求解方法	216
9.3.2 宽带单通道信号的指数傅里叶级数表达式	216
9.3.3 窄带带通滤波器的频率特性	219
9.3.4 宽带数传信号通过窄带带通滤波器的输出表达式	219
9.3.5 跟踪接收机中频带宽的选择	221
9.4 取数传信号频谱主瓣的任意部位小部分带宽内信号实现角跟踪理论的 物理解释	221
9.5 实验验证	222
9.5.1 实验验证(一)	222
9.5.2 实验验证(二)	226

9.6 本章小结	229
第 10 章 大型天线指向控制运动与星体姿态运动的动力耦合分析	230
10.1 问题的来源	230
10.2 多体动力学分析原理	230
10.2.1 多体动力学简介	230
10.2.2 ADAMS 软件的数值计算方法	231
10.2.3 柔性附件的处理方法	231
10.3 多体模型的建立及动力学方程	232
10.3.1 卫星的姿态控制简介	232
10.3.2 刚体-柔体动力耦合概念	232
10.3.3 模型的简化和动力学方程	234
10.3.4 柔性附件的有限元模型	236
10.4 卫星多体模型的分析结果	239
10.4.1 不同天线系统刚度的动力耦合分析结果	239
10.4.2 阻尼系数对动力耦合的影响分析	241
10.4.3 卫星喷气时间对动力耦合的影响分析	242
10.4.4 天线转动速度对动力耦合的影响分析	242
10.4.5 计算结果分析	242
10.5 动力耦合分析的结论	244
第 11 章 中继星大型天线指向控制设计分析	245
11.1 概述	245
11.1.1 天线跟踪指向系统和姿态控制系统的关系	245
11.1.2 中继星带有大型挠性附件——太阳能帆板和单址天线	245
11.1.3 多体运动产生各种耦合影响和产生参数的不确定性	246
11.1.4 中继星大型天线指向控制设计要点	246
11.2 天线指向控制系统模型及控制设计	249
11.2.1 卫星姿态控制系统和天线指向系统的数学模型	249
11.2.2 天线指向控制器设计	251
11.3 复合控制	252
11.3.1 按输入补偿的复合控制	252
11.3.2 按扰动补偿的复合控制	253
11.4 双变量系统的解耦方法	255
11.4.1 调整控制器参数来改变耦合程度	255
11.4.2 前馈补偿解耦法	256
11.4.3 对角矩阵解耦法	257
11.4.4 单位矩阵解耦法	258
11.5 鲁棒稳定性分析	259

11.5.1	线性不确定性系统频域模型的类型	259
11.5.2	鲁棒稳定性的频域判据	261
11.5.3	鲁棒稳定性的 μ 分析方法	263
11.6	本章小结	268
第 12 章	星间链路角跟踪系统校相技术	270
12.1	引言	270
12.2	相位校准的指标要求	271
12.3	角跟踪系统交叉耦合分析	272
12.3.1	TE_{11} 、 TM_{01} 模跟踪系统的交叉耦合分析	272
12.3.2	TE_{11} 、 TE_{21} 模跟踪系统的交叉耦合分析	274
12.4	中继星 Ka 天线跟踪系统在轨相位校准方法	277
12.4.1	功能	277
12.4.2	系统组成及校相步骤	277
12.4.3	在轨相位校准方案的分析论证	281
12.5	用户星 Ka 天线跟踪系统在轨相位校准方法	281
12.5.1	任务分析	281
12.5.2	一种在轨校相方案	281
12.5.3	第二、第三种在轨校相方案简述	284
第 13 章	中继星天线路控指向用户星的方位角和俯仰角计算	286
13.1	坐标系定义及坐标转换矩阵	286
13.1.1	地心惯性坐标系 $OX_1Y_1Z_1$	286
13.1.2	地心轨道坐标系 $OX_0Y_0Z_0$	286
13.1.3	质心轨道坐标系 $SX_0Y_0Z_0$	287
13.1.4	中继星星体坐标系 $S_D X_b Y_b Z_b$	287
13.1.5	中继星天线坐标系 $S_a X_a Y_a Z_a$	288
13.1.6	坐标转换矩阵	288
13.2	卫星轨道的 6 个轨道根数	289
13.3	中继星到用户星位置矢量在地心惯性坐标系中的表示	290
13.3.1	中继星在地心惯性坐标系中的位置矢量	290
13.3.2	用户星在地心惯性坐标系中的位置矢量	291
13.3.3	中继星到用户星的位置矢量在地心惯性坐标系中的表示	291
13.4	中继星到用户星位置矢量在中继星质心轨道坐标系中的表示	292
13.5	中继星到用户星位置矢量在中继星本体坐标系中的表示	293
13.6	中继星天线指向用户星的方位角和俯仰角计算	293
13.7	计算例	294
13.8	本章小结	295

第 14 章 用户终端 Ka/S 天线程控指向算法	296
14.1 卫星轨道知识	296
14.1.1 天文基础知识	296
14.1.2 时间概念	298
14.1.3 六根轨道参数	299
14.1.4 几种典型卫星轨道	302
14.1.5 二体问题的运动微分方程	302
14.1.6 卫星的空间位置和轨道六要素关系	303
14.2 卫星轨道的摄动	305
14.2.1 地球形状摄动	306
14.2.2 太阳引力加速度	306
14.2.3 月球引力加速度	306
14.2.4 大气阻力加速度	307
14.2.5 太阳辐射压力产生的加速度	307
14.3 空间坐标系及转换关系	308
14.3.1 空间常用地心坐标系	308
14.3.2 空间常用坐标系转换关系	309
14.4 用户星轨道预报	312
14.5 中继星轨道预报	316
14.6 指向角度计算	317
14.7 用户星 GPS 数据计算指向角度方法	320
第 15 章 星间链路天线扫描捕获方法	322
15.1 引言	322
15.2 中继星天线程控指向用户星的方位角 α 和俯仰角 β 表示式	322
15.3 阿基米德螺旋线方程	323
15.4 中继星天线恒角速度螺旋扫描捕获方法	324
15.5 中继星天线恒线速度螺旋扫描捕获方法	325
15.5.1 螺线长 L 的近似表示式	325
15.5.2 等线速螺线的极角 θ 的表示式	325
15.5.3 天线方位轴转角 α 和俯仰轴转角 β 的数学表示式	325
15.5.4 扫描轨迹恒线速度 v 与天线方位角俯仰角的角速度 (α', β') 的关系	325
15.5.5 计入用户星运动参数的恒线速度螺旋扫描天线转角表示式	326
15.5.6 扫描参数选择	326
15.5.7 信号判决门限设置	328
15.5.8 计算例	328
15.6 本章小结	329

第 16 章 中继星单址天线星地大回路指向控制系统分析与仿真	330
16.1 引言	330
16.2 星-地大回路系统输入信号模型——用户星仿真模型建立	330
16.2.1 用户星仿真模型的功能及参数选取	330
16.2.2 在中继星坐标系下用户星轨道模型及捕获跟踪角度算法	331
16.2.3 用户星轨道仿真数据	331
16.3 星-地大回路系统时延分析简化模型	332
16.3.1 星-地大回路系统原理框图	332
16.3.2 控制回路中的时延分布	333
16.3.3 星-地大回路系统时延分析模型参数选取与数学模型建立	333
16.4 星-地大回路控制系统的时延分析与仿真	333
16.4.1 未校正的星-地大回路系统性能分析与仿真	333
16.4.2 经典 PID 校正后星-地大回路系统跟踪性能分析与仿真	334
16.5 星地大回路系统复合控制方案	335
16.5.1 星-地大回路系统复合控制方案	335
16.5.2 星-地大回路复合控制系统性能仿真	336
参考文献	337

第 1 章 中继星间链路天线 指向系统概述

1.1 跟踪与数据中继卫星系统的组成和功能

1.1.1 跟踪与数据中继卫星系统的发展

随着航天事业的发展,中低轨道卫星数目不断增多,高性能的对地观测卫星、宇宙飞船和空间站等都要求长弧段(甚至全球覆盖)连续实时的高速数据传输和测控。而完成这种任务的技术设备就是跟踪与数据中继卫星系统。

跟踪与数据中继卫星系统是一个利用同步卫星和地面终端站,对中、低轨飞行器(称为用户航天器)进行高覆盖率测控和数据中继的测控通信系统。这个综合系统具有跟踪测轨(T)和数据中继(DR)两方面的功能,故称为跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS)。这个系统中的同步卫星称为跟踪与数据中继卫星(TDRS),因为它从远离地球 3.6 万 km 的同步轨道向地球俯视,所以覆盖范围很大。这可形象地视为把测控通信站搬到了天上的同步轨道,故又称为“天基测控通信系统”。

跟踪与数据中继卫星系统 TDRSS(Tracking and Data Relay Satellite System)的建成,标志着对低轨道航天器的天基测控通信网的诞生,它的“天基”设计思想从根本上解决了测控、通信的高覆盖率问题,同时还解决了高速数传和多目标测控通信等技术难题。TDRSS 的出现使航天测控通信技术发生了革命性的变化,目前还在继续向前发展,不断地拓宽自己的应用领域,并具有较高的经济效益。

自 20 世纪 80 年代以来,NASA(美国宇航局)、苏联/俄罗斯、ESA(欧洲宇航局)和 NASDA(日本国家航天开发局)4 个空间组织都在研制自己的中继卫星系统^[1~10]。美国 1983 年发射了第一颗中继卫星,到 1995 年共发射了 7 颗中继卫星 TDRS-A~G,称为美国第一代中继卫星系统,使用频率是 S/Ku 频段;1997~2002 年,美国发射了第二代中继卫星 TDRSH, TDRSI, TDRSJ,使用频率是 S/Ku, Ka 频段;2007 年开始,美国在研发第三代跟踪与数据中继卫星。2002 年 9 月,日本发射了中继卫星 DRTS,使用 S/Ka 频段;2003 年欧空局发射了中继卫星 ARTEMIS,使用 S/Ka 频段;2008 年 4 月中国发射了中继卫星天链一号卫星,使用 S/Ka 频段。

美国、欧空局、日本都有各自的数据中继卫星发展计划,考虑到互用带来的优点,1988 年, NASA, ESA, NASDA 三家开了空间网络互用协调会(Space Network Interoperability Panel, SNIP)进行规约协调,制定了 SNIP 标准,见表 1.1^[2]。本书后面叙述的中继卫星天线指向系统和用户星天线指向系统的频率和跟踪信号形式等多项参数参考了 SNIP 标准。

表 1.1 SNIP 推荐参数和各国中继星参数

参 数		SNIP	TDRS(美)	DRTS(日)	ARTEMIS(欧)
S 频段	前向	频率范围	2 025~2 110 MHz	2 025~2 110 MHz	2 025~2 110 MHz
		带宽	10 MHz(min)	10 MHz(min)	17 MHz
		频率步进量	0.5 MHz		
		ERP	未精确定义	38~47 dBW	25~45 dBW
	返向	极化	左旋、右旋均可	左旋、右旋均可	左旋、右旋均可
		频率范围	2 200~2 290 MHz	2 200~2 290 MHz	2 200~2 290 MHz
		带宽	10 MHz	10 MHz	17 MHz
		频率步进量	0.5 MHz(max)		
Ka 频段	前向	G/T 值	8.8 dB/K	8.0 dB/K	6.8 dB/K
		极化	左旋、右旋均可	左旋、右旋均可	左旋、右旋均可
		频率范围	23 205 MHz+ $n \times 60$ MHz $n=0, \dots, 5$	WD: 23 505 MHz NB: 23.487 49 MHz, 23.522 5 MHz	23 205 MHz+ $n \times 60$ MHz $n=0, \dots, 7$
		带宽	50 MHz(min)	30 MHz	50 MHz
	返向	ERP	依容量而定	48~62 dBW	45~61.3 dBW
		极化	左旋、右旋均可	左旋、右旋均可	左旋、右旋均可
		频率范围	25 600 MHz+ $n \times 250$ MHz $n=0, \dots, 7$	25 250~27 500 MHz	25 600 MHz+ $n \times 250$ MHz $n=0, \dots, 7$
		带宽	225 MHz(min)	150 MHz	230 MHz
Ka 天线跟踪	前向	G/T 值	依容量而定	29.4 dB/K	22.3 dB/K
		极化	左旋、右旋均可	左旋、右旋均可	左旋、右旋均可
		信号形式	未调制载波	未调制载波	未调制载波
		ERP	24 dBW(min)		24 dBW
	信标	频率	23 530 MHz, 23 535 MHz, 23 540 MHz, 23 545 MHz (可选择)	23 175 MHz~23 545 MHz	23 540 MHz 或者 23 545 MHz (可选择)
		极化	左旋		左旋
		中继星天线跟踪信号形式	用户星返向数传信号	用户星返向数传信号	用户星返向数传信号

1.1.2 跟踪与数据中继卫星系统的组成

在同步轨道上放置 2 颗跟踪与数据中继卫星,两卫星经度相距约 130° ,在地球上适当位置建地面终端站,就可以对装有中继终端设备的中低轨道卫星(用户星)进行中继测控和通信。如图 1.1 所示。其组成包括:

- (1) 跟踪与数据中继卫星——TDRS1 和 TDRS2。
- (2) 用户航天器——低轨卫星(侦察卫星、遥感卫星、飞船)、无人侦察机等。
- (3) 地面终端站。

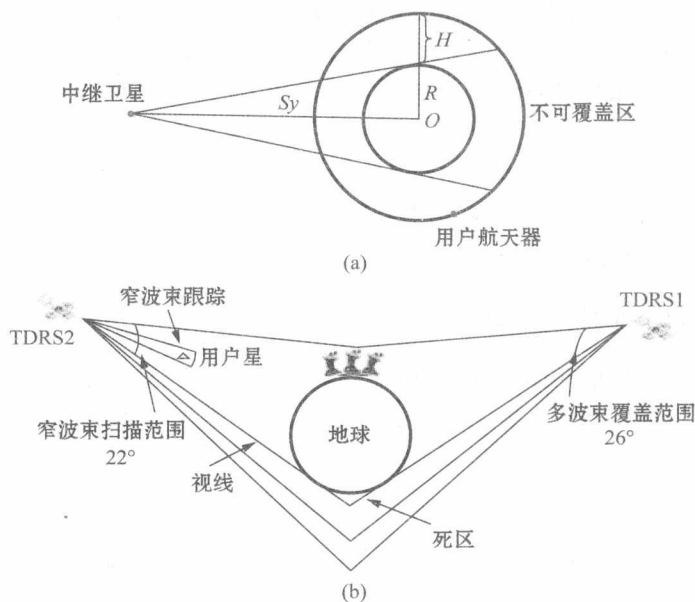


图 1.1 跟踪与数据中继卫星覆盖图

(a) 一颗 TDRS 星覆盖图; (b) 两颗 TDRS 星覆盖图

1.1.3 跟踪与数据中继卫星系统的功能

(1) 高覆盖率。如表 1.2 所示,对轨道高度在 1200 km 以上的用户星,覆盖率为 100%;对轨道高度在 200 km 的用户星,覆盖率为 85%。这样的覆盖率,如果不用中继卫星,而用增加地面建站的方法是绝对无法实现的。

表 1.2 中继星覆盖率

用户星轨道高度 H	一颗中继星覆盖率	两颗中继星覆盖率 (经度相隔 130°)
200~2 000 km	52%~68%	85%~100%
200~1 200 km		100%
1 200~2 000 km		

- (2) 实现天基卫星测控,代替现有的地基(由地面多个测控站、测量船组成)卫星测控系统。
- (3) 高速数据中继传输。