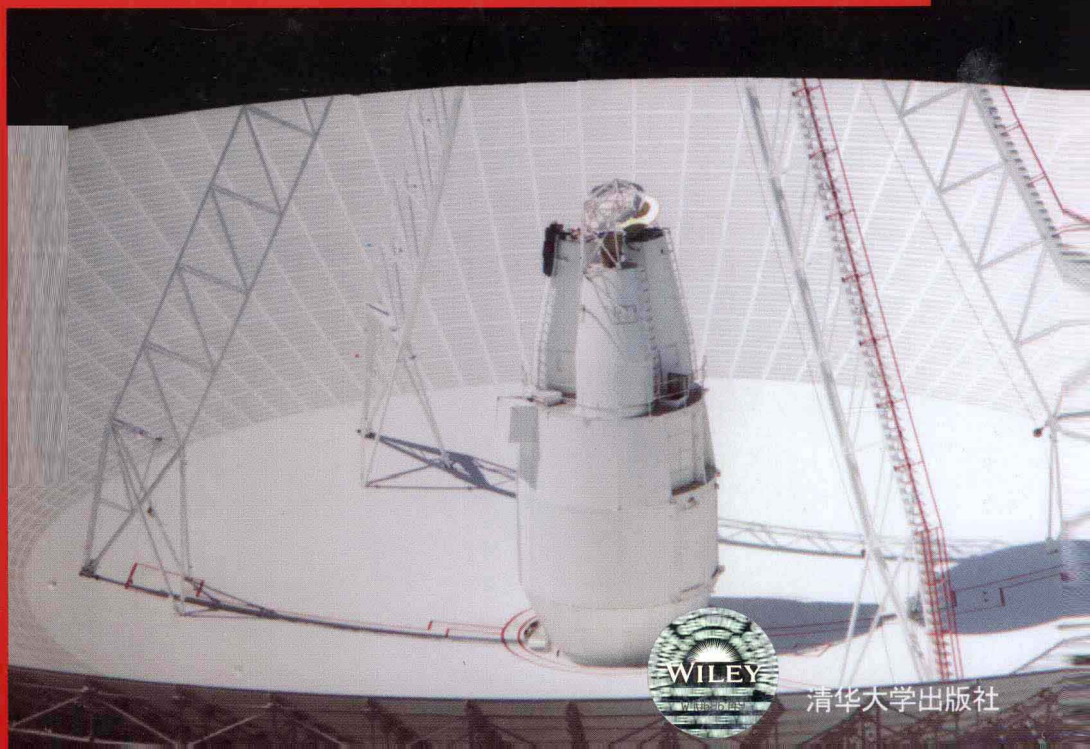


JPL 深空通信与导航丛书

深空网低噪声系统

[美] Macgregor S. Reid 主编
北京跟踪与通信技术研究组织翻译

李 赞 译
张纪生 审校



深空网低噪声系统

[美] Macgregor S. Reid 主编
北京跟踪与通信技术研究so 组织翻译

李 赞 译
张纪生 审校

清华大学出版社
北京

Macgregor S. Reid

Low-Noise Systems in the Deep Space Network

ISBN: 978-0-470-40228-3

Copyright © 2008 by John Wiley & Sons, Inc.

Original language published by John Wiley & Sons, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2009-4879

本书封面贴有 John Wiley 公司防伪标签,无标签者不得销售。

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

深空网低噪声系统/(美)里德(Reid,M.S.)主编;李赞译. —北京:清华大学出版社,2013
(JPL 深空通信与导航丛书)

书名原文:Low-Noise Systems in the Deep Space Network

ISBN 978-7-302-31623-7

I. ①深… II. ①里… ②李… III. ①深空激光通信系统—地面接收站—低噪声—地面微波系统 IV. ①V249.32 ②TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 035272 号

责任编辑:石磊 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:沈露

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:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm 印 张:19.25

字 数:330 千字

版 次:2013 年 5 月第 1 版

印 次:2013 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:65.00 元

产品编号:034833-01

JPL 深空通信与导航丛书

编译委员会

主任 于志坚

委员 匡乃雪 董光亮 孙 威

李海涛 李 平

丛书译序

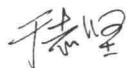
进入 21 世纪以来,随着美国机遇号、勇气号火星探测器成功登陆火星,卡西尼号探测器飞抵土星并成功释放惠更斯号探测器着陆土卫六,深空探测越来越成为全球关注的焦点。美国宣布将在 2015 年前后将宇航员重新送上月球,并在那里建立永久性基地;2030 年后,美国宇航员将前往遥远的火星探险。随着人类探索外太空活动的深入,深空探测正逐步成为航天活动的新热点。

我国于 2000 年发布的《中国的航天》白皮书中指出,深空探测是指对太阳系内除地球外的行星,及其卫星、小行星、彗星等的探测,以及太阳系以外的银河系乃至整个宇宙的探测。它是继卫星应用、载人航天之后的又一航天技术发展领域。

月球探测和火星探测将是 21 世纪空间探测的重点领域。我国探月工程计划的启动是中国走向深空探索的第一步,标志着我国深空探测的开始,也是未来进行更远深空探测的必然要求。随着我国经济和科技实力的不断增强,进一步开展深空探测,展开对火星、小行星和其他太阳系内行星的探测将是我国未来深空探测的目标。

北京跟踪与通信技术研究所在我国测控领域的技术总体单位,广大科技人员长期跟踪国际深空测控领域的技术动态和发展方向,并对深空测控通信技术进行了预先研究。此次我所组织翻译的“JPL 深空通信与导航丛书”是美国国家航空航天局(NASA)喷气推进实验室(JPL)编著的一套关于深空探测器测控通信技术的专著,该套丛书总结了美国 NASA 近 50 年来深空测控通信工程技术的经验,是从总体上了解和掌握深空测控通信技术不可多得的教材。同时,书中提供的参考文献为读者进一步深入研究和學習提供了帮助。相信该丛书的翻译出版不仅对深空测控领域的科研、工程和教学人员具有较高的参考价值,而且对于我国未来深空测控通信系统的总体设计和建设,以及相关技术的研究都具有一定的指导意义。

北京跟踪与通信技术研究所在



2005 年 3 月

丛书序

1998年,美国国家航空航天局(NASA)在加州理工学院的喷气推进实验室(JPL)成立了深空通信和导航系统精英中心(DESCANSO)。DESCANSO负责管理和促进能够满足未来深空探测对通信和导航技术需求的创新和改革。

DESCANSO的目标是实现在任何时间、任何地点的连续通信和精确导航。为了支持这一目标,DESCANSO努力探寻和提倡新概念、新系统和新技术;培养关键的技术人才;主办报告会、专题讨论会和论坛,来实现互动和思想交流。

“JPL深空通信与导航丛书”由在各自领域有多年经验的科学家和工程师撰写,通过交流关键技术领域的最新技术知识为创新奠定基础。该丛书归纳了JPL在几十年的深空探测研究过程中获得的基本原理和实践经验,同时还介绍了值得赞美的成果和应该吸取的教训。该丛书将作为新一代从事本领域研究的科学家和工程师的指南。

Joseph H. Yuen
(DESCANSO 负责人)

前 言

喷气推进实验室(JPL)是设在加利福尼亚理工学院帕萨迪纳的一个研究部。JPL的历史可追溯到20世纪30年代早期,当时毕业于加州理工学院古根海姆航空实验室的学生 Frank Malina,就他的毕业论文向导师 Theodore von Karman 提出了一个设计、建造和测试火箭发动机的建议。建议被接纳后,Malina 就开始着手研究工作。他很快挑选了两个助手,而且他们的合作研究获得了很大进展。实际上加州理工学院禁止他们进一步开展实验(与噪声过大有关),于是他们将实验设备搬到了约距加州理工学院校园 12km 的一个干燥的河谷内,正好在帕萨迪纳市所辖范围外,即现在的 La Cañada 市,也是目前 JPL 所在的位置。

实验在整个 20 世纪 30 年代都进展得很顺利,直至第二次世界大战开始,Karman 将该项研究扩建成了一个新的实验室,后来称为喷气推进实验室。JPL 的成功实验使其在整个“二战”期间和以后都获得了美国陆军的资助。此时,美国正在研制弹道导弹,JPL 参与了无线电跟踪和导弹控制项目,而这一跟踪系统就是目前用于跟踪航天器的全球深空网(DSN)的先驱。

苏联在 1957 年发射了第一颗人造地球卫星。第二年,JPL 并入新成立的国家航空航天局,自此,JPL 及 DSN 就一直领导或支持着对太阳系每一颗行星和其他诸多天体的探测活动。

当前 JPL 的目标之一是更深入地了解太阳系的起源和演化,进而了解宇宙中生命的起源和进化。这一目标将由那些到达行星、行星的卫星、小行星和彗星的机器人航天器来承担。除此之外,JPL 还支持探测宇宙边界的许多宇宙飞行器的星载观测,而且,这些探测活动所获得的数据还在稳步增长中。而 DSN 的目标是从航天器获取遥测数据、向航天器发送遥控指令、获取航天器的位置和速度、进行甚长基线干涉观测、进行射电和天文研究、为射电科学试验测量无线电波的各种变化、搜集科学数据、监视和控制测控网的性能。

DESCANSO 系列丛书的主编 Joseph H. Yuen 规定了 DSN 技术的范围和描述。本书是该系列丛书之一,阐述构成所有 DSN 地面站前端的低噪

声微波系统。微波前端是确定接收链路乃至整个地面站灵敏度和性能的关键。接收系统的灵敏度和性能用 G/T 值来表示,这里 G 是天线增益, T 是整个接收链路的总噪声温度,通常称为系统工作噪声温度 T_{op} 。为了提高地面站的接收能力,必须提高 G/T 值,它可以通过增大天线增益或减小 T_{op} 来实现。过去,DSN既增大天线增益 G ,也减小系统工作噪声温度 T_{op} ,但事实表明,在一定程度上减小 T_{op} 比增大 G 会更加经济和有效。

因为地面站的微波前端对于确定接收链路的灵敏度和性能至关重要,接收系统的设计者们有责任付出巨大努力来减小 T_{op} 、标校和保持前端的低噪声。 T_{op} 确定的越精确,就越能减小航天器任务设计中允许的容差,而减小航天器功率设计容差能够大大降低成本,对于同样的航天器功率而言,就意味着增大科学数据的传送速率,或在这两者之间进行折衷。因此,提高接收链路的校准精度是极其重要的。精确的噪声温度校准对于保持地面站的低噪声性能也同样重要,同时,天线增益的测量精度也非常重要。本书还介绍了目前天线校准和其他一些新技术。

在行星际距离上成功完成无线电通信很困难,也极富挑战性。在DSN系统中为达到所需的系统灵敏度,都需采用极低噪声的前端。本书描述了DSN中各种低噪声系统,包括它们的开发、校准和操作,以及这些系统是如何用于跟踪和科学试验的。其中一章叙述前端的总系统噪声温度校准,其他章节详细阐述几种低噪声接收机前端,还有大气和天线增益的校准。

本书适合于通信系统、射电和天文台、空间研究设施和干涉测量天文台的设计和操作人员阅读。本书给出了严密而详细的分析,为便于参考,还汇集了一些关键的公式。在系统噪声温度计算中一般不使用精确定义(比通常工业中使用的更精确),它们都基于IEEE标准和规范,而技术人员通常都不使用,其他书本也没有探究得如此详细。然而,所有的分析过程和公式都用来自现场的测量数据的实例充分说明。详细的说明使读者利用有限的知识就足以理解全文,但必要时,仍不缺乏严密的推导,虽然有些部分可能用到研究生程度的微积分知识,但具备高等代数和大学微积分知识的读者一般就能够理解本书中的内容。分析是通过示例和详细研究计划给出的,所以测量数据校准误差的均值和统计分析并不需要进行数学运算。

Macgregor S. Reid,

加利福尼亚州帕萨迪纳

2008年2月

致 谢

本书介绍了加州理工学院喷气推进实验室按美国国家航空航天局合同进行的研究成果。

编者和合著者感谢 DESCANSO 系列丛书总编辑 Joseph H. Yuen 持续不断的建议、帮助、评论和鼓励。此外,还感谢 JPL 的编辑 Patricia A. Ehlers 和 Roger V. Carlson、版面设计师 Judi Dedmon。Dan Bathker 提供了许多 DSN 天线的知识,特别是 70m 口径天线。Tom Otoshi 提供了许多 DSN 微波前端部件和系统的详细分析文稿。

第 2 章的作者感谢 Robert C. Clauss 对初稿的审阅,并感谢与其合写了作为本章基础的许多 DSN 进展报告。David L. Hills 提出的疑问和给出的说明都提供了有益的帮助,戈尔德斯顿通信设施的 Douglas S. Hofine 和 Gary Bury 提供了许多数据,Manuel M. Franco 和 Lyle J. Skjerve 提供了许多戈尔德斯顿天线获取的数据和馆藏数据。Samuel M. Petty 为第 2.4 节低噪声放大器的编写提供了大量信息,Stephen D. Slobin 检验了第 2.5 节接收系统中的大量算法和计算结果。

第 3、4 章的作者殷切感谢从 1955 年开始领导 JPL 脉泽开发,并已为此工作了二十多年的 Walter Higa 博士。他召集和领导的团队负责用于大口径 DSN 天线现场环境脉泽的研究、开发和操作运行等诸多方面,研究了包括量子物理、微波工程和重点在低温制冷器热力学设计在内的多项技术。我们感谢 JPL、DSN、各大学、航空仪表实验室和贝尔电话实验室的科学家、工程师、技术员和专家们,感谢他们为脉泽开发和成功运行所做出的大量贡献。

第 5 章的作者 Bautista 博士诚恳感谢为了保障旅行者号与海王星相遇而最早构想和建议开发低温 HEMT 的 Sander Weinreb 和 Sam Petty。他还想表达进行微电路部件制作的 Bert Fujiwara 和 Steve Montanez,以及将高电子迁移晶体管引入 DSN 的 Jose Fernandez 的感激之情。

第 6 章的作者 Shambayati 博士想要感谢为他讲解 JPL 地面天气模型的喷气推进实验室的 Stephen D. Slobin 博士。

第 7、8 章的作者 Rochblatt 博士想要感谢那些为本书做贡献的人:首先也是最重要的是作系统分析和开创光栅扫描技术的 JPL 的 Paul Richter; Phil Withington 和 Herschel Jackson 为研制中测绘研制型系统所做的贡献;来自西班牙马德里深空跟踪站(MDSCC)的 Manuel Vasquez 和 Jesus Calvo 为开发实用天线校准仪器所做的贡献。此外,作者还要感谢 Stephen Slobin, Art Freiley, Graham Baines, Charles Stelzried, Manuel Franco 和 Pablo Perez 通过技术讨论所做出的贡献。而且,还要感谢 W. Van Snyder 协助完成了对公式(7.4-13)的积分。Rochblatt 博士感谢戈尔德斯顿金星开发站的 Lawrence Teitelbaum、JPL 射电天文和雷达小组及技术人员,感谢他们对戈尔德斯顿苹果谷射电望远镜工程和在戈尔德斯顿的木星巡视勘察的持续支持。

Rochblatt 博士感谢以下为全息测量计划成功完成作出贡献的来自 JPL 的人:Dan Bathker, Boris Seidel, Phil Withington, Herschel Jackson, Yahya Rahmat-Samii, Carl Jones, Lawrence Ansley 和 Peter Kinman。他还要感谢为本计划的成功做出贡献的 Eikontech 有限公司和干涉测量公司。

2008 年 2 月

撰稿人简介

J. Javier Bautista 于 1971 年获得圣·马力大学(得克萨斯州散安东尼奥)物理学学士学位,并于 1974 年和 1979 年分别获得密歇根州立大学(密歇根州东兰辛)低温物理学硕士和博士学位。他目前在加州帕萨迪纳喷气推进实验室,任地面站地面通信系统的首席工程师。1986 年,他成立了 JPL 低温电子前端设备小组,增强和改进了 JPL 的低温制冷、低噪放大器(LNA)和电路性能。该小组的主要职责是为 DSN 和 DSN 的原型小口径天线阵开发基于原型高电子迁移晶体管(HEMT)的 LNA。他目前负责 DSN 从 1~40GHz 基于 HEMT 的低温制冷技术以及相关的 LNA 设计和开发,还包括研究低噪声放大器、器件和元件的特性测量技术。

Robert C. Clauss 在美国海军部队军用电子学校毕业后,从帕萨迪纳城市大学(加州)获得了准学士学位。他在 JPL 工作了 47 年后于 2006 年退休,其间曾任技术员、工程师、主管和研究项目负责人。他在微波系统和设备方面的工作包括 1~40GHz 频率的脉泽开发、航天器应答机和发射机的设计,指导那些参与地球轨道卫星 SURFSAT 设计、建造和跟踪的大学生。他曾获得 8 项专利、18 次 NASA 技术研发奖金和 NASA 优秀维护奖章。

Arthur J. Freiley 于加州工业大学(加州波莫纳)获得电气工程学士学位。1970 年,他作为 NASA JPL DSN 研究和开发地基大口径反射器天线和校准技术的天线与传播小组成员加入 JPL。随后任 DSN 天线微波子系统的资深开发工程师,开发微波馈源系统(包括计算机控制系统)。还曾任戈尔德斯顿太阳系雷达(GSSR)兆瓦级发射机系统开发的任务负责人。近期,他还作为天线微波系统工程师,提出系统需求、并按这些需求进行鉴定和验证系统性能。此外还担任戈尔德斯顿—苹果谷射电望远镜(GAVRT)教育延伸计划的系统工程师。

Macgregor S. Reid 获得维特奥特斯兰德大学(南非,约翰内斯堡)的理学学士(1953 年)、工程学士(1956 年)、工程硕士(1962 年)和博士学位(1969 年)(所有均属于工程学领域)。Reid 博士从 1969 年开始在 JPL 工作直至 1998 年退休。在他职业生涯的最后 10 年中,担任 JPL 主任的执行助

理,并做过3年的美国航空航天学会(AIAA,华盛顿,哥伦比亚行政区)副主席。Reid博士曾担任9年的国际标准化组织空间系统和操作分会的组建主席,并作为美国代表在航空和航天操作国际标准化委员会中工作12年。他供职于国内、外多个咨询委员会,并是80多篇技术文献的作者,其中有3篇获奖。为了褒奖他这些国际性的工作,1998年以Reid博士命名(6894 MacReid)了一颗小行星。他获得过AIAA和NASA授予的奖章,并6次荣获NASA奖金,以奖励他在新技术上的创新。

David Rochblatt是国际上公认的在大口径反射器天线和计量方面的顶级专家。Rochblatt曾任设计工程师、研究和开发地面天线系统的管理者、NASA-JPL-DSN天线校准专家,工作了超过25年。1995年,他因为开发了微波天线全息测量系统,荣获NASA杰出成就奖。Rochblatt还是俄罗斯空间局、美国海军研究实验室(麦瑞兰,马里兰特),那不勒斯大学(意大利)、阿姆赫斯特的马萨诸塞大学、雪松西奈山医学中心(加州洛杉矶)的顾问。此外,他还受邀在许多IEEE讨论会上演讲。Rochblatt从洛杉矶加利福尼亚大学(UCLA)获得电机工程学士和博士学位(分别于1978年和1980年),也是IEEE的资深会员。他在杂志和会议上发表过70篇论文,并获得超过12次的NASA成就奖。他的其他专长还包括深空通信、逆散射问题、微波与光学通信的相位恢复应用等。

Shervin Shambayati在1989年获得加利福尼亚州立大学应用数学专业的学士学位,并于1991年、1993年和2002年分别获得了洛杉矶加利福尼亚大学的电气工程学士、工程师职称和博士学位。Shambayati博士于1993年进入JPL深空通信组,在这里,他参与了深空网伽利略遥测接收机(DGT)和34m天线组阵项目的开发和测试工作。1997年,Shambayati博士调到JPL信息处理组,在这里他一直工作至今。他和信息处理组一同参与了火星全球勘测者号Ka频段链路试验II(MGS/KaBLE II)和深空1号飞行中的Ka频段试验。最近,Shambayati博士成为了火星勘测轨道器Ka频段验证试验的学术带头人。Shambayati博士的主要研究领域包括天气对整个深空链路性能的影响评估、端到端链路设计和对航天器Ka频段下行链路进行操作。

James S. Shell在1975年和1976年分别获得了密歇根州阿安伯密歇根大学的工程物理学士学位和物理学硕士学位,1982年获得了密歇根州立大学(密歇根州东兰辛)物理学博士学位。他的研究集中在低温下稀磁合金的磁性上。1985年进入JPL之前,就职于亨利福特医院(底特律)从事

超声成像工作,以及在皇家学院(伦敦)从事金属低温特性研究工作。来到 JPL 后,他主要从事 DSN 低噪声微波放大器(包括红宝石脉泽和高电子迁移率晶体管)和低温学方面的研究。目前,他是 JPL 航天器应答机组的成员。

Charles Stelzried 博士获得了洛杉矶加利福尼亚大学工程学士(1957 年)、工程硕士学位(1969 年)和南加利福尼亚大学(加利福尼亚洛杉矶)工程博士学位。从 1953 年至 2005 年退休,一直就职于加利福尼亚帕萨迪纳喷气推进实验室。Stelzried 博士从 1961 年第一次金星雷达试验开始在加利福尼亚戈尔德斯顿协助研制 DSN 低噪声接收系统。他曾是 1965 年到 1981 年间远程通信工程部的技术组负责人,还是 NASA 水手 10 号、海盗号和太阳神任务的射电科学小组成员。1981—1986 间,担任尤利塞斯、麦哲伦、桥托、金星气球和织女星探路者号深空任务的 DSN 经理。Stelzried 博士是 IEEE 会员,也是 Tau Beta Pi, AAAS 和射电科学委员会 A 的国际联盟成员。他曾编写了 170 多篇 JPL DSN 进展报告,获得 5 项专利(包括深空站 70m 天线使用的多喇叭结构),发表了 60 多篇审定论文。他还获得过包括 NASA 杰出科学贡献奖在内的多次 JPL/NASA 奖励。

目 录

第 1 章 概论	1
参考文献	8
第 2 章 深空网所用的系统噪声概念	9
2.1 概述	9
2.2 噪声温度的概念	12
2.2.1 热噪声	12
2.2.2 系统工作噪声温度	13
2.2.3 普朗克辐射定律噪声功率减小	14
2.2.4 不同参考位置噪声温度的转换	17
2.2.5 噪声温度和损耗分量	19
2.2.6 接收机噪声温度和噪声系数	19
2.3 天线	19
2.3.1 天线噪声温度	19
2.3.2 DSN 天线	21
2.3.3 天线外部噪声源	23
2.4 低噪声放大器	30
2.4.1 接收机等效噪声温度	30
2.4.2 级联放大器的噪声温度	30
2.5 接收系统	32
2.5.1 接收系统的品质因数	32
2.5.2 接收系统工作噪声温度	32
2.6 测量方法	47
2.6.1 Y 因子噪声温度校准法	47
2.6.2 衰减	50
2.6.3 接收系统的非线性	51
2.6.4 接收系统小型校准	55

2.7	DSN 中的辐射计	55
2.7.1	引言	55
2.7.2	总功率辐射计	56
2.7.3	迪克辐射计	58
2.7.4	加噪声辐射计	58
2.7.5	辐射计稳定性	62
2.8	现状和未来	64
	参考文献	70
第 3 章	红宝石脉泽	74
3.1	引言	74
3.2	红宝石特性	77
3.3	旋子谐振、外加磁场、红宝石定向、低温需求和激励	78
3.4	旋子晶格弛豫时间、反转比、跃迁概率、填充系数和磁 Q	80
3.5	红宝石脉泽的噪声温度	86
3.6	红宝石脉泽用作噪声温度标准	91
3.7	防射频干扰	94
3.8	早期的 DSN 腔体脉泽	94
3.9	梳型行波脉泽	97
3.10	反射波脉泽	108
3.11	Ka 频段返回腔体脉泽	110
3.12	脉泽设计分析	112
	参考文献	121
第 4 章	低温制冷系统	126
4.1	简介	126
4.2	使用低温冷却的优点	128
4.3	开环制冷	130
4.4	热传递	134
4.5	装在天线上的制冷器的操作	138
4.6	闭环氦制冷机	139
4.7	小结	151
	参考文献	152

第 5 章 高电子迁移率晶体管低噪声放大器	154
5.1 引言——半导体的电导率	154
5.1.1 载流子和能带间隙	154
5.1.2 载流子的迁移特性	155
5.1.3 施主杂质和受主杂质	157
5.1.4 异质结——HEMT 与 MESFET	158
5.2 多简称器件(MAD)——HEMT 简史	159
5.2.1 用于深空网和射电天文的 HEMT ——旅行者飞抵海王星	159
5.2.2 深空网的 InP 基 HEMT 低噪声放大器	160
5.3 HEMT 的生长技术	161
5.3.1 分子束外延(MBE)	161
5.3.2 金属有机化学气相沉积法(MOCVD)	162
5.4 HEMT 材料的演变——从 GaAs 到 InAs	163
5.4.1 AlGaAs/GaAs 基低噪声 HEMT 器件的 优化结构	164
5.4.2 GaAs 赝同晶 HEMT 器件 ——AlGaAs/InGaAs/GaAs 基 PHEMT	165
5.4.3 InP 上 InAlAs/InGaAs HEMT 器件	167
5.4.4 GaAs 基 InAlAs/InGaAs HEMT 器件 ——变形高迁移晶体管或 MHEMT	168
5.5 器件制造	169
5.5.1 晶片的制备与清洁	169
5.5.2 “混合”光刻照相	170
5.6 HEMT 器件的噪声模型	174
5.6.1 带噪线性二端模型	174
5.6.2 半经验小信号噪声模型	175
5.7 低噪声放大器的开发	179
5.7.1 器件特性表征——低温探针测试台	180
5.7.2 器件特性表征——低温探针台校准	181
5.7.3 器件特性测量及模型	182
5.7.4 无源元件特性测量及模型	186

5.8 低噪声放大器的建模和特性表征	186
5.9 子系统测量	190
5.10 小结	192
参考文献	193
 第 6 章 微波频率上的大气衰减和噪声温度	204
6.1 概述	204
6.2 地表气象模型	206
6.2.1 $T_p(h)$ 的计算	206
6.2.2 $\alpha(h, f)$ 的计算	207
6.3 水汽辐射计数据	212
6.3.1 水汽辐射计及其数据处理方法	212
6.3.2 由 31.4GHz 天空亮温度测量数据计算 大气噪声温度	212
6.3.3 基于 WVR 测量数据的 DSN 大气噪声温度统计 ..	215
6.4 天气预报	218
6.5 结束语——未来发展方向	220
6.5.1 当前状态	220
6.5.2 Ka 频段的近期发展	221
6.5.3 天线组阵	221
6.5.4 光通信	222
6.5.5 天基中继转发站	222
参考文献	223
 第 7 章 天线校准	225
7.1 概述	225
7.2 对校准系统的要求	228
7.3 测量口面效率和指向精度的常规方法	228
7.3.1 源尺度修正系数	229
7.3.2 通量密度	231
7.3.3 辐射源温度	232
7.4 光栅扫描法	233
7.4.1 系统噪声温度的波动	236