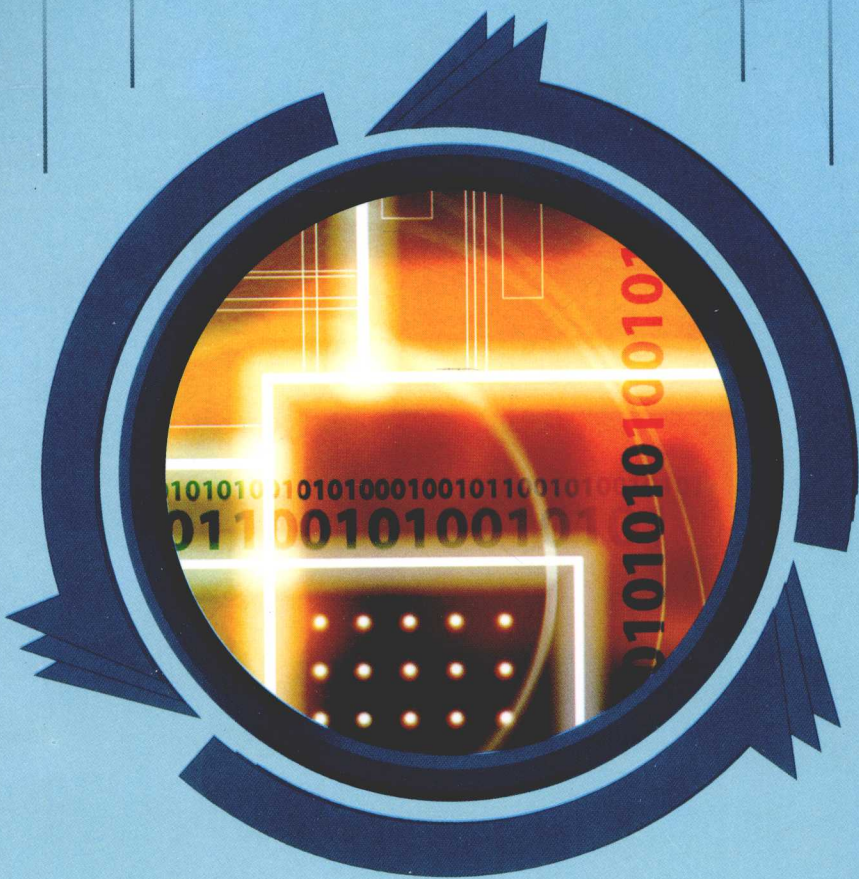


现代通信高技术丛书

深空通信

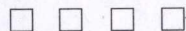
周贤伟 主编
尹志忠 王建萍 刘涛 王超 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

现代通信高技术丛书

深 空 通 信



周贤伟 主编

尹志忠 王建萍 刘涛 王超 编著

北 国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

内 容 简 介

本书全面系统地阐述了深空通信的基本理论、基本技术,以及深空通信领域研究的热点问题,基本反映了深空通信发展的现状。

全书共分为9章,内容包括概论、深空通信链路、深空通信天线、深空通信调制、深空通信的差错控制编码、深空通信的高效信道编码、深空光通信、深空网络、深空通信前景与展望。

本书概念清晰、由浅入深、循序渐进,可作为高等学校通信、电子和信息类专业高年级本科生和研究生的教材或教学参考书,也可作为具有相应水平从事空间探测、航天测控等领域的工程技术人员和管理人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

深空通信 / 周贤伟主编. —北京:国防工业出版社,
2009.5

(现代通信高技术丛书/周贤伟,邓忠礼,郑雪峰主编)

ISBN 978 - 7 - 118 - 06207 - 6

I. 深... II. 周... III. 航空通信 IV. V243.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 016705 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 17 1/4 字数 385 千字

2009年5月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 33.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

《现代通信高技术丛书》编委会

名誉主任 周炯槃(院士)

总 编 宋俊德

主 编 周贤伟 邓忠礼 郑雪峰

副主编 曾广平 景晓军 雷雪梅 王丽娜 杨裕亮 马伍新

王祖珮 班晓娟 刘蕴络 王昭顺 王建萍 黄旗明

李新宇 杨 军 覃伯平 薛 楠

编 委 (按姓氏笔画排序)

马伍新 王 丹 王 华 王 培 王 强 王庆梅

王丽娜 王建萍 王昭顺 王祖珮 王淑伟 韦 炜

尹立芳 邓忠礼 申吉红 付娅丽 白浩瀚 冯 震

冯晓莹 吕 越 朱 刚 刘 宁 刘 宾 刘 潇

刘志强 刘晓娟 刘蕴络 闫 波 关靖远 安 然

孙 硕 孙亚军 孙辰宇 孙晓辉 苏力萍 李 杰

李宏明 李新宇 杨 军 杨文星 杨裕亮 肖超恩

吴齐跃 宋俊德 张海波 张臻贤 陈建军 林 亮

周 蓉 周贤伟 郑如鹏 郑雪峰 孟 潭 赵鹏(男)

赵鹏(女) 赵会敏 胡周杰 施德军 姜 美 姚恒艳

班晓娟 黄旗明 崔 旭 韩 旭 韩丽楠 覃伯平

景晓军 曾广平 雷雪梅 薛 楠 霍秀丽 戴昕昱

丛书策划 王祖珮

序

当今世界已经进入了信息时代,信息成为一种重要的战略资源,信息科学成为最为活跃的学科领域之一,信息技术改变着人们的生活和工作方式,信息产业已经成为国民经济的主导产业,作为信息传输基础的通信技术则成为信息产业中发展最为迅速,进步最快的行业。目前,个人通信系统和超高速通信网络迅猛发展,推动了信息科学的进一步发展,并成为21世纪国际社会和全球经济的强大动力。

随着通信技术日新月异,学习通信专业知识不但需要扎实的专业基础,而且需要学习和了解更多的现代通信技术和理论,特别是数字通信、卫星通信以及传感器网络的现代通信技术方面的知识。从有线通信到无线通信,从固定设备间的通信到移动通信,从无线通信到无线因特网,到传感器网络技术。未来的通信将为人们提供全方位以及无缝的移动性接入,最终实现任何人在任何地方、任何时间进行任何方式的通信,使得通信技术适应社会的发展需要呈现经久不衰的势头。

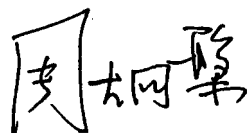
网络技术的飞速发展,通信技术在经济发展中的重要地位日趋重要,世界各国特别重视通信技术的理论研究和通信技术专业人才的培养,国外有关通信领域的文献资料和专著较多。就国内来讲,通信专业人才大量急需,为适应社会经济发展的需要,各高校和科研单位都在培养社会所需的通信专业人才。

为了增进通信及安全技术领域的学术交流,为了满足通信及信息安全专业领域的读者的需要,提供一套能系统、全面地介绍和讲解通信技术原理及新技术的系列丛书,北京科技大学等组织编写了这套《现代通信高技术丛书》。这套丛书内容涵盖了通信技术的主要专业领域,既可作为高等院校通信类、信息类、电子类、计算机类专业高年级本科生或研究生的教材,又可作为有关通信技术和科研人员的技术参考书。

我觉得这套丛书的特点是内容全面、技术新颖、理论联系实际,针对目前

我国通信技术发展情况与目前已有的相关出版物之间已有一定距离这一情况,本丛书立足于现在,通过对基本的技术进行分析,由浅入深,努力反映通信技术领域的新成果、新技术和进展,是国内目前较为全面、技术领先、适用面广的一套丛书。在我国大量培养通信专业人才的今天,这套丛书的出版是非常及时和十分有益的。

我代表编委会对丛书的作者和广大读者表示感谢!欢迎广大读者提出宝贵意见,以使丛书进一步修改完善。

A handwritten signature in black ink, consisting of the characters '周', '炯', and '旻' written in a cursive style. The signature is enclosed in a simple rectangular box.

2005年3月20日

前 言

20 世纪 50 年代,人类利用航天技术开辟了探索外层空间的新时代,进入 21 世纪,人类迎来了深空探测活动的新热潮。迄今为止,人类已经完成了 120 次成功或基本成功的深空探测活动,探测了太阳系的 7 颗行星和太阳、彗星、小行星以及月球,并实现了在火星、金星、土卫六等天体上的软着陆。已有 4 个探测器飞出了太阳系。与此同时,我国的深空探测活动也进入了崭新的发展阶段。2000 年和 2006 年,中国政府分别发布《中国的航天》白皮书。2007 年 2 月,标志着中国政府未来空间科学发展蓝图《“十一五”空间科学发展规划》发布实施,指出未来 15 年,我国在环月探测的基础上,积极进行月球探测和以火星为主线的深空探测。同年 10 月,《航天“十一五”规划》发布实施,将载人航天工程、月球探测工程等列入重大科技工程。同年 11 月,我国首次月球探测工程取得圆满成功,实现了中华民族的千年奔月梦想,开启了中国人走向深空探索宇宙奥秘的时代,标志着我国已经进入世界具有深空探测能力的国家行列。

深空通信一般是指地球上的实体与处于月球及月球以远的宇宙空间中的航天器之间的通信,包括各行星表面的区域通信以及地球与太阳系以外星球间的通信。深空通信是维系人类与深空探测器的纽带,是实现深空探测的基础和重要保证。美国、苏联是最早开展深空探测和深空通信的国家,欧洲航天局也于 21 世纪提出了未来 20 年空间科学发展的“宇宙全景计划”,深空通信技术正处在不断地向前飞速发展之中。为了全面系统地阐述深空通信的基本理论、基本技术以及深空通信领域研究的热点问题,力求做到内容全面、技术新颖、理论联系实际,同时兼顾基础性、先进性和普遍性,本书以美国 NASA 的深空网以及欧洲航天局的深空探测资料为基础,经过全面分析和系统归纳,尽可能将深空通信领域的主要技术进展和研究成果呈现给读者。

本书共分为 9 章。第 1 章概括介绍了深空通信的基础知识,包括深空通信的相关概念、深空通信的主要术语和技术指标、宇宙空间环境,以及深空通信的发展概况、深空通信的主要特点、系统组成和深空通信的几种基本技术。第 2 章从深空通信链路的重要性出发,主要介绍深空网络链路结构、当前的发展状况,以及在数据传输过程中对可靠性产生影响的因素,并介绍分析了几种国际上对于克服深空通信干扰、提高通信链路容量的科研成果,以及链路分析工具。第 3 章围绕当今主流的 2 种深空天线系统,详细介绍了系统要求和制约因素,全面描述了所选的系统结构,分析和讨论了系统设计的关键技术,概述了天线系统改善方案以及微卫星技术中的天线组阵。第 4 章主要介绍了一种应用于深空通信的 GMSK 解调器以及为通信和导航实现混合 GMSK 调制和 PN 测距的方法。第 5 章讨论了深空通信的差错控制编码,主要包含未来新的空间通信任务对通信带来的新要求和

未来空间通信对信道编码设计的重要依赖性,并介绍了长擦除纠正编码和它的一系列性能指标。第6章从码的设计与组成、码的实现和应用情况3个方面,更进一步分析和讨论了深空通信高效信道编码技术,即 Turbo 码技术和低密度奇偶校验码技术,并介绍了深空通信纠错码的标准化情况。第7章依托 NASA/JPL 的最新研究成果,讲述了深空光通信技术,主要包含深空光通信系统组成、激光源、探测器、光学系统和调制编码技术。第8章讨论了深空网络,主要分析了深空网络的部署和运作、构建和路由,重点讨论了 DS-TP:深空传输协议。第9章主要阐述了深空通信关键技术今后的发展趋势,包括工作频段、通信协议、光通信技术、天线组阵技术和深空探测无线电测量新技术,并结合深空通信技术的特点,对深空网的发展前景进行了展望。

本书概念清晰、由浅入深、循序渐进,可作为高等学校通信、电子和信息类各专业高年级本科生和研究生的教材或教学参考书,也可供具有相应水平从事空间探测、航天测控等领域的工程技术人员和管理人员的参考读物。

北京科技大学通信工程学科的教师王建萍、刘涛、王超,博士生尹志忠、张龙、马骁,硕士生郭营、张明东、张继光、晋津、李维、陈静毅、金田等参加了本书的编写工作。在本书编写过程中,得到了国防工业出版社和北京科技大学通信工程系的大力支持、鼓励和帮助,参考或直接引用了国内外许多学者的论文和著作,还得到了国家自然科学基金项目“认知无线电安全关键技术研究(No. 60773074)”的资助,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者学识水平有限,再加上时间仓促,书中难免存在纰漏之处,恳请广大读者和同行专家批评指正。

编著者
2008年10月于北京

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 深空通信的基础知识.....	1
1.1.1 深空通信的相关概念	1
1.1.2 深空通信的主要术语和技术指标	3
1.1.3 宇宙空间环境	7
1.2 深空通信的发展概况	14
1.2.1 起源阶段.....	14
1.2.2 “水手”号阶段	21
1.2.3 “海盗”号阶段	22
1.2.4 “旅行者”号阶段	23
1.2.5 “伽利略”号阶段	24
1.2.6 “卡西尼”号阶段	27
1.2.7 深空通信发展趋势.....	29
1.3 深空通信的主要特点	29
1.4 深空通信系统的组成	30
1.4.1 无线电跟踪系统.....	31
1.4.2 遥测系统.....	33
1.4.3 指令系统.....	34
1.4.4 航天器无线电频率子系统.....	36
1.5 深空通信的基本技术	39
1.5.1 天线技术.....	39
1.5.2 Ka 频段通信技术	43
1.5.3 数字化接收机技术.....	45
1.5.4 HEMT 放大器技术.....	45
1.5.5 数据压缩技术.....	46
1.5.6 调制技术.....	46
1.5.7 信道编码技术.....	48
1.5.8 深空光通信技术.....	50
1.5.9 深空网络技术.....	54
小结.....	59
参考文献.....	60
第 2 章 深空通信链路	62

2.1	深空通信链路的重要性	62
2.2	深空通信的链路结构及优化	62
2.2.1	链路结构及优化简介	62
2.2.2	优化方法分析	63
2.2.3	分析结论及讨论	65
2.2.4	优化理论应用	71
2.3	用于深空网络的深空通信链路分析工具	75
2.3.1	天文动力学轨道建模	75
2.3.2	通信建模	76
2.3.3	自动分析	77
2.3.4	结果小结	78
2.4	通过 Ka 频段对于空间传输速率的优化	79
2.4.1	简介	79
2.4.2	大气噪声温度估算	80
2.4.3	吞吐率与服务有效性比较	83
	小结	85
	参考文献	85
第3章	深空通信天线	86
3.1	概述	86
3.2	系统要求和制约因素	87
3.3	系统结构	88
3.4	系统设计的关键技术	91
3.4.1	天线指向和表面粗糙度	91
3.4.2	微波系统的设计	96
3.4.3	频率范围和转换系统	101
3.4.4	天线中的 TT&C 处理器系统	102
3.5	天线系统改善方案	104
3.5.1	DSA 2 中的波束校正方法	104
3.5.2	采用 26GHz 的新频段	104
3.5.3	新的参考频率	105
3.5.4	新一代的 TT&C 处理器	106
3.6	微卫星技术中的天线组阵	106
	小结	107
	参考文献	107
第4章	深空通信调制	109
4.1	一种应用于 ESA 深空任务的 GMSK 解调器	109
4.1.1	技术背景	109
4.1.2	IFMS 中的 ESA 深空天线接收机	110

4.1.3	在 IFMS 中实现相干解调器的理想方案和实用方案	111
4.1.4	解调器结构	112
4.1.5	调制器	115
4.1.6	仿真与测试结果	117
4.1.7	结论与总结	118
4.2	应用于通信和导航的混合 GMSK 调制和 PN 测距	119
4.2.1	技术背景	119
4.2.2	SFCG 带宽标准	120
4.2.3	高数据率与测距相结合	122
4.2.4	波形	122
4.2.5	信号处理	123
4.2.6	信号频谱结构	127
4.2.7	信号参数选择	129
4.2.8	波形选择	133
4.2.9	结论	135
	小结	135
	参考文献	136
第 5 章	深空通信的差错控制编码	137
5.1	信道编码简介	137
5.2	差错控制编码的定义和基本符号	139
5.2.1	卷积码简介	139
5.2.2	RS 码简介	142
5.3	未来空间任务对信道编码的要求	143
5.3.1	信道编码的应用场合	143
5.3.2	新信道编码的局限性	144
5.3.3	信道编码支持的调制方式	144
5.3.4	编码效率	145
5.3.5	信道编码的帧和码字长度	146
5.3.6	信道编码的性能	146
5.3.7	信道编码的复杂度	147
5.3.8	如何选择编码族	149
5.3.9	专用传输码	150
5.3.10	信道编码的技术解决	150
5.4	长纠错码 LEC	150
5.4.1	空间通信的包定向编码	151
5.4.2	传统的包纠错码	152
5.4.3	包纠错码的新契机	152
5.4.4	LEC 编码的一般要求	155

5.4.5	LEC 编码的适用场合	157
小结	158
参考文献	158
第 6 章	深空通信的高效信道编码	162
6.1	纠错码在深空通信中的发展简介.....	162
6.2	Turbo 码	164
6.2.1	Turbo 码的设计与组成.....	165
6.2.2	Turbo 码的实现.....	166
6.2.3	应用情况	169
6.3	低密度奇偶校验码.....	170
6.3.1	LDPC 码的设计和构造	170
6.3.2	LDPC 码的实现	172
6.3.3	应用情况	177
6.4	性能分析.....	178
6.4.1	所有类型码的泛界	178
6.4.2	Turbo 码的一致界.....	179
6.4.3	Turbo 码与 LDPC 码的迭代译码阈值	179
6.4.4	实用码的性能	180
6.5	深空通信纠错码的标准化.....	180
6.5.1	Turbo 码的标准化.....	180
6.5.2	LDPC 码的标准化	182
6.6	未来的发展和面临的问题.....	183
小结	184
参考文献	184
第 7 章	深空光通信	188
7.1	概述.....	188
7.1.1	激光通信的优势	189
7.1.2	深空光通信的国内外发展动态	189
7.2	深空光通信系统组成.....	192
7.3	激光源.....	194
7.3.1	星间通信对激光源的要求	194
7.3.2	激光源技术的发展	194
7.4	探测器.....	195
7.4.1	星间激光通信对探测器的要求	195
7.4.2	光探测器的发展	195
7.5	光学系统.....	196
7.5.1	光学天线	197
7.5.2	中继光学系统	198

7.6	ATP 系统	199
7.6.1	粗跟踪系统	200
7.6.2	精跟踪系统	200
7.6.3	超前瞄模块	200
7.6.4	ATP 控制器	201
7.7	调制编码技术	201
7.7.1	深空激光链路的特点	202
7.7.2	不同星间激光链路对应的调制方式	202
7.7.3	IM/DD 系统及调制方式	203
7.7.4	相干光通信系统	207
7.7.5	深空光通信调制编码结合应用	208
7.7.6	MLCD 系统	209
	小结	213
	参考文献	213
第 8 章	深空网络	217
8.1	概述	217
8.2	深空网络的部署和运作	218
8.2.1	深空网络的部署	218
8.2.2	深空网络的运作	220
8.3	深空网络的构建	221
8.3.1	行星际因特网的体系结构	221
8.3.2	深空网络的演变	222
8.4	深空网络的路由	223
8.4.1	命名与寻址规则	223
8.4.2	骨干网络	224
8.4.3	行星网络	224
8.5	DS-TP:深空传输协议	224
8.5.1	协议的选择	224
8.5.2	相关的方案	225
8.5.3	DS-TP 的具体内容	227
8.5.4	对 DS-TP 的理论评价	230
8.5.5	DS-TP 和 FR-TP 的比较	236
8.5.6	结论	240
	小结	240
	参考文献	240
第 9 章	深空通信前景与展望	242
9.1	概述	242
9.2	深空通信关键技术的发展趋势	244

9.2.1	工作频段提高到 Ka 频段	244
9.2.2	深空通信协议技术	245
9.2.3	光通信技术	248
9.2.4	天线组阵技术	250
9.2.5	深空探测无线电测量新技术	250
9.3	深空通信的前景	252
9.3.1	构建行星际互联网络	253
9.3.2	利用月球及其拉格朗日点开展深空探测	255
9.3.3	从地基到地空基的通信网	255
	小结	257
	参考文献	257

第 1 章 概 论

无垠的太空是人类共同的财富,探索太空是人类的共同追求。探索和认识宇宙奥秘,开发和利用宇宙资源,探求人类进入新的活动疆域的可能与途径,这已成为国际宇航界的三大任务,也是世界各国竞相开展宇宙探测的动力之所在。

人类的探测活动离不开通信技术的支持与保障,通信是维系人类与深空探测器的纽带。深空通信一般是指地球上的实体与处于月球及月球以远的宇宙空间中的航天器之间的通信,包括各行星表面的区域通信以及地球与太阳系以外星球间的通信。

本章主要以美国 NASA 的深空网和深空探测为背景,首先介绍深空通信的基础知识,包含深空通信的相关概念、深空通信的主要术语和技术指标以及宇宙空间环境情况,然后介绍深空通信的发展概况、主要特点和系统组成,最后简要介绍深空通信的几种基本技术。

1.1 深空通信的基础知识

1.1.1 深空通信的相关概念

外层空间(Outer Space)是地球稠密大气层之外的宇宙范围,简称外空或空间(Space),又称太空。“外层空间”一词首次由 Herbert George Wells 于 1901 年提出^[1]，“空间”一词则首次由 John Milton 于 1667 年在著名史诗 *Paradise Lost* 中提出^[2,3]。

人类对于外层空间的认识经过漫长的历史过程。17 世纪,发明了天文望远镜,天文学家通过深空观察,认为外层空间是个恒星世界,而满布恒星的银河系就是宇宙。20 世纪 20 年代,美国天文学家 Edwin P. Hubble 首次证实漩涡星云是与银河系类似的恒星系统,并测量出一批星系的距离。60 年代以来,借助光学望远镜、射电望远镜和空间探测器,人类可观测到的外层空间范围已达 140 亿光年、星系达 500 亿光年以上,对太阳系以内的行星有了新的认识。经观测发现,外层空间的大尺度结构不是均匀的,宇宙物质聚集的实体单元是星系,具有成团倾向,它们构成大小约几百万光年的星系团。星系团也有成团倾向,组成大小达上亿光年的超星系团。早期宇宙的星系与今日的不尽相同,表明宇宙是演化着的。在现阶段已观测到的范围内,外层空间在整体地向外膨胀,外层空间的星系、星系团和超星系团全都彼此远离而去。外层空间具有很大的实用价值,已在通信、遥感、导航等领域得到了广泛应用,已成为新的军事活动领域。

外层空间是继海、陆、空以外的有待人类开发的新疆域,目前尚无确切的范围,一般指距离地球表面 100km 以上的稠密大气层以外的空间。外层空间并不是处于完全真空的状态,而是包含了密度较低的微粒,主要是氢等离子体和电磁辐射,甚至也包含了暗物质(Dark Matter)和暗能量(Dark Energy)^[4]。

1981年9月,国际宇航联合会(International Astronautical Federation, IAF)在罗马召开第31届国际宇航联合会大会(International Astronautical Congress, IAC),大会把陆地、海洋、大气层分别称为人类的第1环境、第2环境和第3环境,把外层空间称为人类的第4环境^[5]。

一般来说,外层空间分为太阳系以内的空间和太阳系以外的空间,太阳系以内的空间可分为行星空间和行星际空间。行星空间指相对于太阳引力、行星引力起主要作用的空间;行星际空间指太阳系行星之间(除行星空间外)的空间。太阳系以外的空间可分为恒星际空间、恒星系空间和星系际空间等。

地球空间(Earth Space)是指地球引力作用的空间范围,属于行星空间。地球空间一般为地表以上到 $9.3 \times 10^5 \text{ km}$ 的空间范围。地球空间分为近地空间和远地空间。近地空间范围为地表以上到35786km(地球静止卫星轨道高度),是绝大多数航天器运行的空间。远地空间范围为地表以上35786km到 $9.3 \times 10^5 \text{ km}$ (地球引力作用范围上界),超越该范围的航天器将脱离地球引力作用,进入行星际空间。

1988年以前,在世界无线电管理大会(World Administrative Radio Conference, WARC)制定的《无线电规则》(“Radio Regulations”)中,把地球到月球的平均距离($3.844 \times 10^5 \text{ km}$)作为划分近空^①和深空(Deep Space)的分界线。随着大推力运载火箭的出现,人类可以发射更远距离的大椭圆轨道探测器,大椭圆轨道最远点远远超过了月球距离。在20世纪80年代后期,人类发射的探测器已经到达了金星和水星,并成功发射探测器到达更远的木星。为了规范无线电频率的使用,确保无线电频率资源合理而有序地得到利用,作为国际无线电管理机构的国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU),于1988年召开关于地球静止轨道使用的世界无线电管理大会(World Administrative Radio Conference on Geostationary Orbit Use, WARC-GOU),修改了近空和深空的分界线,把距离地球 $2 \times 10^6 \text{ km}$ 作为新的近空和深空分界线标准。并在《无线电规则》卷1第1章“术语与定义”第8部分“涉及深空的技术术语”中明确规定了深空的定义(第1.177款),即深空是指与地球的距离大于或等于 $2 \times 10^6 \text{ km}$ 的空间^[6]。

2007年2月,当时的中国国防科学技术工业委员会发布我国《“十一五”空间科学发展规划》(简称《规划》),首次公布中国政府未来空间科学发展蓝图。《规划》指出,我国在环月探测的基础上,积极进行月球探测和以火星为主线的深空探测^[7]。可见,月球探测是深空探测的第1步。从这个角度看,我国航天界普遍把“深空”定义为月球和月球以远的外层空间。

1971年6月7日至7月17日,国际电信联盟(ITU)在日内瓦(Geneva)召开关于空间无线电通信的世界无线电管理大会(World Administrative Radio Conference on Space Telecommunications, WARC-ST),大会规定:以地球大气层之外的航天器为对象的无线电通信,正式称为空间无线电通信,简称为空间通信,或称为宇宙通信。空间无线电通信有3种形式^[8]:

- (1) 地球站与航天器之间的通信;
- (2) 航天器之间的通信;

① 这里的“近空”不同于“近地空间”(Near-Earth Space),是相对于“深空”的。

(3) 通过航天器的转发或发射来进行的地球站相互间的通信。

这里所说的航天器是指为执行一定的任务,设在地球大气层之外的宇宙空间,基本上按照天体力学规律运行的各类人造空间飞行器。航天器按其本身的任务可划分为2类:第1类为无人航天器,它包括人造地球卫星和空间探测器(对月球和月球以远的天体和外层空间进行探测的无人航天器,又称深空探测器,包括月球探测器、行星探测器和行星际探测器等);第2类为载人航天器,它包括载人飞船、卫星式飞船、空间站、登月飞船和航天飞机等。航天器按其运行轨道也可分为2类:第1类是环绕地球运行的航天器,它包括人造地球卫星、卫星式飞船、空间站和航天飞机等;第2类是脱离地球引力飞往月球、其他行星及行星际空间的航天器,它包括登月飞船、各种行星和行星际探测器等。地球站是指设在海洋上或地面上的移动的或固定的空间无线电通信站^[9]。

1979年,国际电信联盟(ITU)在日内瓦召开世界无线电管理大会(G-WARC),大会确定了深空通信无线电频段的分配规则,并于1982年1月正式生效^[10]。

空间通信(Space Communications)分为近空通信^①和深空通信^[8]。近空通信是指地球上的实体与地球卫星轨道上的航天器之间的通信。这些航天器的轨道高度为数百千米至数十万千米,如各种应用卫星(通信卫星等)、载人航天器等。深空通信一般是指地球上的实体与处于月球及月球以远的宇宙空间中的航天器之间的通信,包括各行星表面的区域通信以及地球与太阳系以外星球间的通信。

1.1.2 深空通信的主要术语和技术指标

美国是最早开展深空探测并具备深空通信能力的国家之一。由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)负责管理的深空网(Deep Space Network, DSN)是目前世界上规模最大的测控通信网。处于深空中的航天器采用了无线电发射机和接收机装置,发射机向NASA的深空网地基天线发送信号,接收机对来自深空网地基天线的信号进行接收。除了接收来自航天器的信号以外,深空网天线和接收机还能够检测到自然界的电磁辐射信号,例如来自恒星、太阳、分子云层以及木星等行星的微弱电磁信号。对于深空网的灵敏度极高的接收机而言,这些电磁信号可以被视为随机电磁噪声,研究和理解这些微弱电磁信号属于射电天文学(Radio Astronomy)的范畴。下面以美国NASA的深空网为例,简要介绍一下深空通信的主要术语和技术指标^[11]。

1) 深空通信的使用频带

深空网必须能够来自自然界的电磁辐射信号和人为因素所产生的辐射信号所组成的背景噪声中,检测出航天器发射的信号。通常用信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)来表示航天器发射信号功率与背景噪声功率之比。对于深空网来说,信噪比是描述通信链路质量的一个最基本指标之一。

射频(Radio Frequency, RF)辐射频率在10kHz~100GHz的频率之间,为了在处理和使用上的方便,射频辐射频率被划分为不同的段,称之为频段,例如S频段和X频段。这些频段进一步被划分为较小的频率范围,即频带形式。对于深空通信的使用频带而言,频

① 这里的“近空通信”是相对于“深空通信”来说的。