

“十二五”
国家重点图书出版规划项目

业余无线电丛书

业余卫星通信手册

THE AMATEUR SATELLITE HANDBOOK

【美】Steve Ford (WB8IMY) 著
陈荣标 (BG7IGG) 王龙 (BA4RX) 张宏伟 (BG3QAA) 等译
龚万骢 (BA1DU) 审

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

业余卫星通信手册 / (美) 福特 (Ford, S.) 著 ; 陈荣标等译. — 北京 : 人民邮电出版社, 2012. 8
(业余无线电丛书)
ISBN 978-7-115-27643-8

I. ①业… II. ①福… ②陈… III. ①卫星通信—技术手册 IV. ①TN927-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第042675号

版权声明

The ARRL SATELLITE HANDBOOK by Steve Ford(WB8IMY), ISBN 0-87259-985-X
Copyright ©2010 by The American Radio Relay League, Inc.

All rights reserved. No part of this work may be reproduced in any form except by written permission of the publisher.
Simplified Chinese translation edition jointly published by The American Radio Relay League, Inc. and POSTS & TELECOM PRESS.

本书简体中文版由美国业余无线电转播联盟授权人民邮电出版社出版。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制本书的任何部分。

版权所有, 侵权必究。

内 容 提 要

本书是由美国业余无线电转播联盟(ARRL)出版的《The ARRL Satellite Handbook》的中文译本。

本书共分6章, 分别从业余无线电卫星简史、卫星通信系统等方面介绍了业余卫星通信技术的发展与使用等知识。书中还加入了许多业余无线电爱好者的业余卫星通信操作心得与技巧, 列举了较为常见的一些操作实例, 以指导读者进行业余卫星通信操作实践。

本书不仅适合业余无线电爱好者阅读, 作为他们学习常见卫星通信知识的手册使用, 还适合广大科技爱好者阅读, 作为他们了解业余卫星通信知识的入门指导。

业余无线电丛书

业余卫星通信手册

- ◆ 著 [美] Steve Ford (WB8IMY)
- 译 陈荣标 (BG7IGG) 王龙 (BA4RX)
- 张宏伟 (BG3QAQ) 等
- 审 龚万骢 (BA1DU)
- 责任编辑 房 桦
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
- 邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
- 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
- 北京天宇星印刷厂印刷
- ◆ 开本: 800×1000 1/16
- 印张: 16.75
- 字数: 401千字 2012年8月第1版
- 印数: 1-3500册 2012年8月北京第1次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2010-2138 号

ISBN 978-7-115-27643-8

定价: 55.00 元

读者服务热线: (010) 67132837 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号



目 录

第 1 章 业余无线电卫星简史	1
1.1 故事从“20 世纪 60 年代”开始	2
1.2 20 世纪 70 年代	5
1.3 20 世纪 80 年代	7
1.4 20 世纪末的卫星	12
1.5 新世纪的曙光	23
1.6 未来	31
第 2 章 卫星轨道与跟踪	33
2.1 轨道种类	34
2.2 了解你的方位	36
2.3 卫星跟踪软件	43
第 3 章 卫星通信系统	53
3.1 信标发射机	54
3.2 信标设计	56
3.3 遥控链路	56
3.4 转发器	57
第 4 章 你的卫星通信地面站	63
4.1 天线系统	64
4.2 天线旋转器	84
4.3 接收前置放大器	88
4.4 收发变频器	91
4.5 收发信机	93
4.6 VHF/UHF 射频功率放大器	97
4.7 典型的地面站设计	97

第 5 章	卫星通信	102
5.1	单信道中继卫星	103
5.2	线性转发器卫星	115
5.3	数字卫星	120
第 6 章	业余卫星制作项目	131
6.1	W3KH 四臂螺旋天线	133
6.2	双波段手持式八木天线	141
6.3	一种用于 2m 波段的 EZ-Lindenblad 天线	145
6.4	用于 Phase 3E 卫星的外观小巧螺旋馈源: 系统仿真与测量	153
6.5	卫星跟踪器接口电路	164
6.6	一种偏馈碟型天线的螺旋馈源	171
6.7	一种不昂贵的小型天线方位角 - 仰角 (Az-El) 指向器	174
6.8	用纸板箱天线与 OSCAR 40 通信	187
6.9	一种用于 VHF/UHF 卫星通信的简易固定天线	198
6.10	工作于 435MHz 的便携式螺旋天线	205
附录 A	卫星轨道	209
附录 B	其他卫星分系统: 结构、环境、能源、姿态、推进和控制	227
附录 C	中国业余无线电卫星——希望一号 Hope-OSCAR-68	242
附录 D	英制-国际单位制换算表	257



1

业余无线电卫星简史

张宏伟 (BG3QAA) 译

这一章包括《Space Satellites from the World's Garage——The Story of AMSAT》(《世界的车库空间卫星——AMSAT 的故事》) 一书中的一些节选, 该书的作者是 Keith Baker (KB1SF) 和 Dick Jansson (KD1K)。

同时作者也对提供可靠相关历史资料的美国业余无线电卫星组织 (AMSAT-NA) 表示感谢。



1.1 故事从“20 世纪 60 年代”开始

很多人惊讶地发现业余无线电卫星活动并不是一件新兴事物，事实上，业余无线电卫星的故事可以追溯到“太空时代”的开始。

“太空时代”始于 1957 年 10 月 4 日，在那一天，前苏联发射了震惊世界的第一颗人造卫星，就是“Sputnik 1”。世界各地的业余无线电爱好者都曾监听到了环绕地球飞行的人造卫星在 20.005MHz/40.002MHz 发出的遥测信标。在人造卫星 22 天的飞行期间，业余无线电成为了媒体关注的焦点，因为业余无线电爱好者们才是关于这个革命性的航天器的唯一消息来源。

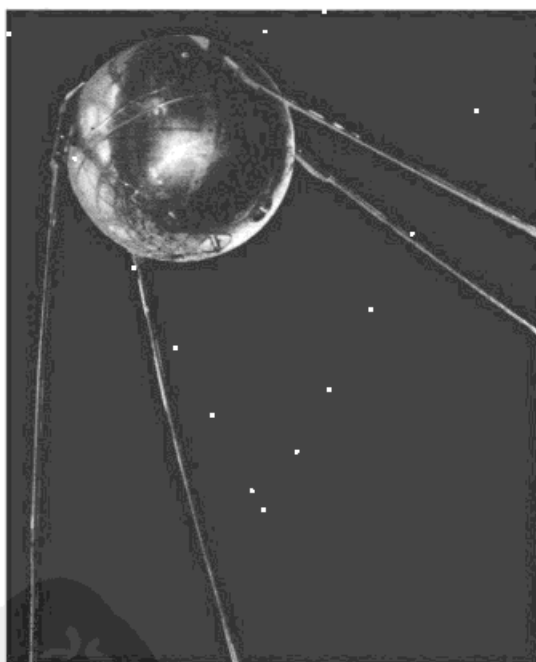


图 1.1 前苏联于 1957 年发射的第一颗人造卫星

在 1958 年 1 月 31 日，美国发射了一颗探测卫星作为对该事件的回应。几乎同一时期，在西海岸的一群业余无线电爱好者就开始考虑建造一颗业余无线电卫星的可能性。后来这个组织把实现这个制造及发射业余卫星的目标称作 OSCAR 项目（OSCAR 是 Orbiting Satellite Carrying Amateur Radio 的缩写，意思是携带业余无线电设备的在轨卫星）（见后文“何时起一颗卫星会变成一颗 OSCAR 卫星？”）。

在美国业余无线电协会（ARRL）和美国空军高层经过一系列交流后，他们获得了一个搭载

的机会。第一颗业余无线电卫星被命名为 OSCAR 1，与发现者 36 号航天器一起，在加利福尼亚州的范登堡空军基地发射升空。这两只“鸟”（卫星的研制和使用通常这样称呼卫星）于 1961 年 12 月 12 日上午成功进入近地轨道。

OSCAR 1 只有 10 磅重。它的建造，可以毫不夸张地说，就是在 OSCAR 项目团队的地下室及车库里面完成的。它带有一个小信标发射器，可以被地面站用来测量无线电在电离层中的传播，这个信标还传送了包含卫星内部温度的遥测信息。

OSCAR 1 是一个巨大的成功，OSCAR 项目数据收集中心共收到了来自 28 个国家的 570 多名业余爱好者们提交的相关报告。OSCAR 1 只在轨道运行了 22 天就因在其重新进入大气层时烧毁了。但是业余无线电确定了以“低科技”达到高科技太空航行的牢固地位。当科研团体要求空军提供关于副载荷的相关意见时，空军方面建议他们研究 OSCAR 的相关设计。更重要的是，OSCAR 1 以廉价为主的采购方式及管理理念将成为所有后续 OSCAR 卫星项目的标志，直到今天也依然如此。

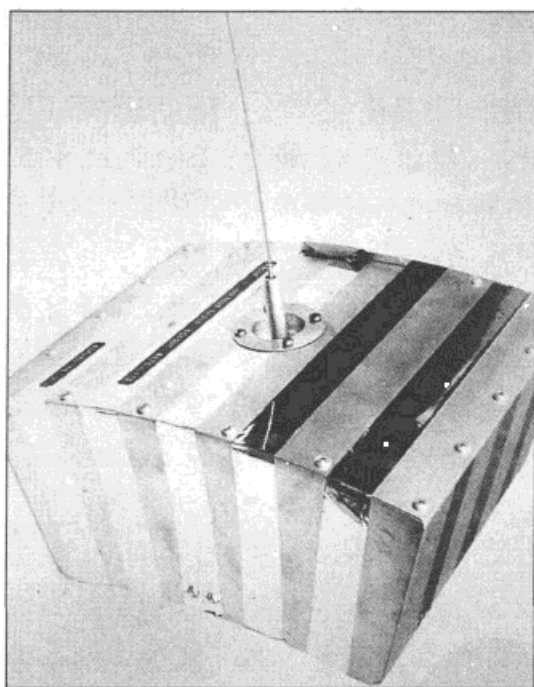


图 1.2 第一颗业余无线电卫星 OSCAR 1

OSCAR 2 是由同一个组织设计建造的，虽然它和 OSCAR 1 类似，但是却有多项改进。一项升级内容修改了内部温度感应机制，提高了感应准确度；另一项修改了卫星的外部保护层，以确保内部能保持较低的温度；还有一项修改降低了信标发射机的输出功率用来延长卫星上电池的使用寿命。因此，这种“持续改进”的战略一开始就成为的业余卫星设计方法的核心部分。OSCAR 2 在 1962 年 6 月 2 日在加利福尼亚州范登堡空军基地搭乘 Agena B 型运载火箭升空并进入运行轨道。

OSCAR 2 之后是 1965 年 3 月 9 日升空的 OSCAR 3。OSCAR 3 成为第一颗携带线性转发器的业余无线电卫星，该卫星可以充当通信中继台。该转发器在 146MHz 接收上行信号，其带宽大约为 50kHz，并同时在 144MHz 转发。这种设计将使相对简单的业余无线电爱好者地面站能够通过这一频段来进行更远距离的通信。

OSCAR 3 的转发器工作了 18 天，在此期间，22 个国家的约 1000 名业余无线电爱好者通过操作这个卫星互相通联。该卫星第一次直观地证明了在多个地点可以同时成功地操作使用卫星。现今的卫星通信也主要是采用了这种技术。

第 4 颗业余无线电卫星 OSCAR 4 运行于地球上空 3.52 km (2.2 万英里) 的圆形同步轨道上。OSCAR 4 是于 1965 年 12 月 21 日搭乘 Titan 111-C 型运载火箭升空的，虽然业余无线电爱好者们对这颗卫星尽了最大的努力（其中大部分人员来自加州雷东多海滩的 TRW 无线电俱乐部），但不幸的是运载火箭在飞行末段出现了故障，因此 OSCAR 4 未能进入预定轨道。这次事故显然是对研发团队一次严重的打击，为了能最大程度地利用 OSCAR 4，业余爱好者们成功地开发出创新程序来解决了一些问题，尽最大可能挽救及利用了这颗卫星的功能。

何时起一颗卫星会变成一颗 OSCAR 卫星？

当世界范围内的 AMSAT 组织负责了现代业余无线电卫星的大部分设计和建造时，最初的 OSCAR 设计仍然被应用于许多携带业余无线电的卫星上。然而，大部分业余无线电卫星直到它们成功地进入轨道并可以使用之后才能得到它们的 OSCAR 编号。即使那样，只有卫星的资助者申请之后 OSCAR 编号才会被派出。

举例来说，让我们假设有一个卫星叫 ROVER。这个 ROVER 航天器只有满足以下条件才能成为 OSCAR：（1）它进入了轨道；（2）它的资助者提交了申请。现在我们假设 ROVER 进入了它的轨道，它的 OSCAR 申请也被批准了。ROVER 现在被标记为 OSCAR 99，它的全称叫 ROVER-OSCAR 99。然而你会发现许多火腿都会省略掉这个命名系统。有的会简单地称之为 ROVER，或者 OSCAR 99。他们甚至会把它的全称简写为 RO-99。

假如一颗卫星最终在轨道上失效了，或者重新进入了地球大气，它的 OSCAR 号码通常会退役，并且不再被派发。

业余卫星组织的诞生

1969 年，美国业余无线电卫星组织（AMSAT）在华盛顿特区成立。在美国及国际上的绝大多数 AMSAT 都参与了业余卫星项目。现在许多国家都有自己的 AMSAT，例如：英国的 AMSAT-UK、德国的 AMSAT-DL、巴西的 BRAMSAT 和阿根廷的 AMSAT-LU。所有这些

AMSAT 都独立运营，但是可以在大型卫星项目及其他感兴趣的项目上展开合作，成为世界范围的业余无线电卫星团队。由于存在许多的 AMSAT 组织，所以北美的 AMSAT 组织被称为 AMSTA-NA。

自从 20 世纪 60 年代初第一次发射 OSCAR 卫星以来，国际间 AMSAT 的爱好者们已经开创了许多新的通信技术。这些技术突破包括卫星语音转发器及非常先进的数字化“存储转发”信息转发技术。用这些已经获得成功的技术成果来与国际空间机构进行密切合作，往往能得到搭载发射卫星的机会。AMSAT 也另辟蹊径为一些付费用户提供技术援助来大幅降低成本。AMSAT 航天器的设计、开发和建造工作会得到个别 AMSAT 成员的财务捐赠，同时志愿工作者们还会花费数千小时的工作，创造性地开发利用来自世界各地捐赠的航天工业剩余物料。

AMSAT 的营运费用主要来自国际 AMSAT 爱好者的终身和年度会员资格及其他服务，也可得到其他业余无线电爱好者以及一些空间探索业余爱好者们微薄的捐款，同时也能从跟踪软件开发或出版一些与卫星有关的业余无线电出版物来获得少量款项。另外，也不时会收到个人和企业的捐款，这些援助的资金主要被用于 AMSAT 的卫星项目上。

从相关人员的角度来看，北美的 AMSAT 是一个纯粹的志愿者组织。在整个组织中只有华盛顿总部的办公室经理一个人有固定的薪水。他的工作是处理日常的会员管理及其他重要的日常业务。AMSTA-NA 的其余人，上至主席下至设计建造太空硬件的工人，都在无偿奉献自己的时间和才能。

1.2 20 世纪 70 年代

20 世纪 70 年代是业余卫星高产的十年。这十年开始于 OSCAR 5 的发射，也称作 Australis-OSCAR-S，它是由宇航部门和澳大利亚墨尔本大学无线电俱乐部的学生设计建造的。OSCAR 5 于 1970 年 1 月 23 日从加利福尼亚州的范登堡空军基地发射升空，搭乘运送美国气象卫星的 Delta 火箭到达 925 英里高的极地轨道。

OSCAR 5 在 29MHz 和 144MHz 传输遥测信标数据。它是第一颗可以从地面控制的业余卫星，它有一个遥控指令接收机，可以让地面站控制卫星上的 29MHz 信标发射机。OSCAR 5 没有携带转发器，所以它不能用来做中继通信。但是，它装有一个创新性的磁场姿态稳定系统。

OSCAR 6 于 1972 年 10 月 15 日进入预定轨道，是 Phase II 的首颗卫星（见后文“AMSAT—OSCAR 卫星的阶段”），这只“鸟”携带有双向通信转发器，可以接收地面 146MHz 的信号并以 1W 的功率在 29MHz 转发出去。

OSCAR 6 具有一个精密的遥测信息信标台，包含航天器的很多状态信息，包括电压、电流和温度等。OSCAR 6 还有一个精密的遥控系统。

OSCAR 6 另一个创新是“Codestore”，“Codestore”是数字存储和转发的邮件系统。加拿大地面站发送邮件，然后由卫星存储并转发至在澳大利亚的地面控制站。

OSCAR 6 由于受到静电干扰，虚假信号被星载计算机当做关闭命令执行。为了解决这个问题，地面控制站上传了一连串命令以保持卫星处于打开状态。OSCAR 6 以这种工作方式连续工作了 4.5 年，平均每天接收 8 万条开启命令。

AMSAT-OSCAR 卫星的“阶段”

从 1961 年开始，无线电爱好者们设计和建造了许多航天器，根据它们的设计与飞行特征可被分为三个阶段。第一阶段的设计特征主要是近地轨道（LEO）、寿命周期短和以信标为主，例如 OSCAR 1 ~ 4 和俄国的 Iskra-1 和 Iskra-2 系列航天器。

第二阶段的 OSCAR 仍然是近地轨道的，但是它们被发射进更高的轨道，设计的寿命周期也更长。这些 AMSAT 卫星包括 OSCAR 6、7、8 以及 UoSAT OSCAR 9 和 11，后两者是由英格兰的萨利大学的 AMSAT 小组建造成的。随后有许多来自不同国家的 AMSAT 小组的一系列模拟和数字无线电卫星，也都发射进相似的轨道中去。业余无线电卫星的一个很大的分支被称为 Microsat，这些卫星通常是小立方体或者长方体。这些卫星占据了目前在轨道上的 AMSAT 卫星的大部分。还有一种更小的卫星叫 CubeSat，比这更小的叫 picosat，这些卫星中的部分也属于第二阶段卫星。

第三阶段的卫星被设计发射入高椭圆莫尔尼亚型轨道，这种轨道卫星以前苏联为先驱。这些卫星包括 OSCAR 10、13 和 40，它们为使用者们提供了更长的使用时间，更高的能量和更多样的通信转发器。更重要的是，它们也被叫做高轨道卫星，为它们的使用者提供了远比 LEO 卫星更大的卫星通信覆盖区域。在某些情况下，第三阶段卫星可以同时“看见”几乎整个半球，允许使用者们奢华地与一个或者更多的大陆进行同步通信。

业余卫星的圣杯是第四阶段——地球同步轨道。一个第四阶段卫星可以“停留”在 3.52 千米（22 000 英里）的高空中，覆盖了地球大部分区域并为之提供连续不断的通信服务。火腿们还没有部署这一种卫星，但是当这本书写成时，AMSAT-NA 已经在与国际通信卫星组织讨论在一颗商用地球同步轨道卫星上搭载业余无线电转发器模块的事。

OSCAR 7，也就是 AO-7，于 1974 年 11 月 15 日在加利福尼亚州范登堡空军基地由 Delta2310 火箭发射升空。OSCAR 7 带有 2 个转发器，一个在 146MHz 接收并在 29MHz 转发，而另一个则在 432MHz 接收并在 146MHz 转发。该转发器是由西德的业余无线电爱好者制造的，下行信号发射功率为 8W。

历史上第一次卫星对卫星的链路是一位火腿发送信号到 OSCAR 7, 然后转发给 OSCAR 6 并将这个信号转发到另外的一个地面站。

澳大利亚研制了一个卫星遥测编码器, 加拿大也研制了一个 435MHz 的信标机。其他还有在 146MHz 和 2304MHz 频段工作的信标机。发射功率为 100mW 的 2304MHz 信标是圣伯那地诺市(美国加州)微波协会研制的, 但是美联邦通信委员会不允许 OSCAR 7 团队打开他们的这个 2304MHz 信标机, 所以也就一直没能进行空间实验。

OSCAR 7 的无线电系统工作了 6 年半, 直到 1981 年由于电池故障才宣布废弃。然而经过了 20 多年的沉寂, 2002 年 OSCAR 7 又恢复了活力。这两种工作模式仍然可用, 但是卫星的控制系统却不能工作了。尽管它不能从地面控制, OSCAR 7 依然能够在有光照的大部分时间里通联。

OSCAR 8 是 Phase III 卫星的第 2 颗, 它于 1978 年 3 月 5 日在加利福尼亚州范登堡空军基地由 Delta 火箭发射送入 570 英里高的圆形极地轨道。它带有 2 个转发器, 其中一个是由日本业余无线电爱好者设计的, 这个转发器在 146MHz 接收并在 435MHz 转发。美国、加拿大和德国的业余组织建造了其余的卫星部件。OSCAR 8 运行了 5 年多, 直到 1983 年因电池老化才废弃。

前苏联也进入了业余无线电领域, 于 1978 年 10 月 26 日从北部的普列谢茨克国家航天发射场用一枚 F-2 型火箭将 RS-1 和 RS-2(Radiosputniks 无线电人造地球卫星)两颗卫星送入距地球 1600km(1000 英里)的椭圆形轨道。

每颗卫星都有 145 ~ 29MHz 的转发器。这些卫星有的时候被称之为 Radio-1 和 Radio-2 广播电台, 它们每 120min 环绕地球一圈。它们用莫尔斯电码传送温度和电压遥测信号, 这些 hamsats(“火腿卫星”的简称)有太阳能电池和“Codestore”存储转发邮件系统, 在莫斯科、新西伯利亚及海参崴建有地面控制站。

RS-1 和 RS-2 有灵敏度非常高的接收机和防止有人使用上行功率过大时保护接收机的过载断路器(类似的设备后来被用在 OSCAR 40 上)。这个断路器只能在卫星覆盖前苏联的时候被重置。然而, 西方的火腿们有时用数百瓦的功率(没必要的)来发射, 这种不断的触发断路器动作使这两颗卫星关闭。前苏联的地面控制人员不断重置该断路器来保持打开状态, 但最终大部分的操作都是卫星覆盖前苏联的时候才可以进行, 因为在卫星覆盖北美和西欧的时候西方的 HAM 们总是触发这个断路器, 使得卫星一直都关闭着。

RS-1 只工作了几个月, 但是 RS-2 却一直工作到 1981 年。

1.3 20 世纪 80 年代

在 20 世纪 80 年代, 卫星的制造数量与发射次数迅速增加。事实上 1981 年创造了发射记录,

在这一年 8 颗业余无线电卫星进入空间，相当于后来 1990 年发射的业余无线电卫星总和。

在 20 世纪 80 年代，Phase III 卫星首次亮相。设计这些复杂的通信卫星是为了能运行在高椭圆莫尼亚轨道（译者注：莫尔尼亚轨道是一种大椭圆轨道）上，可以让飞行器在到达超过离地球 40 000km 的轨道“高”端点（远地点）后再返回离地球几百公里远的近地点（见图 1.3）。这样卫星就像“悬停”在远地点上一样，就能提供好几个小时的时间来覆盖整个半球。

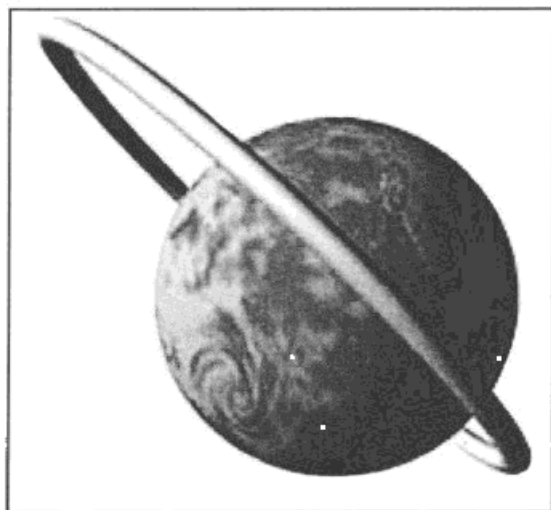


图 1.3 一条莫尔尼亚椭圆轨道上的卫星先在离地球很高的远地点通过，然后在离地球很近的近地点通过

Phase III 的首颗卫星 P3A 是在南美洲美国东北海岸对面的法属圭亚那外库鲁发射场由欧洲的新型阿丽亚娜 Ariane 火箭在 1980 年 5 月 23 日的第 2 次发射时携带升空的，但不幸的是，火箭升空后不久便坠落大西洋，P3A 未能发射成功。

与此同时前苏联也在忙于自己的项目，虽然大多数前苏联的业余无线电卫星被称作“Radiosputniks”（无线电人造地球卫星），但是有一个系列的卫星被称作“Iskra”，其俄语中的含义是“火花”。莫斯科航空研究所的学生和业余无线电爱好者们制造了 28kg（62 磅）重的“Iskra”。这颗卫星有太阳能供电的转发器、遥测信标、地面指令信道、存储转发信息公告板和星载计算机。“Iskra”的转发器在 21MHz 和 28MHz 传输信号，它的遥测信号在 29MHz 附近。卫星通过位于莫斯科和卡卢加的地面站控制，其目的是希望促进保加利亚、古巴、匈牙利、老挝、蒙古国、波兰、罗马尼亚、前苏联还有越南的火腿们通联。

Iskra-1 于 1981 年 7 月 10 日从北部的普列谢茨克航天中心发射场用 A-1 火箭送到 400 英里高的极地轨道。在运行了 13 周以后于 1981 年 10 月 7 日因再入大气层而烧毁。

英国的第一颗业余无线电卫星是 UOSAT-OSCAR 9，也称作 UO-9，是英国萨里大学的学生设计的。其实“UOSAT”就是“University of Surrey Satellite”（萨里大学的卫星）。这颗 115 磅重的科学教育卫星于 1981 年 10 月 6 日在美国加利福尼亚州范登堡空军基地由德尔塔 Delta 火箭送入 340 英里高的极地轨道。

虽然 OSCAR 9 没有携带通信转发器,但是它可以发送数据,并且将携带的电视摄像机的图像传输回地球。这颗卫星装有一个最早期的 (CCD) 阵列,它组成了首个用来防治荒漠化的低成本空间电视摄像机。相对于早期的技术来说,它拍摄并传送的空间图像是非常壮观的。UO-9 卫星的摄像机并没有稳定地指向地球,所以传送的照片所涵盖的区域也是随机拍摄的。

UO-9 卫星上带有磁力计及辐射探测仪,此外还带有两台粒子计数器用于测量太阳活动及极光对无线电信号的影响。UO-9 卫星还装载了具有 150 个词汇的语音合成器,用来报告卫星的状况。它还在 145MHz 和 435MHz 发射用于传播研究的信标,另外在 7MHz、14MHz、21MHz、28MHz 的短波频率及 2GHz 和 10GHz 的微波频率发射信标。

在 1982 年由于软件错误造成 145MHz 和 435MHz 的信标被错误地同时开启,导致卫星的接收机被自己的发射阻塞,萨里大学的火腿们呼吁斯坦福大学及加州的业余无线电爱好者对卫星实施干预。斯坦福大学的火腿们使用一个 45m (150 英尺) 的碟形天线及 15MW 的功率向卫星发射,这一办法后来让卫星恢复了控制。

OSCAR 9 在经过 7 年多可靠的运行服务后于 1989 年 10 月 13 日重入大气层烧毁。

在 20 世纪 80 年代初,莫斯科大学业余无线电俱乐部忙于建设一组新的“Radiosputniks”(无线电人造地球卫星)。像 RS-1 和 RS-2 一样,6 颗卫星分别重 40kg (88 磅),被安装在直径 43cm、(17 英寸) 长 38cm (15 英寸) 的圆柱形容器中。

这些新的卫星于 1981 年 12 月 17 日在北部的普列谢茨克航天中心发射场由一枚 C-1 火箭送入 1600km (1000 英里) 高的轨道。对当时来说,这是业余无线电卫星一次性进入轨道最多的一组卫星。

我们把“Radiosputniks-3”命名为 (RS-3) 一直排到“Radiosputniks-8”(RS-8),它们都是用和 RS-1 及 RS-2 类似的运行轨道。这 6 颗卫星的转发器在 145MHz 接收信号并在 29MHz 转发信号。它们也同样带有存储和转发邮件系统、太阳能电池和用莫尔斯电码发送的关于温度及电压等数据的信标。

这些新的“Radiosputniks”(无线电人造地球卫星)第一次携带有自动转发系统。火腿们可以用 CW 呼叫卫星,然后机器人会回应你一个问候和信号报告。

这些 RS 卫星因为星上电池失效而逐个失效,只有 RS-5 和 RS-7 能够在空中持续运行至 1988 年。

1982 年 4 月 19 日,前苏联的“礼炮-7”国际空间站被送往地球轨道。它的里面带有一颗 62 磅重的 Iskra 卫星。宇航员 Anatoli Berezovoi 和 Valentin Lebedev 在 5 月 13 日从拜科努尔航天中心乘联盟号运输飞船升空,两天后停靠在礼炮 7 号国际空间站,5 月 17 日打开气密舱门将 Iskra-2 推入 210 英里高的轨道。

Iskra -2 是在 29MHz 上发射遥测信标,虽然它从一开始就运行在这么低的轨道上,这个卫星仍然在轨道上运行了 7 个星期才在 1982 年 7 月 9 日坠入大气层烧毁了。

另一颗 Iskra 卫星 Iskra-3,在 1982 年 11 月 18 日在“礼炮-7”中被手动抛出密封舱进入 220 英里高空,虽然 Iskra-3 和 Iskra-2 很像,Iskra-3 的遥测信标也是在 29MHz 发射,但是因为卫星内部过热它没能展开工作。这颗 Iskra-3 也是在轨道运行了 4 个星期后于 1982 年 12

月 16 日坠入大气层烧毁了。

P3A 卫星在 1980 年损毁之后，业余卫星组织立即开始 P3B 的研制工作。德国的火腿们复制了这颗 200 磅重的卫星，并在 1983 年 6 月 16 日用阿丽亚娜 Ariane 火箭发射升空。这就是后来被命名为“AMSAT-OSCAR 10”的卫星。

OSCAR 10 就像它的前身一样运气不佳，在星箭分离后，它与阿丽亚娜火箭的助推器相撞，在碰撞中损坏了天线并造成卫星失控的旋转。业余卫星组织在等到卫星轨道稳定之后的 7 月 11 日启动卫星上的推进器。

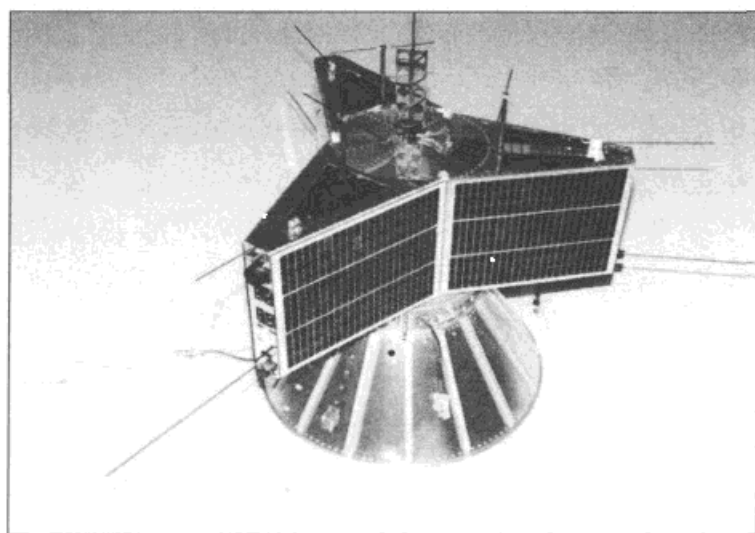


图 1.4 1983 年 10 月 16 日 AMSTA- OSCAR 10 由阿丽亚娜 Ariane 运载火箭送入轨道

但是这个主推进器却工作得不尽人意，它没有按照命令关闭而把卫星夸张地送到了几乎比原计划远 2 倍的轨道上去了。7 月 26 日曾尝试启动另外的一个发动机，但是此刻卫星却发生了氦泄漏（可能是阿丽亚娜 Ariane 火箭碰撞的结果），而最有可能导致故障的脉冲推进器氮驱动燃料阀门却工作正常。因此 OSCAR 10 停留在一个 2390 ~ 22126 英里范围的轨道上。

业余卫星组织有了一颗故障的卫星，天线损坏且错误的轨道导致它不能躲避大量的辐射，而错误的姿态使它不能保持朝向太阳，所以太阳能电池板也不能正常地为电池充电。“AO-10”的转发器可以工作，但是因为天线损坏及处于很低的轨道倾角而导致使用受限。它的信号很微弱，能使用的时间很有限。即使这样，也有数百名业余无线电爱好者在使用这个卫星。

更重要的是，在建造和发射过程中，防辐射的电脑芯片造价昂贵，AO-10 的开发人员被迫使用非拉辐射的芯片来制造 OSCAR 10 的机载计算机。可惜的是，AO-10 的多变的轨道运行导致它要承受被地球磁场捕获的亚原子粒子激烈的持续轰击。这造成 OSCAR 10 上的非辐射加固的计算机存储芯片被缓慢地破坏。至 1986 年，AO-10 的指令计算机已经恶化，经常发出奇怪的遥测数据流，卫星也越来越难于稳定和控制。当光照不足时，AO-10 的转发

器经常因为电压不足而关闭。这颗卫星需要 90% 的光照时间来获取能源，但有时只能达到 50% 的光照时间。当发生这种光照不足的情况时，AO-10 将会自行关闭，然后依靠控制站来发送一个复位指令来启动。OSCAR 10 就一直这样毫无规律地运作，直到它最后沉寂于 20 世纪 90 年代。

英国萨里大学的学生们建造的第 2 颗科学教育卫星“UOSTA-B”在 1984 年 3 月 2 日在加州发射并送入 430 英里高的极地轨道。这颗 132 磅重的卫星最后被命名为“UoSAT-OSCAR 11”（简称 UO-11），也可以叫做“UoSAT-2”。

UO-11 卫星在 145MHz、435MHz 和 2 401MHz 的频率上发射信标，它的一个灵敏的相机在极地上空拍摄极光并储存，它还有一个数字信标转发业余卫星组织 AMSAT 和总部设在萨里大学航天工程研究部的 UoSAT 的公告。在写这本书的时候，“OSCAR 11”也只是偶尔被使用。

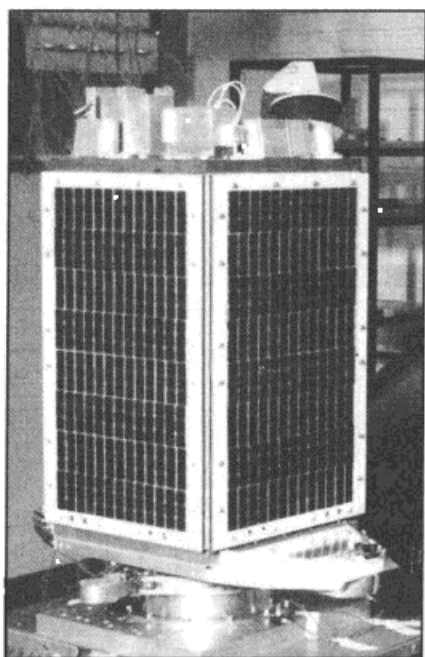


图 1.5 由英国萨里大学的学生研发制造的 UOSTA-B 卫星在 1984 年 3 月 2 日从加利福尼亚发射至 430 英里高的极轨道

日本业余爱好者在 1986 年 8 月 12 日在种子岛太空中心将日本业余卫星（JAS-1a）送入宇宙空间。业余卫星组织 AMSAT 将它命名为 OSCAR-12，日本的火腿们则称之为“富士”，它后来被称为 Fuji-OSCAR-12 或简称 FO-12。

FO-12 有一个在 145MHz 上接收并在 435MHz 上发射的转发器。它主要是一个数据分组无线电卫星（称作 PACSAT）。“富士”的转发器可以作为一个信息公告板或语音中继来使用。“富士”的遥测信标可以用莫尔斯电码每分钟发送 20 个字的数据。

卫星上的电子信箱在空中收到火腿们的个人文字信息后可以储存在 1.5MB 的 RAM 内存中。这个电子信息中心允许别的火腿们阅读存放在卫星留言板上的信息。

“FO-12”的太阳能电池无法为“富士”的电池提供充足的电力，这让用户们感到非常失

望。因此日本的地面控制站在 1989 年 11 月 5 日不得已关闭了这颗卫星。

前苏联的火腿们也计划在 1980 年中旬将“Radiosputnik-9”送入空间，但是发射时间一拖再拖，最后发射被取消，而且编号“RS-9”也永久性地退役了。

这件事虽然很令人失望，但是让前苏联火腿们欣喜的是，在 1987 年 6 月 23 日业余无线电分组卫星 RS-10 和 RS-11 被发射了。同时作为前苏联导航卫星“宇宙 1861”的一部分，Radiosputnik-10/11 搭乘卫星上被送入了 621 英里高的环形轨道。它们每环绕地球一圈需要 105min，这两颗卫星实际上是作为通信模块搭载在“宇宙 1861”上的，并且可以分享“宇宙 1861”上可观的电力供应。

RS-10 和 RS-11 在 29MHz 和 145MHz 附近发射遥测信标，它们有相同的短波和 VHF 转发器，但是它们使用的频率却不相同，当火腿发射 21MHz 和 145MHz 附近的信号到 RS-10 和 RS-11，卫星则在 29MHz 和 145MHz 发射下行信号。此外，RS-10 和 RS-11 还有机器人自动转发系统用莫尔斯电码呼叫及回应联络代码，甚至发行了 QSL 卡片用于和自动转发系统联络。

RS-10 和 RS-11 成了历史上最受欢迎的 2 颗业余卫星，任何可以在 2m 波段用 SSB 和 CW 模式收发的无线电台都可以使用简单的天线来联络这些“家伙”们。在一些周末，火腿们利用卫星信号覆盖的 15min，使得这些转发器上充满了通联信号。

随着前苏联的“宇宙 1861”卫星在 20 世纪 90 年代末期退役，RS-10/11 也一同退役了。

俗话说得好，第三次是最好的。这当然是指业余卫星组织 AMSAT 试验的 Phase III 卫星 AMSAT-OSCAR 13，它在 1988 年 6 月 15 日安全地进入椭圆形的莫尔尼亚轨道，OSCAR 13 在飞向距地球 22000 英里处的远地点前将围绕距地球 1500 英里高的弧形轨道飞行。

OSCAR 13 是最复杂的 Phase III 卫星。这是由 AMSAT-DL 领导的卫星项目，一些来自其他国家的业余卫星组织也为这颗卫星的成功作出了杰出的贡献。AMSAT-DL.OSCAR 13 为分组数据、传真、慢扫描电视、语音（SSB）、无线电传（RTTY）和莫尔斯电码（CW）提供 4 个转发器。转发器在 435MHz 和 1 269MHz 接收，并在 145MHz、435MHz 和 2 400MHz 发射，其次该卫星的计算机还使用程控指令来打开转发器。

凭着在远地点时信号能覆盖将近半个地球，OSCAR 13 很快成为一颗著名的“DX 卫星”。在不同的几大洲的火腿们可以有几个小时的时间通联。甚至可以安排通过 OSCAR 13 进行聊天的“圆桌会议”。

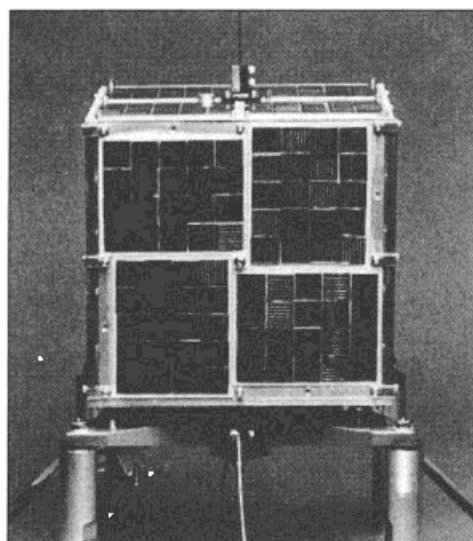
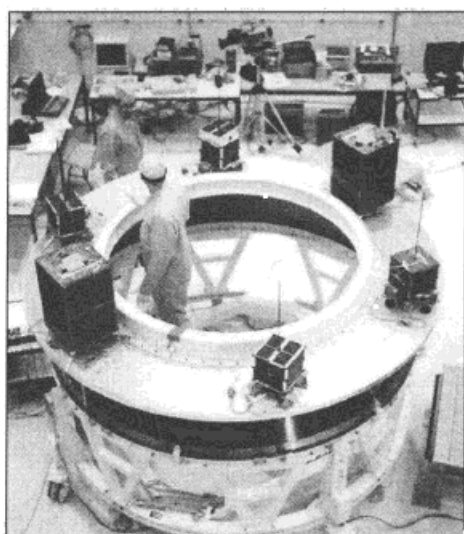
然而天下没有不散的宴席，“OSCAR 13”也不能例外。这颗卫星在 1996 年 12 月 6 日因重新进入时地球大气层烧毁了。

1.4 20 世纪末的卫星

在 20 世纪 90 年代初，英国萨里大学的空间爱好者们有几颗新卫星已具备随时发射的条

件。大约在同一时间，另外一些国际业余卫星组织的实验人员也制订了更为先进的卫星设计方案。在方案中利用了太阳能电池光电转换效率迅猛发展的优势，取代了之前那些笨重的立体架构模式，这些新型卫星们只有 $22.6\text{cm} \times 22.6\text{cm} \times 22.3\text{cm}$ 大小并且只有 13kg 重的小盒子。这些被称为“微型卫星”的卫星是卫星一体化设计的代表，这种方案很快就会被商业卫星制造商们采纳。

在 1990 年 1 月 22 日，一组微型卫星（还有 2 颗新的 UOSATS）由阿丽亚娜 4(Ariane 4) 火箭送入轨道。这次推出的卫星有 UoSAT-OSCAR 14、UoSAT-OSCAR 15、AMSAT-OSCAR 16、DOVE-OSCAR 17、WEBERSAT-OSCAR 18 和 LUSAT-OSCAR 19。



1990 年 1 月 22 日由阿丽亚娜 4 (Ariane4) 运载火箭将多颗“微卫星”同时送入 “微卫星” 的经典设计 LUSAT-OSCAR 19 卫星轨道，分别是：UoSAT-OSCAR 14、UoSAT-OSCAR15、AMSAT-OSCAR 16、DOVE-OSCAR 17、WEBERSAT-OSCAR 18 和 LUSAT-OSCAR 19

最初的 18 个月内，UoSAT-OSCAR 14 在轨道上作为一颗无线电分组卫星来运行。它将收到的电子邮件储存在卫星上，供世界各个地方的地面站阅读。1992 年年初，AO-14 卫星的所有业余操作都被转移到 UoSAT-OSCAR 22 卫星上。AO-14 随后被专门用于 VITA 业务（志愿者技术支持），在非洲发送和接收电子邮件。

几年之后，计算机存储转发通信系统已不再是主要操作模式了。在 2000 年 3 月 UO-14 恢复业余用途，并重新配置单频道 FM 模式转发器。这一举措在业余无线电界备受欢迎。这是火腿们第一次只须使用普通的双频段电台就能享受卫星通信的乐趣。

OSCAR 14 一直运行到 2003 年 11 月才正式宣布废弃。据萨里卫星技术公司的飞行任务控制中心的报道，这个深受欢迎的卫星“经过近 14 年的在轨运行，已经完成了它的使命。”

OSCAR 15 伴随着一起进入轨道，但是它的寿命很短暂，在部署后的短短几个小时内就一下子沉寂了。

AMSAT-OSCAR 16 被设计成专门用于储存和转发文件的空服务器。它利用 1200bit/s 的无线电链路。AMSAT-OSCAR 16 为用户提供与地面站终端软件互动显示的分组无线电子公告栏系统。世界上的任何地方的任何人想下载文件或使用个人电子邮件的话，都可以要求将这些信息“广播”给卫星覆盖范围内的所有数据结点或指给某个特定的地面站。这个“广播”协议与地面无线电分组通信不同，但是可以让一个地面站在卫星信号覆盖的有限时间内在卫星上获取更多的资源。OSCAR 16 在几个 2m 波段同时监听，但在任何时候只有一个 70cm 波段的下行发射机处于发射状态。由于 437.026MHz 的主发射机性能老化，所以现在暂时使用 437.051MHz 的发射机工作。所有的“微型卫星”都是用几瓦功率的发射机，因此在地球上很容易接收到它们的信号。AMSAT-OSCAR 16 可以在上行频率以 1200 bit/s 的速率接收 3.5kHz 偏差的曼彻斯特编码的 FSK 信号，这种信号使用 1200bit/s 的速率来进行二进制移相键控 (BPSK) 信号传输，这是一种非常强大的二进制调制方案。

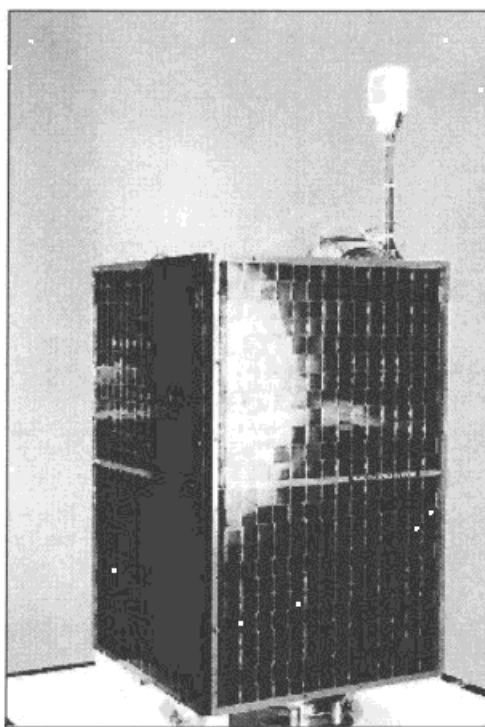


图 1.6 2000 年 3 月 UO-14 卫星作为 FM 模式中继卫星一直工作到 2003 年

OSCAR 16 使用 2m 波段 FM 模式的上行信号接收机，而地面站接收具下行信号需要一台 70cm 波段 SSB 模式的接收机或是加一台变频器来使用 HF 波段 SSB 接收机接收 70cm 波段的信号。在写本书时，AO-16 也仍然是“半可操作”的状态。

DOVE-OSCAR 17 由 AMSAT-Brazil (巴西业余卫星组织) 资助，这个项目是由年轻的托雷斯 - 德卡斯特罗博士领导的，他的呼号是 PY2BJO。“DOVE”是“Digital Orbiting Voice Encoder” (在轨数字语音编码器) 的缩写。它具备硬件数字化语音再现的能力，或是控制 Votrax 语音合成器。但是由于在发射后卫星出现硬件故障，所以用语音播送世界和平信息的

首要任务没能完全实现。

“DOVE”偶尔会用于在 145.825MHz 以 FM 模式传输 AX.25 协议的无线电分组遥测信号。使用 1200bit/s 的速率以 Bell202 标准进行 AFSK 发射。使用分组无线电设备在大部分时间可在 VHF 频段收到 DOVE-OSCAR 17 的信号，现在“DOVE”早已不再使用了。

WEBERSAT-OSCAR 18 携带一个全彩色 CCD 相机，并将拍摄的数字化地球图像转成 AX.25 协议的下行串行数据流。WEBERSAT-OSCAR 18 是犹他州的韦伯州立大学在航空航天技术中心（CAST）努力工作的结果。WO-18 的 CCD 相机有 700 线 × 400 线的分辨率，并且可以在具有足够图形显示能力的计算机上运行 Weberware 可视软件。数字化 NTSC 制式的摄像机视频被组合成无序号帧信息数据包发送给用户，地面站通过几次接收这样的数据来捕获一幅完整的图像，大约每 200KB 的数据能够组成一幅图像。

在 1990 年微型卫星群的最后一颗卫星是由阿根廷 AMSAT 协调组织的 LUSAT-OSCAR 19。它也是一颗类似于 AMSAT-OSCAR 16 的分组无线存储转发的卫星，这两颗卫星唯一的区别是 AO-16 除了具有 S 波段的信标外还有电子邮件系统，而 LO-19 只有一个 70cm 波段的 CW 信标。到了现在，也只有这个 CW 信标台仍然在工作。

微型卫星成功应用之后，日本在 1990 年 2 月 7 日从种子岛太空中心用新型两级火箭 H-1 将一颗新业余无线电卫星 Fuji-OSCAR 20（称作 FO-20）发射升空。它的轨道和多数的 OSCAR 卫星轨道略有不同，它运行在一个高倾角椭圆轨道，这样做可以保证卫星在轨道的大部分时间都能处于光照之下。

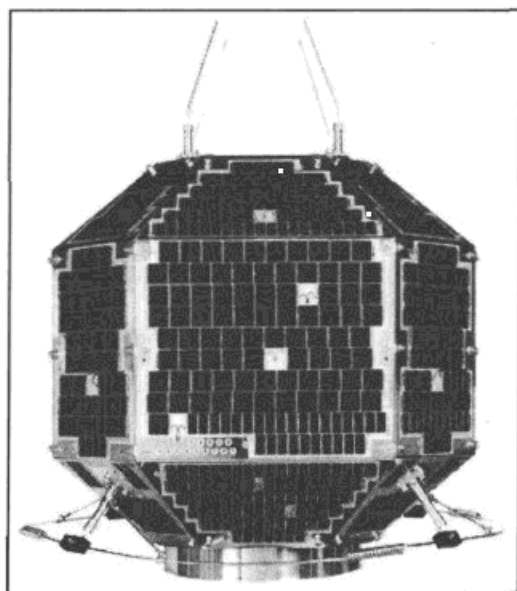


图 1.7 1990 年 2 月 7 日 FUJI-OSCAR 20 卫星在日本种子岛宇航中心由 H-1 二级火箭送入轨道

FO-20 卫星的物理结构是一个呈 26 面的多面体形状，约 50kg 重，这些都远比许多微型卫星大。虽然 Fuji-OSCAR 20 也像许多微型卫星一样使用 AX.25 分组无线电通信系统，但 FO-20

和许多微型卫星最大的区别在于 FO-20 的分组无线电广播可以无需特殊的微型卫星终端软件即可访问。任何地面计算机系统都可以用于访问分组无线电公告栏 (BBS) 系统和 FO-20 的电子邮件系统。

FO-20 和其他许多微型卫星还有一个区别是 FO-20 还有一个模拟的线性转发器支持 SSB 和 CW 模式。多年来, FO-20 的发电能力一直下降, 并在最后沉寂了。

1990 年你会看到越来越多的业余卫星被发射, 其中包括巴基斯坦的首颗卫星 Badr-1。它是在 1990 年 7 月 16 日由中国的长征运载火箭送入 375 英里高的圆形轨道。这个 150 磅重的 Badr-1 由拉合尔市旁遮普大学及空间和高层大气研究委员会的工程师和 HAM 们设计制造。其中几人已经在英国萨里大学攻读完硕士学位并回到祖国, 他们用新知识和来自巴基斯坦业余无线电协会的人员共同建造卫星。

Badr-1 的辉煌很短暂, 它在 1990 年 12 月 9 日重新进入大气层时烧毁了。

Radiosputnik 14/AMSAT-OSCAR 21 是 1991 年发射的第一颗卫星, 是在 1991 年 1 月 29 日发射的。它是 AMSAT-U(前苏联) 和 AMSAT-DL(德国) 的合作项目。这个卫星实质上是作为一个前苏联政府的大型卫星 INFORMATOR-1 上的一个模块搭载的。在 1994 年 9 月 16 日因前苏联政府没有了这个大型卫星项目的资金, 因而把整个卫星关闭了。这样一来, 业余无线电爱好者们就失去了一个宝贵的资产。RS-14/AO-21 一直是最受欢迎的卫星, 因为它很容易使用。这个 hamsat 是一个 FM 模式的中继器, 还曾转发过纪念首次登上月球 25 周年的录音信息。

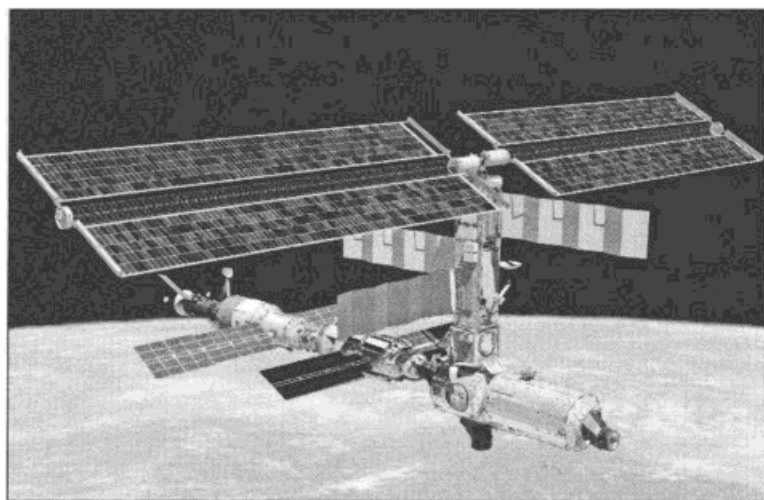
另外一个 Radiosputnik 是 RS-12/13。就像以前受大家欢迎的 RS-10/11 组合一样, RS-12/13 也作为前苏联 COSMOS 导航卫星的一个模块在 1991 年 2 月 5 日被送入轨道。每个 Radiosputnik 都有一个 40kHz 带宽的线性转发器, 可以同时允许多路 CW 和 SSB 通联。它们还带有自动转发系统, 可以应答 CW 呼叫和发送联络代码。

载人航天器与业余无线电

除了无人航天器之外, 业余无线电还有着载人航天的丰富历史。

一切都要从 1983 年秋天的 STS-9 航天飞机飞行任务开始。根据约翰逊航天中心业余无线电俱乐部的历史档案, STS-9 载着火箭专家 Owen Garriott 升空了, 他的业余无线电呼号是 W5LFL。哥伦比亚号航天飞机在太空中疾驶了 10 天, 在最后的 7 天中全世界的 HAM 们都能在他们地面站的 2m 频段的 FM 接收机听到 Garriott 博士的声音穿过他们的 2m 频段的 FM 静噪呼叫地面站。

地面上的火腿们不仅有可能偶然联系上空间轨道飞船上的火腿宇航员, 而且从 1990 年的 STS-35 开始, 业余无线电组织就在航天飞机业余无线电实验 (SAREX) 中获得了新的角色。SAREX 为轨道火腿宇航员和学校的交流带来了机会, 让学校直接接触到宇航员和太空计划。SAREX 计划在 1998 年结束。



ARIS 项目使业余无线电出现在了国际空间站上

前苏联在它的载人航天项目中也同样迅速地和业余无线电组织合作。1986 年和平号空间站最早的模块被送入轨道。在接下来的 15 年间，和平号装载了业余无线电装置，并且在其中的宇航员中有几个是业余无线电爱好者，他们通常把 RØMIR 作为呼号。地面上的无数火腿们，包括 SAREX 的许多学生，都得到了与和平号宇航员直接对话的机会，或者能接入到和平号的业余无线电分组数据信息系统中去。和平号上装载的 SSTV 能传输图片，这也让 HAM 们感到很兴奋。

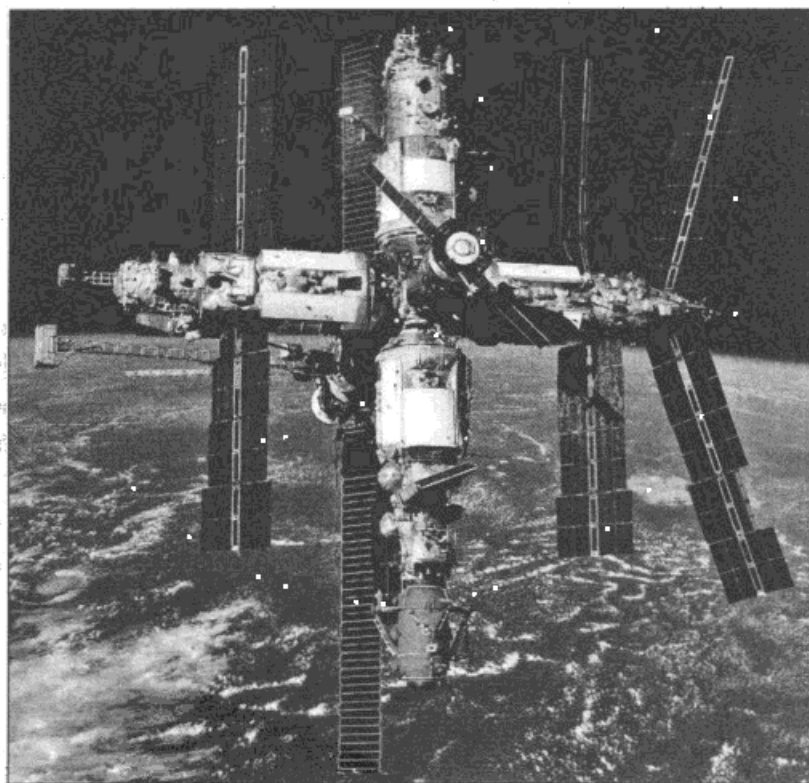
总的来说，超过 100 个宇航员在和平号执行过任务。这个空间站最终在 2001 年 3 月 23 日退役并坠入大气层。



1983 年 11 月 28 日，STS-9 航天飞机载着火箭专家 Owen Garriott/W5LFL 升空了。它是第一个使用业余无线电的载人航天器

受国际空间站建造的影响，美国 SAREX 项目被 ARISS(国际空间站业余无线电)所取代了。ARISS 是个用预先准备的业余无线电通联来启发全世界学生进入科学、技术、工程和数学领域的项目。

ARISS 是个国际工作组，包括了来自 9 个国家的代表，包括一些欧洲国家、日本、俄罗斯、加拿大和美国。这个组织由来自各国的业余无线电组织和业余卫星组织 AMSAT 的志愿者来运作。由于 ARISS 是国际性的，它的团队与各国的航天部门(例如 ESA、NASA、JAXA、CSA 和俄罗斯空间组织)合作，通过 ARISS 工作组会议、电话会议和电子邮件来进行运作。近些年 ARISS 安装了新的业余无线电组件。并且国际空间站的通联并不局限于学生。ISS 成员偶尔会抽空到 2m 的 FM 波段上去通联，ISS 无线电数字中继台经常也能够使用。



前苏联和平号空间站在业余无线电频段上非常活跃

RS-12/13 曾经很受欢迎，因为它的 HF 和 VHF 转发器地面站的要求不高，任何人都可以用简单的地面站设备来进行操作。这些卫星的寿命持续了 11 年，一直到 2002 年被太阳耀斑损坏后作为母体的 COSMOS 卫星才停止了工作。

英国卫星 UoSAT-5 由英国萨里大学建造, 在 1991 年 7 月 17 日送入轨道, 成为 UoSAT-OSCAR 22。OSCAR 22 设计为多任务卫星, 其中一个任务是进行原先在 UoSAT-OSCAR 15 的实验, 但在卫星进入轨道后不久, 星载电子设备就出故障了。而 UoSAT-OSCAR 22 的主要任务是在整个寿命周期内为非营利人道主义组织 VITA 提供非业余无线电相关的数字存储转发通信服务。

后来 UoSAT-OSCAR 22 在太空中的主要任务改变了, 首次和另一个卫星 UoSAT-OSCAR 14 进行了“角色转换”, 所以这颗卫星也发挥了一部分业余无线的作用。UoSAT-OSCAR 22 最具特色的方面之一是由英国萨里大学的 Marc Fouquet 博士设计的地球成像系统 (EIS)。这个系统的目的是使用光电感应 (CCD) 相机从低轨道拍摄地球图像并传送这些图像, 地面站使用业余频率和 AX.25 分组无线“Pacsat 广播协议”来接收。UO-22 在可靠服务多年后沉寂了。

1992 年 8 月 10 日发射了 KITSAT-OSCAR 23 卫星, 这是一颗由韩国高级科学技术院 (KAIST) 学习英国萨里大学的卫星而业余设计的微型卫星。这颗数字化储存转发卫星是由韩国 KAIST 卫星技术研究中心 (SaTReC) 管理的。它的电源系统工作了几年后就失效了。

第一颗法国业余卫星 Arsene-OSCAR 24 在 1993 年 5 月 13 日从法属圭亚那库鲁发射场用 ArianeV-56A 送入轨道。这颗卫星的生命短暂且坎坷, 它本来是一颗分组数据中继卫星, 但是数据分组系统却从未启用, 因为它的 2m 波段转发器在发射后不久就损坏了。Arsene 当时还用 2.4GHz 来中转 SSB 和 CW 信号, 但是几个月后, 这个转发器也失效了。

1993 年还有一颗业余卫星“首次”与 HealthSat-2 一起在当年 9 月发射。就是葡萄牙的第一颗卫星 PoSAT-1, PoSAT-1 作为萨里大学与葡萄牙学术界和工业界联合协作的项目而建造。该卫星用于一些技术试验, 并且具有分组无线存储转发系统。PoSAT 在 1994 年初曾在业余频率运营了几个星期。《OSCAR 新闻》(1994 年 2 月, 第 35 页) 刊登了来自 CTIDBS 的报告, 声称已经签署了一项协议, AMSAT-PO 和 PoSAT 于 1993 年 12 月 6 日联合声明: “PoSat-1 将使用于业余无线电组织的 PoSAT OSCAR 28、OSCAR 28 或 PO-28”。尽管它有 OSCAR 卫星的编号, 但 PoSAT-1 却从来没有重新开放过业余无线电功能。

KITSAT-OSCAR 25 在 1993 年 9 月 26 日在法属圭亚那库鲁发射场由 Ariane 火箭发射升空。这颗卫星就像是 KITSAT-OSCAR 23 的孪生兄弟, 但是它的设计制造则全部是由韩国高级科学技术院 (KAIST) 完成的。KO-25 由韩国 KAIST 卫星技术研究中心操控。KO-25 的任务是拍摄 CCD 影像、处理数字信息, 测量辐射及收发邮件。它还要进行一个红外传感器 (IREX) 试验, 用来衡量红外传感器在太空中的特性。最后还设计了无源冷却结构试验, 以便地面控制站可以监测到它的温度。在业余无线电方面, KO-25 可以使用分组数据存储转发中继, 只是它目前已不能使用了。

火箭将 KO-25 送入轨道的同时也将 Microsats ITAMSAT OSCAR 26 和 AMRAD-OSCAR 27 带入了轨道。

ITAMSAT 是意大利的第一颗业余卫星, 建造和操控它的是一个意大利 AMSAT 的小团队。它的任务是存储转发业余无线电信息, 和它工作方式相同的卫星有 AO-16、LO-19、

UO-22、KO-23 和 KO-25。可惜的是很少见到有火腿们使用 OSCAR 26，它现在处于沉寂状态。

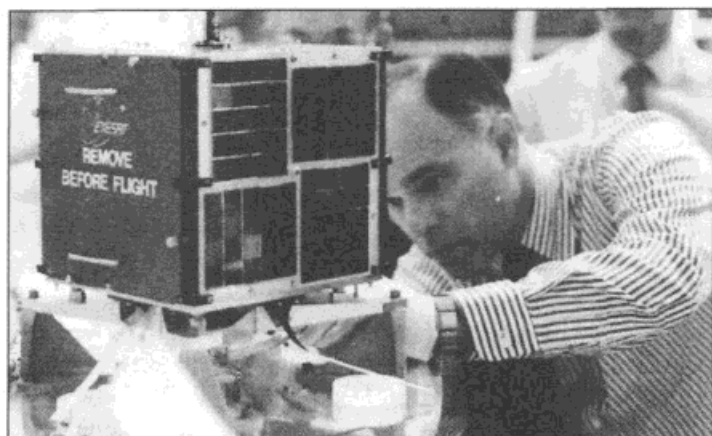


图 1.8 这颗通过检验的卫星就是后来著名的 "OSCAR-27"

相对于 OSCAR 26 来说，AMRAD-OSCAR 27 (AO-27) 是极受欢迎的，并且直到今天依然如此。AO-27 是作为次要业余通信有效载荷搭载在弗吉尼亚州尚蒂伊 Interferometrics 公司的 EYESAT-1 微型试验性卫星上的。这个商业航天器的主要任务是监测移动工业设备试验。

部分业余无线电卫星是由 AMRAD 公司成员建造的，一个以研究技术为目的业余无线电爱好者的非营利性组织，总部设在华盛顿的郊区，其目的是开发一个进行数字卫星通信试验的平台。

今天，AO-27 作为一个太空中的 FM 中继器，基本由一个工作在 145.850MHz 的接收机和一个工作在约 436.795MHz 的晶控 FM 发射机组成。由于这颗卫星的电力分配有限，希望能够保持充足的电池容量，所以多年以来，这个业余发射机只在 AO-27 的轨道处于阳光下的时候才能使用。另外，AO-27 可以在白天的时候通过北半球。

在 1994 年只有一颗业余卫星 Radiosputnik 15 在 12 月 16 日发射入轨。它有一个 2 ~ 10m 波段的转发器和 CW 信标。但是它的信号极其微弱，甚至让人怀疑这颗卫星是否在正常运转。现在也只是偶尔能收到火腿们报告从 RS-15 上接收到了微弱的 CW 信标。

1995 年 3 月 28 日，墨西哥的 UNAMSAT-1 和以色列的 TechSat-1 业余卫星在前苏联的普列谢茨克航天发射场用 Start-1 火箭（译者注：“Start-1”火箭是一种代称型号，是根据苏美第一阶段消减简略武器条约的基础上由前苏联白杨洲际弹道导弹改装的）发射升空，但是火箭升空后不久便发生了爆炸，连同卫星一起摧毁了。

日本的 Fuji-OSCAR 29 用来接替失效的 OSCAR 20，于 1996 年 8 月 17 日从种子岛太空中心用 H-II No.4 火箭送入轨道。它是日本业余无线电联盟 (TARL) 的项目，OSCAR 29 携带 SSB 和 CW 模式的线性转发器，它在 2m 波段接收并在 70cm 波段发射。现在它仍然在工作，但是整体工作能力衰退了。

墨西哥的第二颗业余卫星 UNAMSAT-B 在墨西哥国立大学 (UNAM) 建成，并于 1996

年9月5日在前苏联发射。因为它是 UNAMSAT-1(见上文) 的孪生卫星, 所以后来被称为 Mexico-OSCAR 30。不幸的是, MO-30 也停止了工作, 因为在进入轨道后的几小时内它的接收机就坏掉了。

Radiosputnik 16 于 1997 年 2 月发射升空, 携带有 2 ~ 10m 波段的转发器和一个 70cm 波段的信标机。但是不知是什么原因, 它从未启用这个转发器。这颗卫星在 1999 年重新进入大气层时烧毁了。

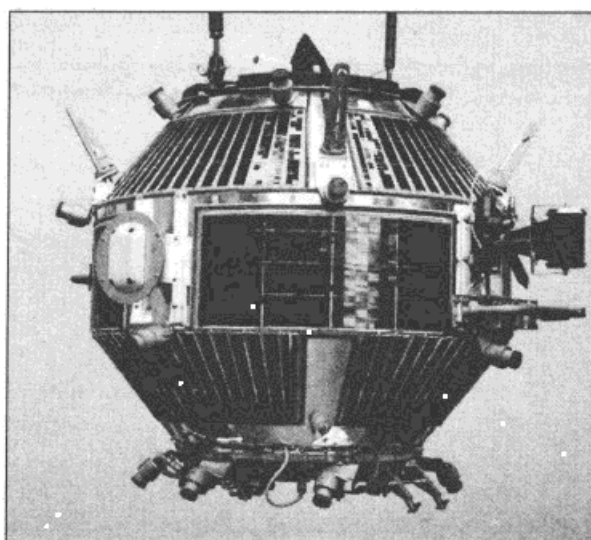


图 1.9 Radiosputnik 16 卫星被太阳能电池围裹, 在 1997 年发射入轨但是它的转发器却从没被开机工作过

还有一颗不同寻常的卫星短暂露面, 它是 1997 年 11 月 4 日从前苏联国际空间站送入太空的 Radiosputnik 17a, 也叫做“人造卫星 40”。这个小卫星是由高中生按照第一颗“人造卫星 1”制作的比例模型, 用来纪念其发射 40 周年。RS-17a 发送了 55 天的信号, 最后一次收到它的信号是在 1997 年的 12 月 29 日。

Thai-Microsatellite-OSCAR 31 卫星在 1998 年 7 月 10 日从前苏联拜科努尔航天中心发射进入圆形太阳同步轨道。它携带有 9600 波特的 FSK 数字转发器 GPS 接收机和成像子系统。OSCAR 31 和 KITSAT-OSCAR 23 类似, 但是它具有采集多光谱图像的能力。在写此文的时候, 这颗卫星已不能工作。

以色列的 Gurwin-OSCAR 32 卫星或者称作 TechSat-1b, 是在 1998 年 7 月 10 日进入轨道的, 这个 Microsat 是以色列海法市台克农工学院的学生和以色列业余无线电俱乐部合作的一个项目, 在发射 8 年后, OSCAR 32 依然性能强劲。这颗卫星支持以 9600 波特分组存储转发数据, 它还有一个高分辨率的彩色摄像机, 可以提供惊人的地球图像。近年来, OSCAR 32 将一个 9600 波特的中继器用于自动位置报告系统 (APRS), 使用 145.930MHz 的专用上行频率。

阿拉巴马州亨茨维尔大学的学生和美国“基于学生的空间探索与发展计划”(SEDS) 一

起设计建造了这颗 SEDSAT-1 卫星，或者称作 SEDSAT-OSCAR 33。它后来在 1998 年 10 月 24 日在加利福尼亚州范登堡空军基地由 Delta II 火箭送入轨道。它携带有分组储存转发和模拟转发器，还进行了一系列试验。它目前只有半可操作状态。

PANSAT-OSCAR 34 是在 1998 年 10 月 30 日由发现号航天飞机送入轨道的，它是一颗带有数字存储转发邮件系统的 Microsat 卫星，由加利福尼亚州蒙特里美国海军研究生院设计制造。OSCAR 34 是一颗独一无二的数字卫星，因为它采用了直接序列扩频通信技术。OSCAR 34 只提供部分业余用途，但是后来这颗卫星失效了。

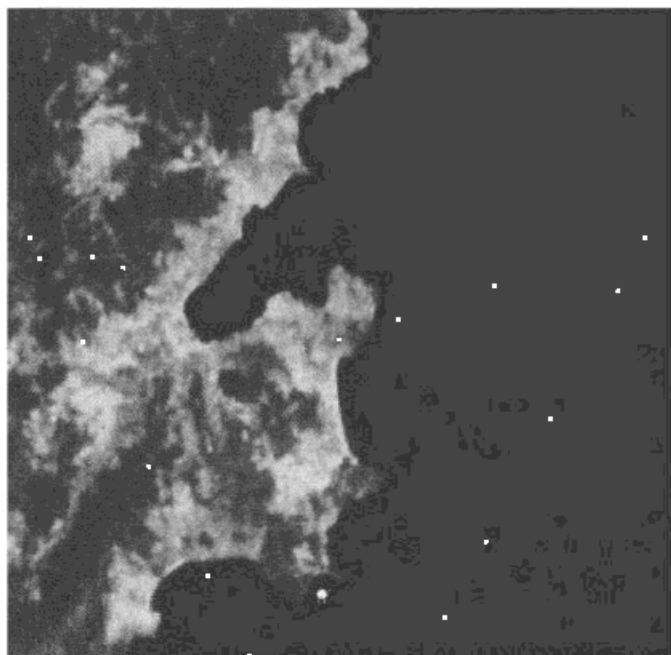


图 1.10 GURWIN-OSCAR-32 卫星第一次传送的图片

另一个小 Radiosputnik，也可以称作 Radiosputnik 18/Sputnik 41。在 1998 年 11 月 10 日从和平号国际空间站抛出。它和它的“前身”Sputnik 40 一样，是一个“大个的”Sputnik 1 复制品。它在 2m 波段一直使用英语、俄语和法语发射带有语音问候的信标信号。这颗卫星在进入轨道几个月后重新进入大气层时烧毁了。

SUNSAT-OSCAR 35 也是一颗 Microsat 卫星，是由南非斯泰伦博斯马蒂兰大学的机电—电子工程系的研究生在其电子系统实验室建造的。它于 1999 年 2 月 23 日升空入轨。它携带的有效载荷包括 NASA 的实验设备、业余无线电通信设备、一个高清晰度成像仪、精密姿态控制设备以及学校的实验设备。OSCAR 35 失效于 2001 年的 2 月。

虽然在 1999 年 4 月 16 日由和平号国际空间站手动推出了 Radiosputnik-19/Sputnik-99，但是它却备受争议。因为它最初的设计是一个在业余频率上发射的信标台，可最后却用于推广瑞士 Swatch 公司手表。经过火腿群体的强烈抗议之后，也因为业余无线电不适于这种商业行为才放弃了这颗卫星并关闭了业余频率的发射机。

UoSAT-OSCAR 36 是 20 世纪发射的最后一颗卫星。由英国萨里大学的萨里卫星技术有限公司建造。它于 1999 年 4 月 21 日从前苏联的拜科努尔航天中心发射。OSCAR 36 携带了一个数字化成像单元和一个独特的推进系统轨道维持实验。为了下载图像数据它在 S 波段的下行速度高达 1Mbit/s。在其短暂的寿命中,对于业余爱好者来说,它充当了一个数字存储转发卫星的角色。

1.5 新世纪的曙光

在进入 21 世纪不到一个月的时候,一枚独特的火箭将一颗复杂的业余卫星发射升空了。这是在 2000 年 1 月 27 日由加利福尼亚州范登堡空军基地发射的 Minotaur 火箭。这枚六级 Minotaur 火箭是从退役核导弹上的可利用的部分构件组成的,它是由美国空军的“民兵-2”导弹的第一、二级与用于轨道科学公司的商业用途的 Pegasus 火箭的第三、四级组成。这次发射成功可以证明这种组合式火箭是具备运送卫星进入太空的能力的。

Minotaur 火箭在运送一些非业余无线电卫星进入轨道的同时也将业余无线电卫星一同送入轨道。

亚利桑那州的 State-OSCAR 37 卫星载有业余数分组数据通信硬件系统及 2m/70cm 波段 FM 模式的语音中继器。尽管该卫星被成功激活,但是通过遥测信息很快得知其电力系统发生了一个关键性的问题,该太阳能电池阵列处于离线状态而无法充电。因此,OSCAR 37 在进入轨道 15 小时候后便失效了。

OPAL-OSCAR 38 卫星携带有 9600 波特的数字无线存储转发系统,目前它是不可操作状态。OSCAR 38 被设计为用来发射 6 颗被称为 picosats 的微型卫星。其中一颗 picosats 名为 StenSAT 具有业余无线电功能,StenSAT 由华盛顿特区的业余无线电爱好者建造。它的体积只有 12 立方英寸,重量只有 8.2 盎司,具有一个单信道 FM 语音中继器功能,上行在 145.84MHz,下行在 436.625MHz。虽然 StenSAT 被成功部署,但是它却从未全面工作过。

Weber-OSCAR 39 卫星也被称作 JAWSAT,它的发射旨在作为一个部署小卫星的平台。JAWSAT 主张联合空军的 Weber 卫星,这是美国空军与韦伯州立大学的一个合作项目。在这一宗旨下,JAWSAT 还部署了 OSCAR 37、OSCAR 38、OCSE(OCSE 是美国空军研究实验室的光学校正球试验)以及 FalconSat 卫星。后面这颗卫星被美国空军学院的学员用来研究带电粒子如何产生并对星载计算机系统造成巨大破坏,遥测信号由 JAWSAT 的业余频率转发出去。

2000 年 9 月 26 日在前苏联拜科努尔航天中心用一枚改装的弹道导弹将 SaudiSat-OSCAR 41 卫星等 3 颗业余卫星发射升空。OSCAR 41 是沙特阿拉伯最早具有业余无线电能力的

Microsats 卫星。它载有 9600 波特的数字存储转发系统及一个 FM 模式的中继器。它由阿卜杜勒阿齐兹国王科技城的空间科学和技术研究所建造。最初该卫星的 FM 模式中继十分活跃，后来该卫星沉寂了下来，直到 2003 年 2 月依旧没有消息。

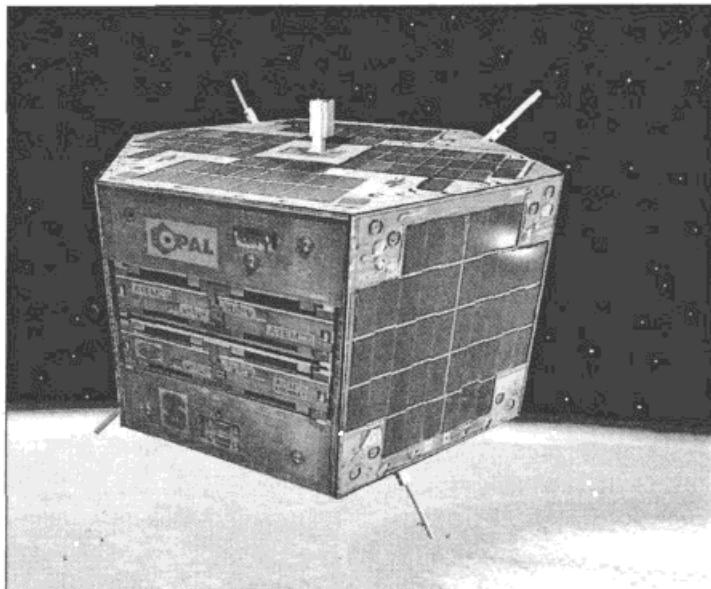


图 1.11 OPAL-OSCAR 38 卫星携带有 9600 波特率无线电分组存储和转发系统，还投放出了几个“微卫星”，被称为“picosats”

陪同 SaudiSat-OSCAR 41 一起发射升空的还有 Malaysian-OSCAR 46 和 Saudi-OSCAR 42。OSCAR 46 是马来西亚的第一颗 Microsat 卫星。除了载有商用陆地及天气成像有效载荷外，它还提供 FM 模式和 FSK 模式的业余无线电通信能力。这是马来西亚政府与英国萨里卫星技术有限公司合作的产物。它只在开始运行的时候向火腿们提供了简单的操作，现在处于不用状态。与 OSCAR 41 一样，OSCAR 42 也是沙特阿拉伯的一颗 Microsat 卫星，但就它提供的业余无线电能力而言，它就像 OSCAR 41 的虚拟双胞胎一样，它现在也是处于停止工作状态。

业余无线电卫星有史以来建造的最大最复杂的 AMSAT OSCAR 40 卫星，也被简称为 AO-40，于 2000 年 11 月 6 日从法属圭亚那库鲁发射场由阿丽亚娜 5 (Ariane 5) 号火箭发射升空。也像其 Phase III 卫星的前辈一样，AO-40 被送入一个远地点为 58 971km 和近地点为 1000km 的偏心莫尔尼亚轨道。

OSCAR 40 提供从 VHF 到微波频段的几组线性转发器，还带有高清晰度彩色摄像机、数字转发器及一些科学实验载荷。凭借其在远地点的高度、强大的输出功率及高增益天线，它可以提供保障半个地球通信的信号强度，这是从未有过的事情。

可悲的是，在发射时卫星变轨发动机泄气孔上面的保护塑料帽被无意中留在了上面，也许永远也没有准确详细的资料来说明究竟发生了什么样的故障，但是从在太空中不断启动该发动机的情况来看，压力聚集在发动机的燃料供应管线上，以至于其中一个或多个管线最终破裂，并在卫星的内部喷出挥发性的自燃（不需要火花引燃）燃料和氧化剂。很显然由此产生的爆炸是

足以摧毁卫星底面的全向天线。因此不用说，肯定是所有的无线链接和信标马上失效了。一周后才重新恢复了与卫星的通信和部分操作能力。虽然它像前辈卫星一样不幸，但世界各地的火腿们依然对 OSCAR 40 进行了大量的操作，直到 2004 年 1 月时，由于主电池失效这个灾难性的故障，OSCAR40 才停止了工作，长期以来该卫星一直处于沉寂状态，现在正在考虑是否要将它废弃。

在 2001 年 9 月 30 日载有 3 颗复杂业余无电线卫星的 Athena I 型火箭从阿拉斯加科迪亚克岛发射升空了。Navy-OSCAR 44 (NO-44), 也称作 PCSAT-1, 它载有一个设计为通过手持或车载移动收发设备使用的 1200 波特的 APRS 数字中继器，并且直到现在仍在运作。但这颗卫星的供电不足，这意味着它只能在中午太阳照射的轨道上工作。但在它再次进入地球阴影的 45min 后，卫星上充电电池的电力将完全耗尽。它必须再次用足够时长的光照来进行充电以恢复充足的电力，才能提供分组数据发射机所需的峰值功率。

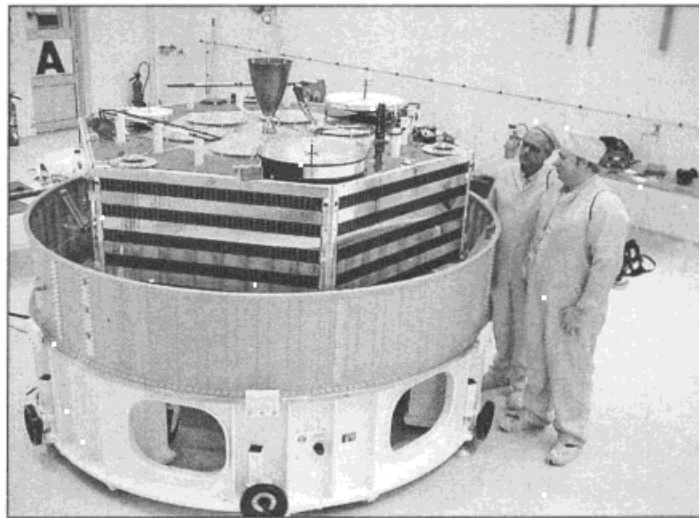


图 1.12 有史以来设计制造上最大最复杂的 OSCAR 40 业余卫星“PCSAT-1”

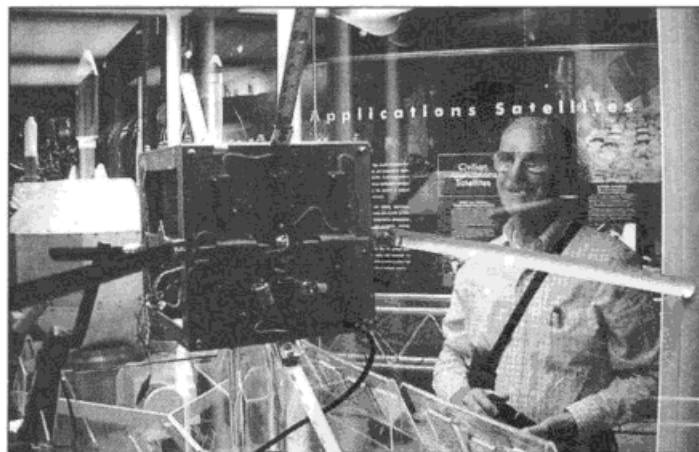


图 1.13 这颗展示中的 Navy-OSCAR 44 (NO-44) 的卫星模型也被称为“PCSAT-1”。这是一颗 1200 波特的 APRS 中继卫星，它的转发器设计可以为地面站及手持式设备提供服务

这枚 Athena I 火箭还发射了 Starshine-OSCAR 43 卫星，这是一颗篮球状的卫星。卫星上覆盖有美国及其他 25 个国家约 4 万名学生志愿者制造的抛光铝质反射镜。Starshine 的首要任务是作为学校对孩子们进行航天及无线电科学教育。学生们帮助建造的 Starshine，使他们能够直观地目视跟踪到卫星在早上或傍晚通过。通过记录其反射镜所折射的闪烁光芒来形成他们的意见和报告，并提交给 Starshine 项目总部。Starshine-OSCAR 43 可以在业余频率上发射遥测信号，但是现在也已经不能工作了。

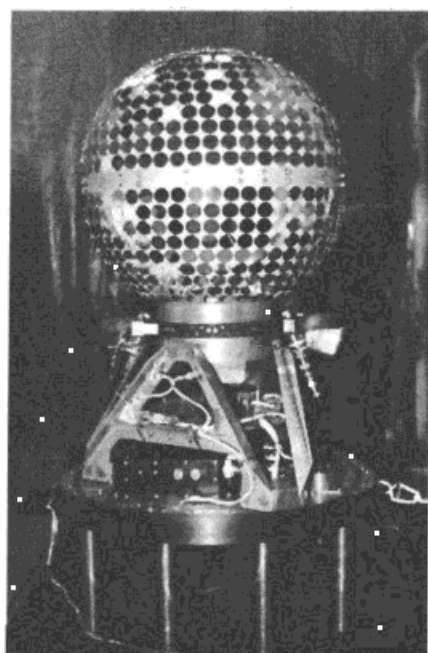


图 1.14 STARSHINE-OSCAR 43 卫星上覆盖着美国及其他 25 个国家的 4 万多名学生自愿磨制的约 1500 片铝制抛光镜片

科迪亚克岛发射的 3 颗卫星中的最后这颗是 Navy-OSCAR 45，或者称作 Sapphire。Sapphire 是一种 Microsat 卫星，由斯坦福大学和华盛顿圣路易斯大学的学生设计。Sapphire 的主要任务是测试 2 套由斯坦福大学喷气推进实验室设计建造的“隧道地平仪”红外传感器，还有些中学实验，并携带有数码相机和语音合成器等。现在 OSCAR 45 处于不工作状态。

Radiosputnik 21/Kolibri 卫星是一颗极小的教育卫星，拥有短暂但有趣的一生。它是在前苏联科学院空间研究所建造，塔鲁萨、卡卢加研究所也参与其中，悉尼和澳大利亚及奥布宁斯克的学生将其命名为 Kolibri-2000 (Kolibri 的意思是“蜂鸟”)。

该卫星搭乘前苏联进步 M-17 货运飞船于 2001 年 12 月抵达国际空间站，后于 2002 年 3 月 20 日火箭点火离开时，44 磅重的 Kolibri 同时被送入太空。Kolibri 在空间中缓慢下降，在环绕地球 711 圈次，也就是 4 个月后重新进入大气层烧毁，期间它是在 145.825MHz 的下行频率发送遥测数据和数字记录语音信息的。

法国业余无线电爱好者在 2002 年重返太空的 2 颗 picosats 卫星是已发公告的 IDEFIX

CU1 和 IDEFIX CU2。这些卫星在 5 月 3 日从法属圭亚那库鲁用阿丽亚娜 4 火箭送入轨道，同时阿丽亚娜火箭还将 SPOT-5 照相卫星送入轨道。这 2 颗卫星后来被正式命名为 BreizhSAT-OSCAR 47 和 BreizhSAT-OSCAR 48。这些卫星依然是作为阿丽亚娜火箭第 3 级的配载，它们发射预先录制的窄带 FM (NBFM) 语音信息及数字遥测数据。但是这两颗由电池供电的卫星在 2 个星期后就变为沉寂状态了。

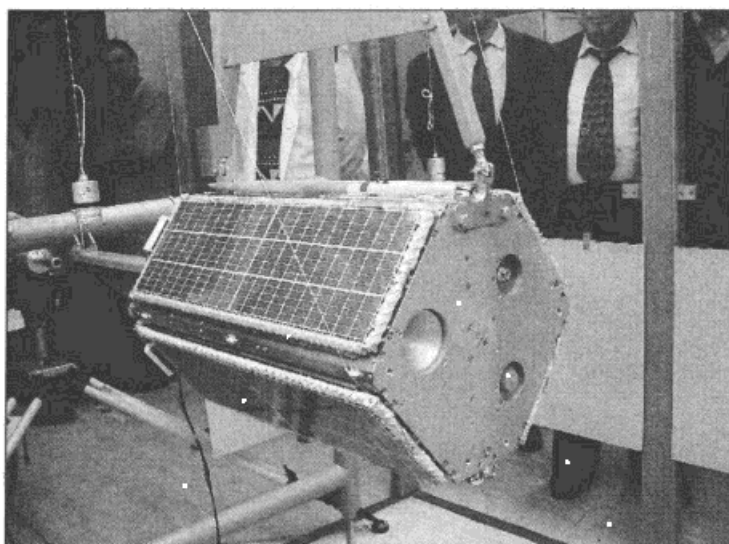


图 1.15 RADIOSPUTNIK-21 卫星（蜂鸟）在 2001 年 12 月搭乘俄罗斯进步 M-17 货运飞船飞往国际空间站，在 2002 年 3 月 20 日，进步号货运飞船离开国际空间站，这颗 44 磅重的“蜂鸟”被送入宇宙空间

2002 年 12 月 20 日，在前苏联拜科努尔航天发射场用改装的弹道导弹将 2 颗业余卫星发射升空。AATIS-OSCAR 49 是在德国小型科学卫星 RUBIN-2 上面的业余无线电有效载荷，它被设计为一个 APRS 存储转发系统，不过一个月后也未能进入轨道。但同期推出的伴星 Saudi-OSCAR 50 直到现在依然作为 FM 模式的中继器运行在轨道上。

可以这么说，2003 年是 CubeSats 卫星的代表年份。顾名思义，CubeSats 卫星是微小的立方体形状的卫星，用于低地球轨道的特定任务，一般它都是设计为短寿命周期。从 2003 年到现在，已经有许多 CubeSats 卫星进入轨道，但是只有少数能得到 OSCAR 的编号。

CubeSat-OSCAR 55 卫星（也叫做 Cute-1）和 CubeSat-OSCAR 57 卫星是于 2003 年 6 月 30 日在拜科努尔航天中心用 Dnepr 火箭发射升空的。2 颗卫星都是东京大学的项目，并在业余频率上传输遥测信息。今天它们依然很活跃。

RS-22 是 21 世纪的第 2 颗 Radiosputnik 卫星，于 2003 年 9 月 27 日在拜科努尔航天中心搭乘 Dnepr 火箭发射升空。这是一个 Mozhaisky 军事航天大学的项目，卫星只发射 CW 遥测信号。

2004 年发射的唯一的一颗业余无线电卫星后来被证明是新世纪最流行的 Hamsats 卫星之一。这颗 AMSAT-OSCAR 51 卫星也叫做 Echo，是 2004 年 6 月 28 日从拜科努尔发射场由

Dnepr 火箭送入轨道的。AO-51 包含有一个 FM 模式的中继器，它有 144MHz 和 1.2GHz 的上行链路及 435MHz 和 2.4GHz 的下行链路。此外，AO-51 还携带有一个工作在 70cm 波段的数字传输遥测子系统，并提供一个完整的 BBS 系统，可以配置 V 和 S 波段的上行链路，还有一个 PSK 模式的 10m 波段上行链路。

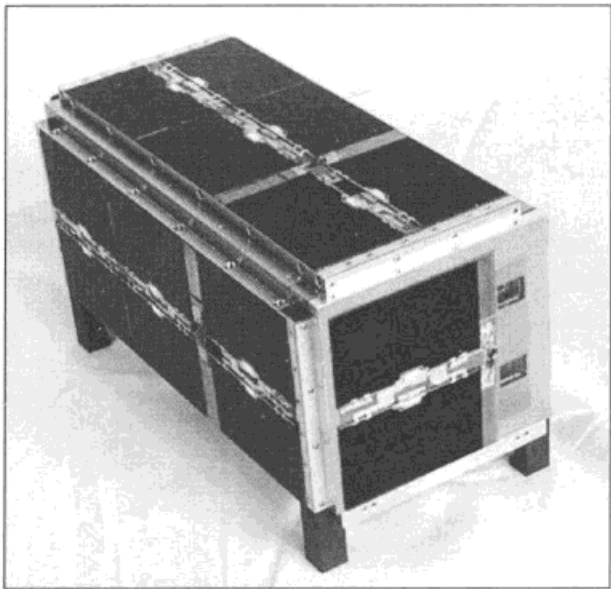


图 1.16 “CubeSat” (微卫星), 一个好名字!

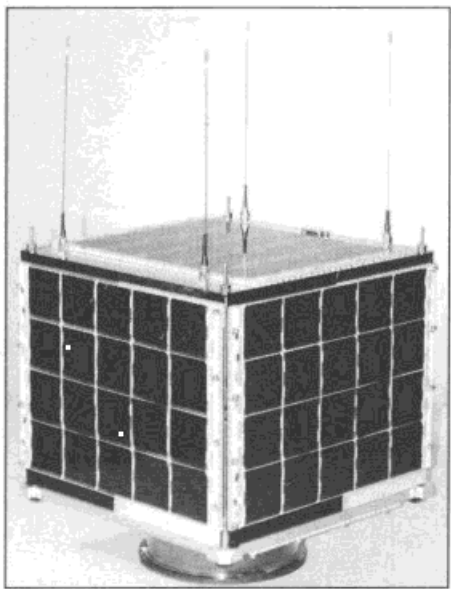


图 1.17 主要作为 FM 模式中继器的 AMSAT-OSCAR 51 卫星

直到现在，OSCAR 51 卫星仍是使用最为频繁的在轨 FM 模式中继器。它很容易操作，只需要双频段的 FM 模式收发信机和简单的全向天线即可。

印度的 VUSat-OSCAR 52 卫星于 2005 年 5 月 5 日从印度 Sirharkota 由 PSLV 火箭送入轨道。现在它已经成为一颗最流行的 SSB 和 CW 模式卫星。该卫星在 70cm 波段接收信号，并在 2m 波段转发，而不是单信道的接收与转发。而且，OSCAR 52 的线性转发器在信号横跨的频率范围内允许进行多个通联，可参阅表 1.1。

表 1.1 目前活跃的业余无线电卫星

2008 年 9 月的卫星	上行 (MHz)	下行 (MHz)	遥测模式
AAUSAT-II	—	437.425 (packet)	Telemetry
		29.502	Beacon
		145.975	Beacon
		435.106	Beacon
		29.400-29.500	SSB/CW.non-Inverting
	432.125-432.175	145.975-145.925	SSB/CW.Inverting
AMSAT-OSCAR 16	145.920 (FM)	437.025 (SSB)	FM/SSB repeater
AMSAT-OSCAR 27	145.850	436.795	FM repeater

2008 年 9 月的卫星	上行 (MHz)	下行 (MHz)	遥 测 模 式
AMSAT-OSCAR 51	145.920	435.300	FM repeater CTCSS required
	145.880	435.150	USB/FM voice
	145.880	2401.200	FM voice
	145.860	435.150	9600 bps digital
	145.860	2401.200	9600 bps digital
	1268.700	2401.200	FM voice
	1268.700	435.150	FM voice
ARISS (USS)	144.490	145.800	Crew contact, FM (Rgn. 2/3)
	145.200	145.800	Crew contact, FM (Rgn. 1)
	145.990	145.800	Packet BBS
	145.825	145.825	APRS digipeater
	—	144.490	SSTV downlink
	437.800	145.800	FM repeater
Compass-One	—	437.275 (CW)	Telmetry
	—	437.405 (packet)	Telmetry (Including Images)
CubeSat-OSCAR 57	—	436.8475 (CW)	Telmetry
		437.4900 (packet)	Telmetry
CubeSat-OSCAR 58	—	437.4650 (CW)	Telmetry
		437.3450 (packet)	Telmetry
CubeSat-OSCAR 66	—	437.485 (packet)	Telmetry (Including Images)
Cute1.7+APDII	1267.600	437.475	9600 baud packet
Dutch-OSCAR 64	145.870 (packet)	Telemetry	
	435.530-435.570	145.880-145.920	SSB/CW, Inverting
Dutch-OSCAR 29	145.900-146.00	435.800-435.900	SSB/CW, Inverting
Gurwin-OSCAR 32	145.930	435.225	9600 baud APRS packet
	145.850		9600 baud APRS packet
	145.890		9600 baud packet
	145.930		9600 baud packet
	1269.700		9600 baud packet
	1269.800		9600 baud packet
	1269.900		9600 baud packet
Navy-OSCAR 44	145.827	145.827	1200 baud APRS packet
Saudi-OSCAR 50	145.850	436.795	FM Repeater—67 Hz CTCSS required
Sumbandila-OSCAR 67	145.880	435.350	FM Repeater 233.6 Hz
VUSat-OSCAR 52	—	145.860	CW Beacon
		145.936	Carrier Beacon
	435.220-435.280	145.870-145.930	SSB/CW, Inverting
Hope-OSCAR 68	145.825	435.675	FM Repeater-67Hz
	145.925-145.975	435.765-435.715	SSB/CW, Inverting
	145.825	435.675	1200 baud packet

PCSAT-2 是一颗像“手提箱”一样的卫星，它由宇航员 Soichi Noguchi 在 2005 年 8 月 3 日安装在国际空间站外。PCSAT-2 完成了 4 周的实验，其中有 PSK-31 应答模式及 APRS 分组数字中继等。后来它在 06 年 9 月 21 日随 STS-115 航天飞机执行飞行任务被带回地球。

AMSAT-OSCAR 54 卫星，也称作 SuitSat，是业余无线电有史以来最不寻常的卫星之一。SuitSat 是一件安装有效载荷的废弃的前苏联 Orlan EVA 宇航服，在 2005 年 9 月 8 日被国际空间站抛入太空，它带有一个 2m 波段的业余无线电信标发射机，但不幸的是，一个明显的发射机故障（也可能是天线故障，或者两者都发生故障了）使信标变得非常微弱。只有装备精良的业余电台地面站才能监听到它，最后一次确认接收到 SuitSat 的信号是 2006 年 2 月 18 日星期六这天，由鲍勃·金 /VE6BLD 确认。

Express-OSCAR 53 卫星，也被称作 SSETI Express。于 2005 年 10 月 27 日从前苏联普列谢茨克发射场发射，进入轨道后不久，SSETI 进入安全模式并发送 9600 波特率的载波脉冲遥测信号。OSCAR 53 卫星还部署了 3 颗用于研究的 CubeSats 卫星，但不久后就停止了工作。

日本的 CubeSat-OSCAR 56 卫星，于 2006 年 2 月 21 日从鹿儿岛航天中心搭乘 JAXAM-V8 火箭升空，这是日本东京工业大学太空系统实验室的一个项目，OSCAR 56 目前是半可操作状态，只发送其下行遥测信号。

另外一颗日本 CubeSat 卫星是 HITSat-OSCAR 59，于 2006 年 9 月 22 日从鹿儿岛航天中心搭乘 JAXAM-V 火箭升空，它带有一个 1200 波特的数字无线分组 BBS 系统。OSCAR 59 卫星在 2008 年 6 月重新进入大气层烧毁。

Navy-OSCAR 61 卫星随航天飞机执行 STS-116 飞行任务进入太空，它作为一个 APRS 中继器一直工作到 2007 年 12 月 25 日，重新进入大气层烧毁了。

在 2008 年 4 月 28 日有 10 颗卫星在印度 Satish Dhawan 航天中心搭乘 PSLV-C9 火箭进入轨道。这些主要载荷是印度的 CARTOSAT-2A 和 IMS-1 卫星，还有 NLS-5 和 RUBIN-8 卫星。除了这些卫星外，还有 6 颗用于研究的 CubeSat 卫星，这些卫星均使用业余频率来建立沟通。

还有 SEEDS 卫星，由日本的日本大学的学生设计建造。SEEDS 卫星在 437.485MHz 上使用莫尔斯电码和 1200 波特 FM 模式的 AFSK 分组无线电下发遥测信息。同时，该卫星还具备慢扫描电视（SSTV）的功能。

AAUSAT-II 卫星是丹麦奥尔堡大学的学生团队建造的，它的科学遥测信息在 437.425MHz 的下行频率上使用 1200 或 9600 波特率的分组无线电传送。

Can-X2 卫星是由多伦多大学的学生及其航空航天飞行实验室（UTIAS/SFL）建造的。Can-X2 卫星下行遥测信号在 437.478MHz 上，使用的是 4kbit/s 速率的 GFSK。但是它的下行信号只在覆盖多伦多地面站的时候才发送。

Compass-1 卫星是德国 Aachen 应用科学大学的学生设计和建造的。该卫星的特点是有个工作在 437.275MHz 上的 CW 遥测信标。Compass-1 卫星还在 437.405MHz 上提供无线分组下行数据链，其中还包含图像数据。

Cute 1.7+APDII 卫星是日本东京工业大学的学生建造的，这颗卫星不仅提供遥测信

息，还提供一个 9600 波特的电子邮件数字存储转发中继器，使用 1267.6MHz 的上行和 437.475MHz 的下行链路。

Delfi-C3 卫星，后来被命名为 Dutch-OSCAR 64。它是荷兰 Delft 科技大学的学生设计建造的，它携带有一个 SSB/CW 模式的线性转发器。Delfi-C3 卫星在 145.870MHz 的下行频率上以 1200 波特发送分组遥测数据。此外，还有一个线性转发器工作在 435.530MHz/435.570MHz 上行链路及 145.880MHz/145.920MHz 下行链路上。

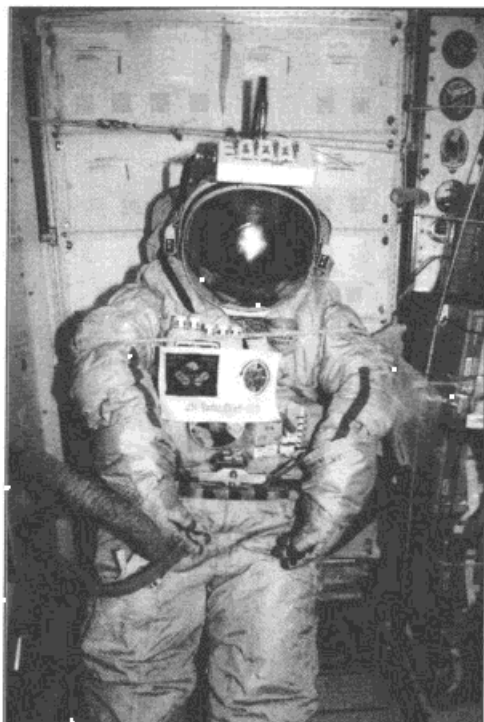


图 1.18 AMSAT-OSCAR-54 被称作 suitsat (航天服卫星) 是曾经运行在轨道上的最不寻常的卫星之一！它是由一件报废的俄罗斯宇航服改装的，在给它装上载荷设备后于 2005 年 9 月 8 日推出空间站

1.6 未 来

在写本书时，业余无线电爱好者们都希望有一颗高轨道的“DX”卫星来替代 OSCAR 40。但问题是，非营利性的业余卫星组织只依靠会员的会费、部分捐赠及志愿者们数千小时的劳动来制造卫星部件，这种方式越来越难以支撑建造这种复杂且功能强大的卫星了。更糟的是，能够负担得起这种大型卫星的发射机会也越来越少，更不用去说那些昂贵的费用了。

德国的业余卫星组织 AMSAT-DL，正在建造一颗 Phase III 卫星。这颗类似于 OSCAR 13 的卫星目前被称作 Phase III Express。他们努力的目标是要在几年内把 Phase III Express 送入轨道。

下一个最大的希望是 AMSAT-NA 正在开发的 Eagle 卫星，但是资金筹备一直很困难（以及寻找可以负担得起的发射机会），所以现在也不得不放慢了开发速度。

还有一种耐人寻味的可能性，那就是地球同步轨道的 Phase IV——通过与商业卫星的巨头公司——国际通信卫星公司合作来创建业余卫星。在 2007 年年底 AMSAT-NA 宣布，他们正与国际通信卫星公司磋商，内容包括未来的商业通信卫星搭载业余无线电多功能转发器模块，该模块可以物理驻留在国际通信卫星公司的航天器内，并使用同一个能源。这种合作方案如果能成功的话，将给业余无线电界带来巨大的收益，因为这个方案的实施可以提供足以覆盖半个地球的每周 7 天 /24 小时不间断的通信服务。

而与此同时，还可以依靠未来推出的一系列规模较小的近地航天器，因为它们不仅便宜也更容易发射，还经常能得到一些大学或院校的资助。



如果你曾经在体育馆观看过比赛，也许你会记得穿梭于场地中叫卖“节目单”的小贩。节目单五颜六色，上面有每一队的人员名单、运动员编号、照片等。他们通过公共广播系统大声叫卖：“买一本节目单吧，少了它分不清运动员。”这听起来也许很奇怪。在卫星的世界中，有一种卫星的功能跟节目单非常相似。

在编写本书时，还没有任何业余卫星在地球同步轨道上运行。从地球上看来，在这种轨道上运行的卫星是静止的。它们一天 24 小时都呆在同一地方，方位非常确定。你只需把天线对准卫星就可与其通信，家庭卫星电视系统就很好地体现了这一概念。屋顶上的抛物面天线位置从不改变，也不需改变，它们所对准的卫星永远都呆在同一位置。

然而，业余卫星是在近地轨道或长椭圆形轨道上运行的，长椭圆形轨道可将卫星送入太空深处（超出地球同步卫星所处位置），然后再将它们带回近地轨道。由于地球与卫星的运行速度不同，业余卫星相对于地球的位置不是固定的。相反，它们会从地平线上出现，上升到一定高度后再回落到地平线以下。由于轨道不同，卫星可能出现数小时，也可能只出现几分钟。它们可能一天出现好几次，但每次出现时的最大仰角都不同，轨迹也不同。更让人迷惑的是，尽管可以预计卫星在几天或几周内的运行轨迹，但是其每天出现的时间还是会有变化。

想要接收业余无线卫星的信号，你需要知道它的位置、出现时间以及运行轨迹。换句话说，想要识别这些“运动员”，你就需要一本“节目单”。你要对卫星轨道有一个基本的了解，这里的“节目单”指的是一种计算机程序，它可以分析有关卫星轨道的信息并精确预计卫星的出现时间。

如果你想要了解卫星是如何在其轨道上运行的，请参看附录 A。Martin Davidoff(K2UBC)教授详细阐明了轨道力学。

2.1 轨道种类

虽然人们也在计划将来发射在椭圆形轨道上运行的卫星，但大多数的卫星还是在不同类型的近地轨道上运行。下面简单介绍一下几种最常见的卫星轨道。

斜角轨道是指与地球赤道相交成斜角的轨道，见图 2.1。斜角为 90° 的卫星围绕着两极运转。卫星的斜角越小穿越低纬地区所需时间越长，例如，国际空间站在与地球赤道成大约 50° 的斜角轨道上运行。在斜角轨道上运行的卫星常常会被地球挡住，导致其太阳能电池板不能正常工作，此时必须依靠电池保证其正常运转。由于倾斜角的原因，地球上的某些地方信号质量总是不好，这是因为卫星很少出现在其当地地平线以上，载有业余无线电爱好者的美国航天飞机就是这样。通常航天飞机的轨道倾斜角都很小，因此它很少能够以合适的仰角出现在北美地区的上空。

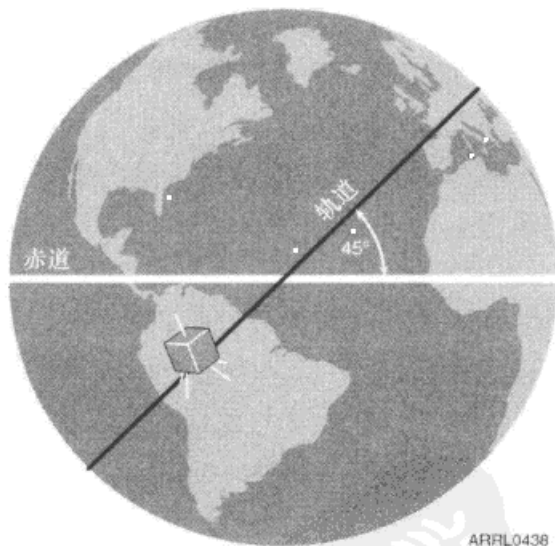


图 2.1 倾斜轨道是沿赤道倾斜的。在这个例子中，这条卫星轨道沿赤道倾斜 45°

在太阳同步轨道上运行的卫星围绕两极运转，见图 2.2。这种轨道有两大好处：卫星每天以几乎相同的时间通过当地；在地球的任何地方卫星每天都至少以极高的高度出现一次。OSCAR51 就很好地体现了这类卫星的优势。

Dawn-to-Dusk(直译为从黎明到黄昏)轨道是太阳同步轨道的一种, 区别在于这种轨道上运行的卫星大部分时间都能接受到日照。OSCAR27 就在此类轨道上运行(见图 2.3)。

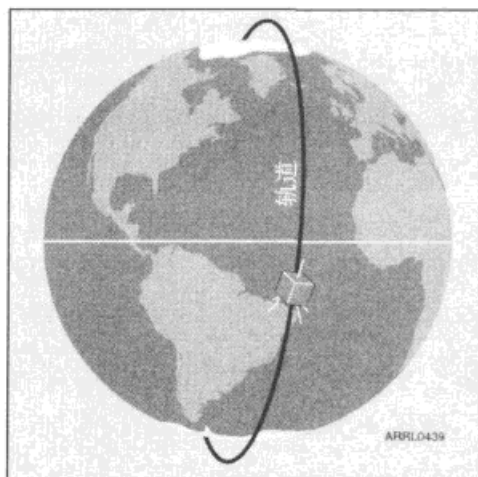


图 2.2 太阳同步轨道使卫星穿越地球的南极和北极。在这个轨道上的卫星每天为世界上的每个站点提供至少一次的高仰角经过

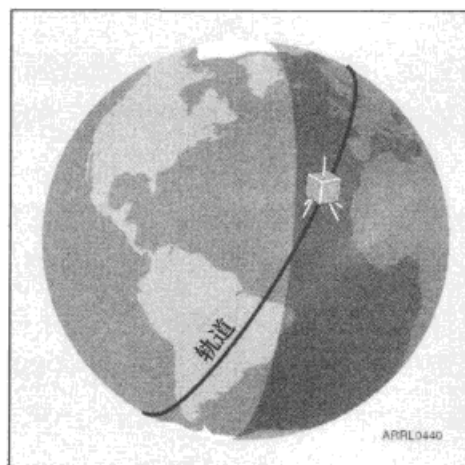


图 2.3 从黎明到黄昏轨道是太阳同步模式的一种, 但是它在阳光里待的时间比在阴影里的时间长

高倾角椭圆轨道(见图 2.4)由前苏联开创。这是一种能把卫星带到可行范围内的离地球最远点(远地点)的轨道。从地面上看, 卫星在同一地点停留了数小时, 然后迅速下降并移动(有时可达 1000km)至近地点。此类轨道的一大优势是卫星在远地点的时候可以“看到”整个半球。业余无线电爱好者可以通过使用高倾角椭圆轨道卫星长时间尽情享受覆盖地球数千平方千米的信号, 另一优势是, 即使是单颗卫星也能很容易地覆盖全球大多数 HAM 的区域。相反, 3 颗(互相连接的)地球同步卫星才能持久地提供覆盖全球的信号。在编写本书时, 还没有可用的高倾角椭圆轨道卫星。然而, 几年之内情况可能会有所好转。

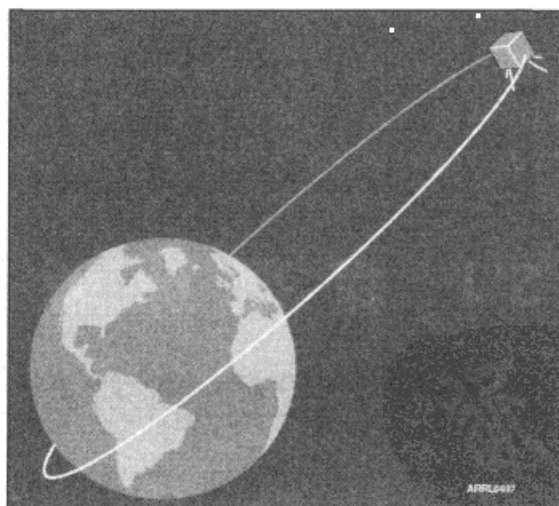


图 2.4 莫尔尼亚轨道是一种椭圆轨道, 它将卫星引向远离地球的太空(远地点)。对地球上的观测者来说, 卫星在远地点时会空中停留几小时, 然后它会向地球方向疾驶, 通常会在 1000km 高处掠过地球(近地点)

卫星足迹

想要知道卫星的观测面积，就必须了解卫星“足迹”这一概念。卫星足迹泛指地表在任何时候都能被卫星天线系统“照亮”的地区，也可理解为各接收站之间可通过卫星彼此通信的地区。

足迹常常是不断移动的，除非涉及的是地球同步卫星。由于卫星所处高度不同，足迹大小也极为不同。低轨道的国际空间站的足迹直径大约有 600km。相反，高轨道的 OSCAR52 的足迹直径几乎可达 1500km，参看图 2.5 中的卫星足迹。能接收到信号的时间取决于接收站在卫星足迹中所呆的时间。此时间以 min 计算，如果涉及的是高倾角椭圆轨道卫星的话，以小时计算。

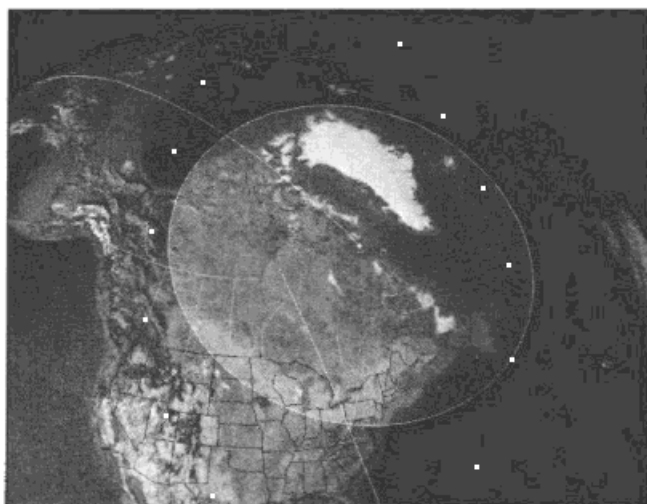


图 2.5 这个图像显示 OSCAR 52 的圆形足迹，它由 Nova 卫星跟踪软件描绘。
这个足迹显示了在任何时间内对卫星可见的地球区域

另外还要注意，由于使用的天线不同，卫星足迹的大小甚至形状也会不同。即使在高轨道运行，波束宽度窄的的高指向性天线的卫星足迹也会很小。然而，业余卫星并非如此。

2.2 了解你的方位

想要追踪业余卫星并与之通信，首先必须精确了解你的位置以及预计的卫星轨迹相对于你所在地的方向。

现在确定所在地的经纬度坐标比过去容易多了。如果有全球定位系统（GPS）接收器的话，几乎瞬间就可以了解自己的坐标。只需将 GPS 接收器拿到户外（或窗边），等它接收到足够的信息时就可确定你所在地的纬度和经度。

如果没有 GPS 接收器，互联网也是不错的选择。网上有大量的地图导航网站，输入你所在的街道地址就可看到一张标有你所在地纬度和经度的地图。

例如，www.maporma.com 上的 Maporama，只需进入“地图”部分，然后点击查询，一张标有你所在地的地图就会出现。地图下方还有所在地的纬度和经度。见图 2.6。

那么，需要多精确呢？如果你的卫星接收站计划使用可旋转指向性波束天线的话，越精确越好。这种天线通够聚焦发送和接收的信号（因此信号范围也很小），所以必须确保天线的指向准确无误。卫星追踪软件会确定这一指向，但其准确度取决于它必须首先知道你的所在位置。

另外，如果你使用的是全向天线或固定不动的指向性天线，对精确度的要求就没有那么严格。事实上，只需要知道最邻近城市的纬度和经度就足够了。你可以从 www.usgs.gov 美国地质调查局网站上获取这一信息。寻找地理名字信息系统的链接。

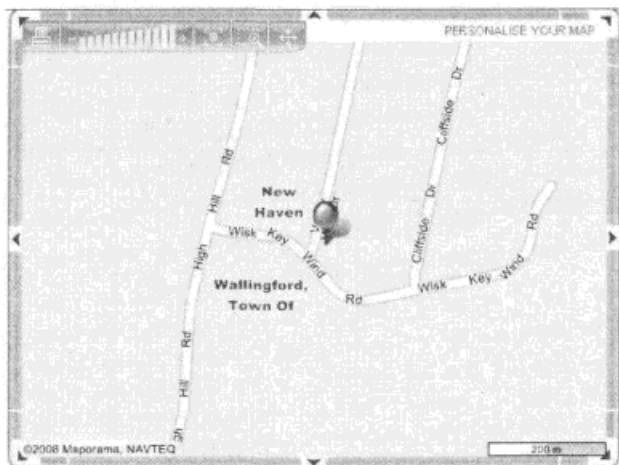


图 2.6 (a) www.maporama.com 可以将任何邮编转化为带有经度和纬度的地图

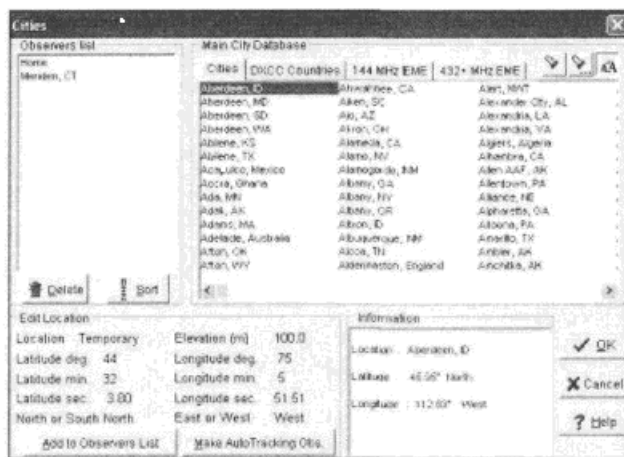


图 2.6 (b) 一些卫星跟踪程序允许你从城市列表中选择你的地点

2.2.1 方位角和仰角

除了需要精确的接收站的位置外，还有一件重要的事是你的方向（或天线方向）。卫星追踪软件会以方位角和仰角的形式显示卫星的位置。方位角指的是天线在接收信号时的指向与正北方向所成的夹角，见图 2.7。设想你的卫星接收站处于一个被分成 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的巨大圆形罗盘中，北面是 0° （事实上也是 360° ），东面是 90° ，西面是 270° 。如果卫星追踪软件指示需把天线指向 130° ，那么你就要把天线指向东南方向。

让我们看一个更为详细的例子。图 2.8 中接收站处于圆罗盘中心。卫星追踪系统显示，国际空间站（ISS）会在国际协调时间 03:57:30 的时候出现在接收站所在地的地平线上空。

该系统会这样描述卫星的方位角：

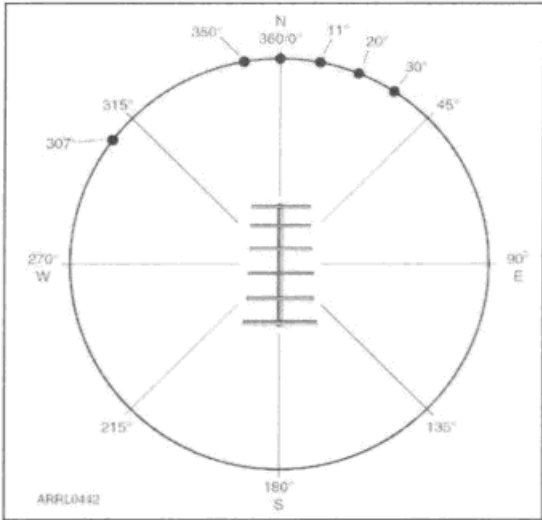


图 2.7 方位角指参照正北方、以角度为单位、是天线接收卫星信号的指向。 想象你的站点处于一个巨大罗盘的正中央，这个罗盘的圆被划为 0～360 个角度，北方是 0°（实际上它也是 360°），东方是 90°，南方是 180° 而西方是 270°

表 2.1

时间	方位角 (°)
03:57	307
03:58	350
03:59	0
04:00	11
04:01	20
04:02	30

如果你把这些方位角都标到图 2.8 中，你会发现卫星将会水平运行。卫星从西北方向出现，然后迅速向东移动，最后下降到接收站所在地的地平线下大约 30° 的地方。如果有旋转天线的话，你会发现，在卫星刚刚出现的时候天线需要指向西北方向，然后在追踪的过程中由 307° 方向慢慢指向 0° 方向，最后卫星消失时天线指向 30° 方向。

追踪卫星还需要另外一种量度——仰角。仰角以度为单位，以地表为基准，是卫星接收站与卫星间所成的角度，见图 2.9。是卫星与地平线齐平时的仰角为 0°，在正上空的时候为 90°。如果使用的是指向性天线的话，仰角就和方位角一样重要。天线不仅要在卫星的方位角发生变化时对准卫星，还要在卫星在竖直方向移动时上下倾斜来追踪卫星。

许多业余卫星接收站都是用 az/el(方位角 / 仰角) 天线旋转器来调整卫星从空中经过时天线的方位角和仰角。然而 az/el 天线旋转器并不是必须的，设计良好的全向天线即使不改变方向也能提供良好的服务。你甚至还可以使用仰角固定在大约 45° 的指向性天线，水平方

向的转换只需使用常规天线转换器。本书还将详细探讨卫星接收站天线的问题。

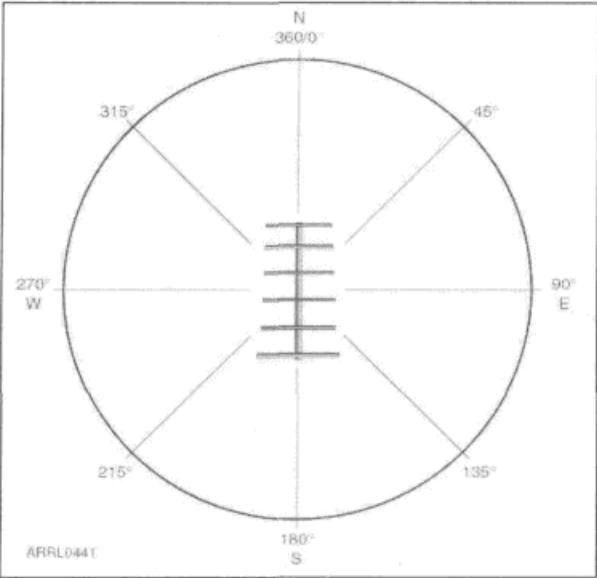


图 2.8 我们假想的国际空间站通过的方位角轨迹

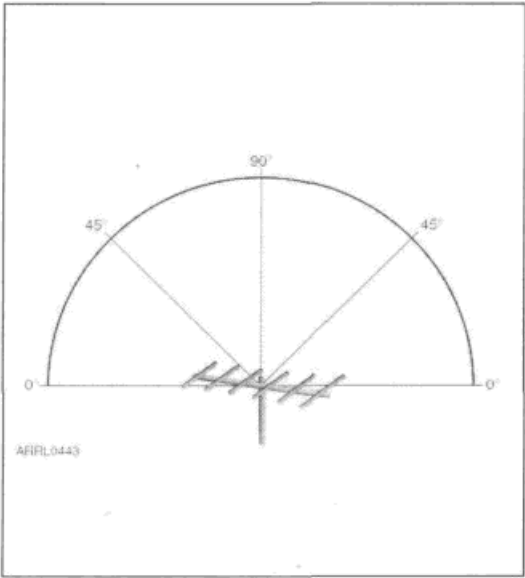


图 2.9 仰角以度为单位，它指你的站点和卫星之间参照地面的角度

即使使用的不是指向性天线，了解一下卫星仰角也是很有好处的。除非在堪萨斯州或者其他较为平坦的地区，否则你很难从各方向都能清楚地看到地平线。地平线可能会被山脉、丘陵或建筑物挡住。如果要从卫星接收微波信号的话，树的射频吸收性也会成为很大的障碍。

这些物体的高度形成了那个方位的无线电地平线（见图 2.10）。如果你的北方有一座山且它与你所在的接收站成 25° 仰角，那么你的无线电地平线就始于 25° 方向。由于在卫星上升到 25° 仰角以前无法与之通信，所以在看卫星追踪软件提供的信息时必须把这点也考虑进去。软件可能会显示卫星在北方出现时，可获取信号的时间为国际协调时间 0200，但在卫星上升到 25° 仰角前并不能收到信号。通常（对于低轨卫星更是如此）卫星的仰角越大越好，对吗？对了一半。记住：卫星相对于你的所在地高速运行，它离你越近（仰角越大）多普勒效应越严重。

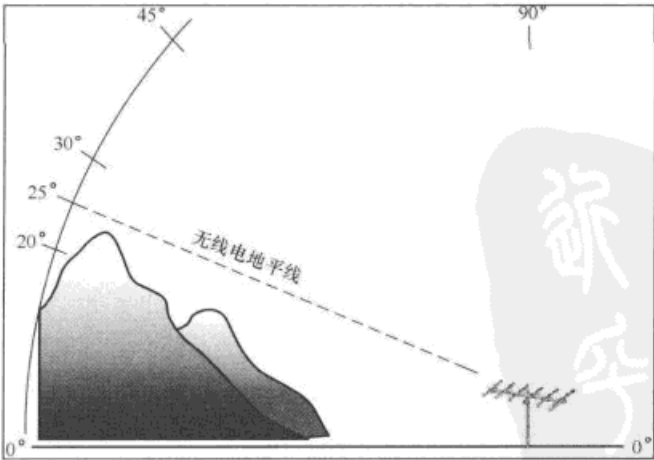


图 2.10 除非你有非常清晰的地平线，否则你的无线电地平线都是由你和卫星之间的任何障碍物的最大张角来决定的

多普勒效应

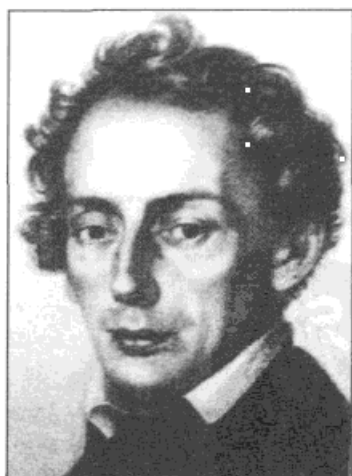
多普勒效应是以科学家 Christian Doppler 的名字命名的，是指观测者在向波源移动时观测到的波（这里指无线电波）的频率及波长的变化，见图 2.11。由于多普勒效应，卫星靠近你的所在地时，其信号频率会升高，而远离时则会降低。

然而不管卫星是在靠近还是在远离，其发送的信号频率并没有发生实质变化。参照图 2.12 中棒球的例子，其原理是很相似的。投球手每秒钟投一个球，且球从投球区到达本垒板也需要一秒钟。如果投球手是固定不动的，那么接球手每秒钟都能接到一个球。这是因为球的速度及投球手和接球手间的距离都没有发生变化。这恰恰是地球同步卫星的情况。

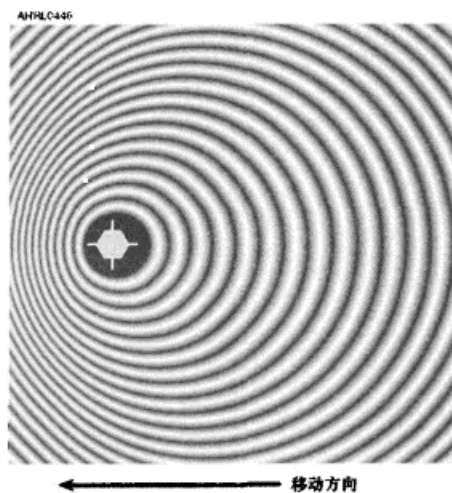
然而，如果投球手向接球手靠近的话，球从投球手到达接球手的时间就会减少。从接球手的角度看，尽管投球手仍以每秒一球地速度投球，但球到达的时间却减少了。

把球看成是波峰，把球与球间的距离看成是波长。当投球手靠近接球手时，波长会减小而当投球手远离接球手时，波长会变长。波长越短频率越高，所以看起来频率在升高。相反，波长变长时（卫星远离地面），频率则下降。

我们身边每天都在上演着多普勒效应。火车在靠近其附近的高速公路时，你听到的汽笛声音音调会高很多；当火车经过并驶离时，其汽笛的音调变得越来越低直至消失。卫星也是一样，只不过改变的是无线电波的频率。



(a) Christian Doppler; 他解释了为什么声波和无线电波会随着物体的接近和远去而改变的原因



(b) 你可以认为多普勒效应是当卫星向你靠近时无线电波“挤在一起”造成的。结果是，它的信号频率会在靠近你时高，而在远离你时降低

图 2.11

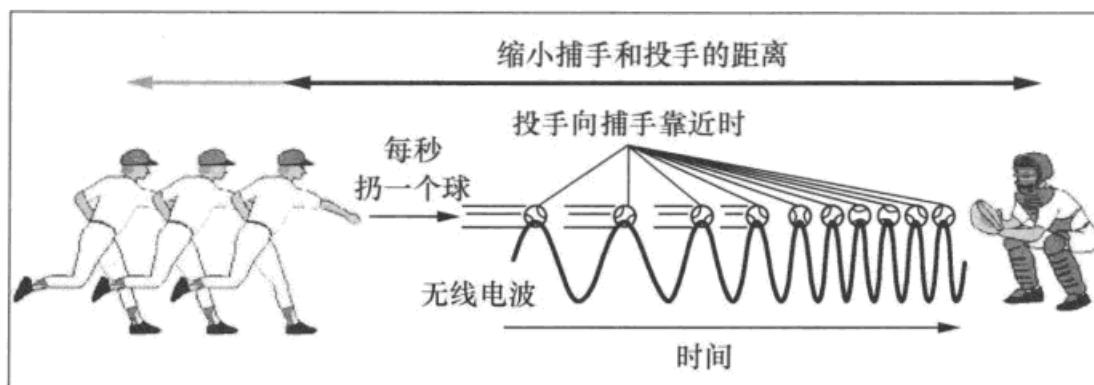


图 2.12 一个理解多普勒效应的方法是想象一个棒球投手每秒向你扔一个球。球要花 1s 从投手土垒到达本垒上。如果投手是静止的，捕手就会每秒接到一个球。这是因为球速和投手与捕手之间的距离都保持不变。然而，假如投手开始向捕手靠近，球到达捕手的时间就会缩短。如果你将球想象成波的顶点，而球和球的距离是波长，那么当投手向捕手靠近时波长就会减小。由于较短的波长会带来较高的频率，所以频率也会增加。相反的，当波长增加时，频率下降

从实际出发，由于多普勒效应对频率的影响非常显著，因此卫星以高仰角出现时会有很大的问题。这意味着你必须不断调整无线电收发信机来校正其频率。这样会让你显得像在玩杂耍一样，因为同时你还要与卫星通信并调整天线。所以许多人都用计算机控制天线或无线电收发信机，又或者两个都用计算机控制。我们将在后面的章节中讨论解决多普勒效应的操作问题。现在我们只需明白，尽管高仰角时信号强度最好，但由于多普勒效应，高仰角也会产生许多问题。

2.2.2 综合方位角和仰角的组合

让我们以前面提到过的国际空间站为例，结合方位角和仰角来模拟真实的卫星追踪。我们加入了接收站的位置和传输频率，以便在操作中观察多普勒效应。

表 2.2

时 间	方位角 (°)	仰角 (°)	频率 (MHz)
03:57	307	0	145.804
03:58	350	10	145.803
03:59	0	18	145.800
04:00	11	9	145.798
04:01	20	5	145.797
04:02	30	0	145.795

在这个例子当中，国际空间站在国际协调时间 03:59 的时候上升到了 18° 仰角的位置，然后又在国际协调时间 04:02 的时候降到了地平面下，这是卫星一次低仰角的出现。如果北方空

中 18° 仰角的方向有东西挡住的话，那么在卫星的这次出现中就无法与之通信。国际空间站以 145.800MHz 的频率发射信号，你会发现由多普勒效应引起的频率变化非常小。这是因为空间站与你所处位置之间的距离并没有发生太大的变化。切记：是你与卫星的相对运动加深了多普勒效应。

现在让我们改变一下，举一个高仰角的例子。

表 2.3

时间	方位角 ($^\circ$)	仰角 ($^\circ$)	频率 (MHz)
03:57	307	0	145.810
03:58	350	10	145.808
03:59	0	25	145.806
04:00	11	40	145.804
04:01	20	65	145.802
04:02	30	80	145.800
04:03	36	60	145.798
04:04	41	45	145.796
04:05	50	29	145.794
04:06	55	15	145.792
04:07	59	0	145.790

国际空间站这一次出现标示在了图 2.13 中。在这个图解中，我们把方位角和仰角综合到了一起，制作了一个以接收站为中心的“雷达屏幕”。

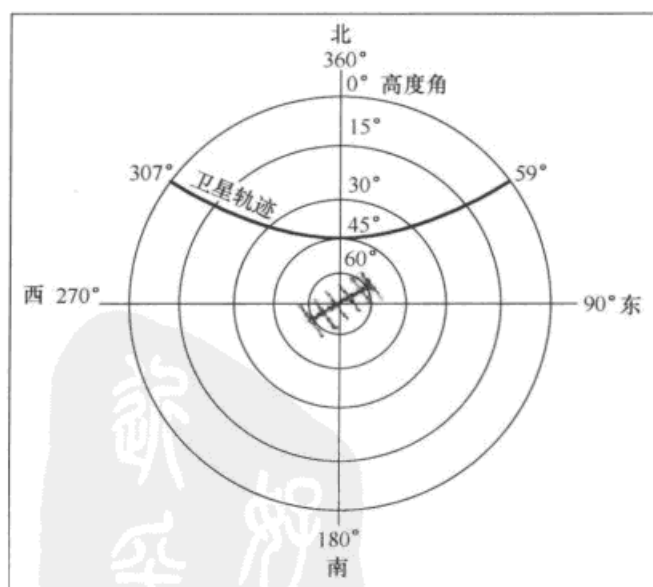


图 2.13 在这个图中，我们将方位角和仰角结合起来，创造出一个“雷达屏”，它显示了卫星从你的站点经过的情形。同心圆表示的是仰角最外层的圆即表示 0° 仰角，上面也标出了方位角

在这个例子中有几个有趣的事情要注意一下。你有没有发现这次的高仰角出现（在国际

协调时间 04:02 的时候达到最高点 80°), 从出现到消失的时间要比低仰角出现时长。低仰角出现仅仅持续了 5min, 而高仰角出现足足持续了 10min。很明显, 当物体上升到空中的高仰角位置时, 其可观测时间会变长。

另外, 你有没有注意到多普勒效应对国际空间站的对地发射频率的影响? 开始时这一频率为 145.810MHz, 在最大仰角时降低到了 145.800MHz, 然后继续下降直至空间站降到地平线以下时的 145.790MHz。在这个过程中, 频率改变了 20kHz。

2.3 卫星跟踪软件

许多卫星跟踪软件都是为 Windows、Mac 和 Linux 编写的。表 2.4 中列出了几种使用较为广泛的软件。在计算机刚开始用于跟踪业余卫星时, 它们只能提供最基本的信息: 何时能与卫星通信 (AOS 获取信号), 卫星会上升到多高的高度以及卫星何时会下降到地平线以下 (LOS 信号消失)。现在我们对跟踪系统的要求非常之高。现代的应用仍然提供基本信息, 但通常也提供更多的服务, 例如:

- ★ 卫星工作计划时间。包括可以使用哪台转发器和无线电信标。
- ★ 预计的使用频率的频率偏置 (多普勒频移)。
- ★ 卫星天线相对于地面接收站的方向以及两者之间的距离。
- ★ 地球上的哪些地区可以与卫星通信; 也就是说, 哪些地区在可 QSO 范围内。
- ★ 卫星是被太阳照射还是被地球遮住。有些卫星只有在阳光照射的地带才能工作。
- ★ 下次经过某地是什么时候。
- ★ 数据可在不同的时间间隔更新, 比如每分钟更新一次, 甚至每秒钟更新一次。

许多应用程序还有更多的功能。有些可以控制天线旋转器, 使定向天线自动保持对准目标卫星的状态。另外一些应用程序还可以控制无线电收发信机, 使其自动校正由多普勒频移引起的频率变化。

表 2.4 一些卫星跟踪软件的链接

名 称	来 源	操 作 系 统	电 台 控 制	天 线 控 制
Nova	www.amsat.org (store)	Windows	是	否
SCRAP	www.amsat.org (store)	Windows	是	否
SatPC32	www.amsat.org (store)	Windows	否	否
SatScape	www.satscape.co.uk/classic.html	Windows	否	否
MacDoppler	www.dogparksoftware.com/ MacDoppler.html	Mac OS	否	否
Ham Radio Deluxe	hrd.ham-radio.ch	Windows	否	是
Predict	www.qsl.net/kd2bd/predict.html	Linux	是	否
WinOrbit	www.sat-net.com/winorbit/	Windows	是	是

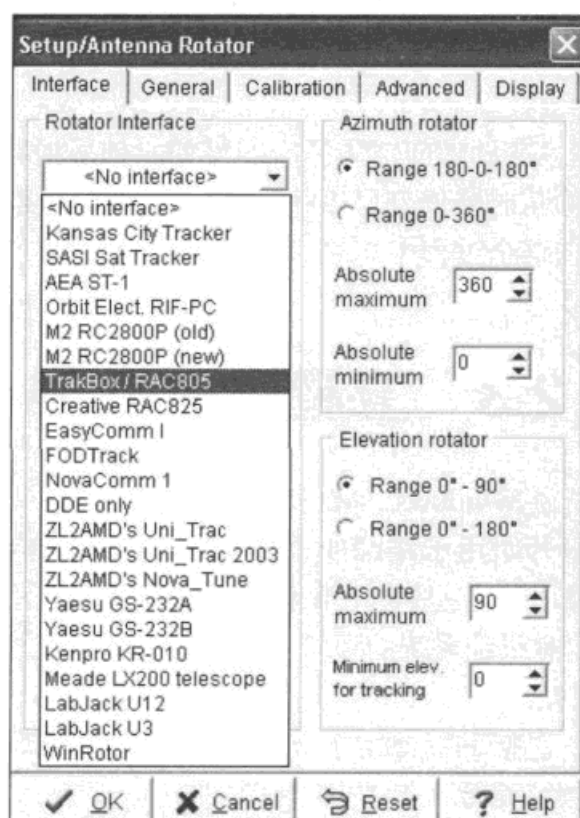


图 2.14 Nova 软件中天线旋转控制界面

PREDICT: Multi-Satellite Tracking Mode

PREDICT Real-Time Multi-Tracking Mode

Current Date/Time: Mon 29Oct07 18:21:18

Satellite	Az	El	LatN	LonW	Range	Satellite	Az	El	LatN	LonW	Range
ISS (ZA-)	103	-82	-40	322	12976 N	NO-44	217	-39	-35	170	9180 D
STS 120	105	-83	-41	321	12989 N	NO-41	100	-58	-24	15	11155 D
OSCAR-7	120	-80	-45	325	14021 D	PACSAT	57	-30	38	30	7749 D
OSCAR-11	84	-72	-28	341	12825 D	NOAA-14	206	-81	-53	290	13446 D
OSCAR-27	51	-16	51	57	5464 D	NOAA-15	289	-21	34	192	6303 D
OSCAR-29	276	-65	-22	252	12809 N	NOAA-17	178	+9	18	122	2488 D
OSCAR-32	218	-16	-3	149	5522 D						
OSCAR-50	159	-85	-47	307	13313 D						
OSCAR-51	36	-50	27	342	10801 N						
OSCAR-57	355	-11	78	139	4792 D						
OSCAR-58	170	+7	19	119	2345 D						
V0-52	181	-12	-1	123	4487 D						

Upcoming Passes

Sun					Moon
-----					-----
152.74 Az	NO-44 on Mon 29Oct07 18:38:35 UTC				301.11 Az
+34.35 El	OSCAR-50 on Mon 29Oct07 19:07:07 UTC				+6.13 El
	NOAA-14 on Mon 29Oct07 19:08:31 UTC				

图 2.15 Linux 下的卫星预测软件界面

额外增加卫星会产生更多的问题：哪些卫星在有效范围之内？需要多久才能与卫星通信？在不久的将来会不会有更多的卫星进入到有效范围之内等。当然，潜在的好处也是很明显的。对于研发者来说，开发跟踪软件的真正挑战不是解决基础的物理问题，而是决定应襄

括哪些信息以及如何以有效的形式将其呈现出来。使用者的偏好、专业程度以及需求的不同更是体现了这一问题的难度。有些人偏爱图表形式的信息，比如显示卫星实时位置的地图；其他人可能偏爱表格式数据，比如一张列有某一卫星在未来几天内出现在有效范围内的时间清单。

在一些网站上也能进行在线跟踪，这样可以省去软件购买及安装时的一切麻烦。然而，目前可用的在线跟踪网站并不像软件那样强大和灵活。这类网站中有一个很有趣的网站，是由 AMSAT-NA 负责的，你可以在 www.amsat.org/amsat-new/tools/predict 找到它。

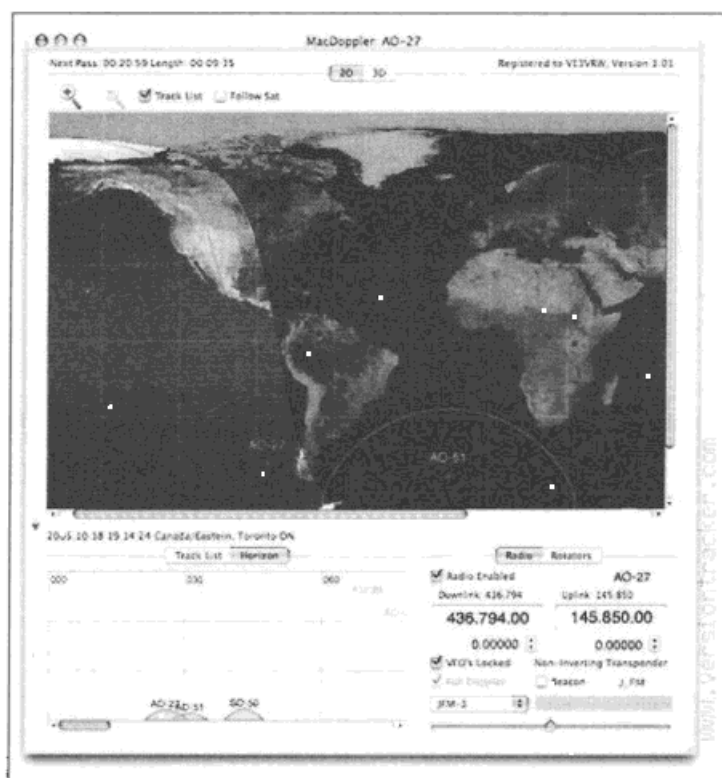


图 2.16 如果你有一台苹果电脑，你就可以用 MacDoppler 追踪卫星

2.3.1 开始使用软件

卫星软件种类繁多且不断更新换代。任何作者都不会莽撞地在书中详细阐述操作说明，因为这类书在出版后一个月就会过时。

即便如此，卫星跟踪软件也有许多方面几乎从未改变。比如，我们讨论如何精确确定所在地的位置才有利于卫星跟踪。然后就是把信息输入选定的程序。

大多数的软件会要求你输入接收站点的地点，有些软件用“观测者”来表示该地点。尖端的软件还会为你提供一份城市名称清单，从中选取一个就可迅速输入你的地点（对大多数

应用程序来说，最临近你所在地点的城市地址就足够了)，其他一些软件会要求输入经纬度坐标。

在输入经纬度（及其他角度）时，要确定计算机适用的是六十进制角度标志法还是十进制角度标志法，使用屏幕提示的标志法通常会很管用。另外你还要明白所使用的单位和标点的使用惯例，例如，格林尼治（0° 经度）以西的地方，经度可能用负数表示，南半球的纬度可能也用负数表示。度数的小数部分对跟踪数据的影响很小，只需把它们忽略即可。

日期也能引起很大的麻烦。先输入日还是先输入月？11 月（November）可以缩写成 Nov 吗，还是必须以阿拉伯数字 11 的形式输入？数字间可以用冒号、破折号或者斜线隔开吗？还有许多其他的问题。再重申一次，屏幕上的提示是最重要的线索。例如，提示说“输入日期（DD:MM:YY）”，如果你想输入 2010 年 2 月 9 日，那么就要尽可能准确地遵守提示所给的格式，输入 09:02:10。

输入数字时永远都不要用逗号。例如，半长轴长为 20 243.51km，那么在输入时只需输入 20243.51，省略空格及单位。熟悉各种软件的不同要求需要一段时间，但你很快就可应对自如。

输入经纬度坐标后，工作还没有结束。软件“知道了”你的所在地，但还不知道你想跟踪的卫星的所在地。只有拥有一套最新的“轨道要素”，软件才能计算出卫星的位置。

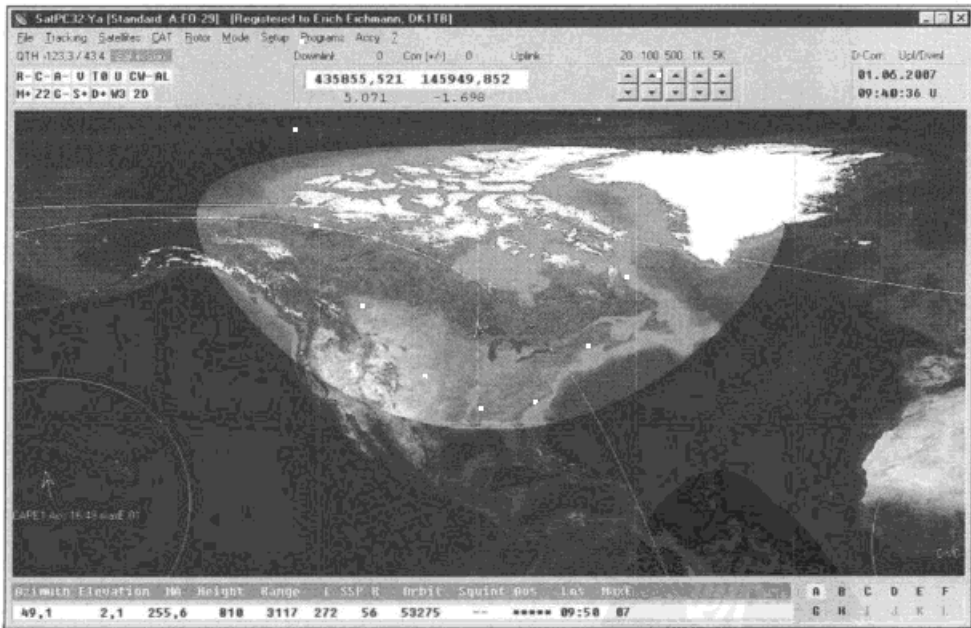


图 2.17 最受欢迎的 Sat32pc 预测软件

2.3.2 轨道要素（也称为轨道根数——编者注）

轨道要素是 6 组数字的组合，用来详尽地描述卫星在某一特定时间的轨道。尽管科学家

们可能偶尔使用不同的组合，无线电爱好者却总是使用开普勒轨道要素，或者简称为 Keps (Kepler 发现了一些关于 17 世纪行星运动的有趣的事情)。

这些轨道要素源于对每个行星轨道运动的仔细观察。通过使用精密雷达和高灵敏的光学技术，北美防空司令部 (NORAD) 非常精确全面地记录了地球轨道的几乎任何一部分。他们定期将该信息的不涉密部分透露给美国国家航空航天局 (NASA) 并公布于众。每颗卫星的信息单独成册，用数据精确描述了过去北美防空司令部如何观测绕地卫星在精确的时间地点的运行情况。

我们不需要了解轨道力学 (开普勒定律) 的复杂细节。软件只需使用 NASA 所公布的轨道要素信息就足够了。这些信息描述了卫星 “那时” 的方位，然后分析并预测其 “现在” 的方位。“现在” 是相对于你输入到软件里的接收站的时间和地点而言的。

轨道要素通常还包括额外的数据 (卫星跟踪软件可能使用这一数据，也可能不使用)，这些信息常以 2 种方式出现 (见表 2.5 和表 2.6)。

表 2.5 关于 AO-27 卫星的美国航空航天局的数据实例

AQ-27	
1	22825U 93061C 08024.00479406-00000064 00000-0-86594-5 0 8811
2	22825 098.3635 349.6253 0008378 336.4256 023.6532 14.29228459747030

表 2.6 AMSAT 的详细元件列表范例

卫星名称	AO-51
星历编号	28375
要素获取时间	08024.16334624
要素编号	14
倾角	098.0868 deg
升交点赤经	056.7785 deg
偏心率	0.0083024
近地点幅角	232.8417 deg
平近点角	126.5166 deg
平均运动	14.40594707 rev/day
衰减率	7.0e-08 rev/day^2
在轨总圈数	18752
校验和	310

让我们用较易理解的 AMSAT 形式一行一行地解释其意义。

前 2 项用于识别卫星。第 1 行是非正式的卫星名称，第 2 行星历编号是 NASA 指定的正式身份认证。

下一项要素获取时间，明确指出了轨道要素的计算时间。这个数字由 2 部分组成，小数点左边的部分表示年和月，右边的部分（精确地）表示当天的时间，例如，96 325.465 598 表示的是 1996 年第 325 天，时间为这天的 .465 598。

再下一项要素编号，它是确定信息来源的参考，例如 199 表示由 AMSAT 发行的编号为 199 的参数集。此信息是可选的。

下面几条是主要的几个轨道要素。

倾角表示的是卫星轨道平面相对于地球赤道面的夹角。回想本章前面所讲的内容，卫星的轨道倾角越大，飞离赤道所需时间越长。

RNAN（右升交点赤经）详细说明卫星轨道平面相对于恒星的方向。

离心率描述的是轨道椭圆的形状，你可能会回想起前面讲到的高倾角椭圆形轨道。这些轨道都不是正圆形。离心率的值也为了了解卫星的轨道形状提供了一些粗略的信息。离心率越接近 0，卫星轨道就越偏向于圆形，相反，离心率接近 1 的话意味着该卫星的轨道更近似椭圆形（可能是高倾角椭圆形轨道）。许多高倾角椭圆形轨道的离心率都在 0.6 ~ 0.7 范围内。

近地点幅角描述的是卫星近地点在其轨道上的方位。卫星在此点时离地球最近，近地点幅角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间时表示该卫星在靠近远地点，在 $180^\circ \sim 360^\circ$ 之间时表示卫星在靠近近地点。本书稍后将详细说明。

平均运动详细说明卫星每天的公转次数。这一参数间接提供了有关椭圆形轨道尺寸的信息。

衰减率被应用于尖端的跟踪模式中，用来研究地球大气层的摩擦阻力对卫星轨道的影响。我们也可认为它是平均运动的变化速度、是平均运动的一阶导数或者摩擦系数。尽管衰减率对地球大气层的科学研究及对重返大气层的卫星的识别来说是一个很重要的参数，但它对业余无线卫星的日常追踪的影响却微乎其微。如果你的程序需要摩擦系数的话，输入其提供的数字即可。如果轨道要素集不包括这类信息的话，输入 0——这对结果的影响可以忽略。通常在输入此数字时，你可以以小数形式输入，也可以以科学计数法形式输入，例如，数字 -0.000 000 39（小数形式）也可输入为 $-3.9\text{e-}7$ （科学计数法）。

$\text{e-}7$ 表示 10 的负 7 次方（或 10 的负 7 次幂）。实际上 $\text{e-}7$ 只表示把前面数字的小数点向左挪 7 位。若这个对你来说太难以理解，那么你只需记住在大多数情况下输入 0 就可以了。

在轨总圈数是用来表示轨道数的另一术语。这里的数据不会影响到追踪的数据，所以即使不同的轨道要素集所提供的同一天同一时间的数据是不同的也不必担心。

校验和是由数据发送方建立的。该数据用于数据接收方用来检测数据传输过程中某种类型的错误。此数据与卫星轨道没有任何关联。

早期的卫星追踪软件中，轨道要素只能由手动输入。这种输入过程既费时又冒险。如果输入的数据不准确，得到的预测结果也会相当不准确。

现在，大多数的卫星跟踪软件都已提高了这一过程的效率。一种改良后的输入方法就是在 AMSAT-NA 网站 www.amsat.org 上获取最新的轨道要素。你可以以文本文件的格式将轨道要素下载下来，然后指示卫星跟踪软件阅读该文件并创建数据库。另外一个不错的网站是 celestrak.com。你使用的软件或许能够阅读 AMSAT 或 NASA 的文件。

如果你幸运地拥有尖端的跟踪软件，比如 Nova，并且可以进入互联网的话，程序会自动进入网络空间，下载并运行 Kelps(开普勒轨道要素)，你只需点击一下鼠标即可完成。有些程序甚至不需提示就可以常规形式下载最新的开普勒轨道要素。

更新开普勒轨道要素

那么你需要多久更新一次轨道要素呢？这要取决于几个方面，包括卫星轨道、地面接收站的位置、是否对信号捕获 / 消失时的简版 DX windows 感兴趣、是否自动校正多普勒效应等。由于这么多方面都有影响，所以不可能有一个单一的答案，但可以参看一些相关的信息和典型情况，可能会有指引性作用。注意，轨道要素的使用寿命是从要素获取时间开始计算的，而不是从它的接收时间开始的。

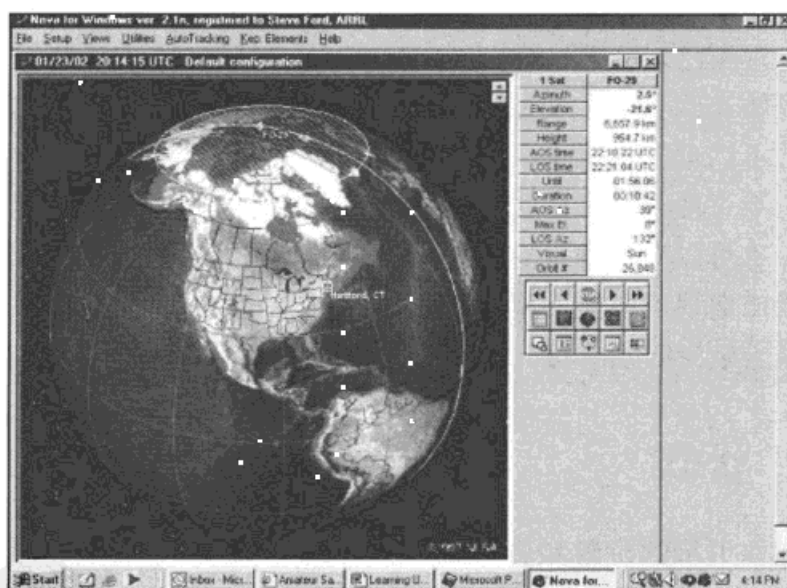


图 2.18 Nova 是可用的最复杂的卫星追踪程序

分配轨道要素的政府机构使用的数学算法可以很好地预测十天内的情况。结果之一就是由大气摩擦产生的周期性或偶发性小摄动的长期影响、磁暴以及其他一些方面不是被夸大就是没有引起足够的重视。在刚开始使用 OSCAR 软件的时候（20 世纪 70 年代中期），业余爱好者为低轨卫星创建了自己的平滑轨道要素，这些参数使小摄动达到了平衡。在许多情况下，这些非专业参数的长期效果比今天的高度精确值还要好。例如，对于 OSCAR 6、OSCAR 7、OSCAR 8 和早期的 RS 卫星，由业余爱好者计算出的轨道要素被用来做“星历”，这些星

历在 12 个月长的时期里非常准确，误差仅为几分钟，Phase III 卫星的情况也大抵如此。在 OSCAR13 还在运行的时候，G3RUH 会定期为卫星控制计算出一组平滑轨道要素。这些参数可精确地预测一年之内的情况。

轨道要素目前来源于 AMSAT 和其他一些政府机构（最适合短期预测），我们将主要对此展开讨论。对于使用低增益定向天线或通联低圆形轨道卫星线性转发器的全向天线的地面站来说，如果卫星轨道高于 1000km 的话，精确的轨道要素在 3 ~ 6 个月之内重设效果都会很好。对于轨道高度在 600 ~ 800km 的卫星来说，每 2 个月更新一次参数就足够了。而轨道高度在 600km 以下的卫星，常常每天都要更新。特别要指出的是，国际空间站（ISS）要做许多人员往返工作，所以它经常变换轨道。而且由于 ISS 的轨道相对较低（且 ISS 体积巨大），因此大气阻力对它的影响远大于对其他小卫星的影响。所以在追踪 ISS 时，频繁更新轨道要素需要很谨慎。尤其当 ISS 与定期到来的航天飞机共同工作时更是如此。当然，如果你使用的是高增益窄波束天线或者对窗口感兴趣，又或者使用计算机软件校正多普勒频移的话，你也许会更加想要频繁更新参数。

对于在高倾角椭圆轨道上运行的卫星来说，轨道要素每年至少要更新两三次。然而，如果卫星在近地点的运行较为重要的话，就需要每个月或每 2 个月更新一次。当然，这里提到的所有标准都只是建议而已，不同的情况下，标准也会不同。除了从属于 ISS 的轨道派遣外，大气阻力是低轨卫星轨道改变的主要原因。当太阳处于不活跃期时，我们可以很好地预测大气的平均情况，因此可以把阻力考虑其中。但当太阳处于活跃期时，大气的组成可在短时间内发生极大的变化，不可能再考虑阻力，这对于我们来说非常不利。只有当阻力的影响很小并且相对不重要时，才可以准确地把它并入跟踪模式中。但当阻力很大时，我们并不能很精确地去模拟它。在经过建议的时间间隔更新轨道参数时，切记要在太阳黑子最多的时候缩短这一间隔，在太阳黑子最少时延长这一间隔。

2.3.3 卫星的“状态”

软件不仅能告诉你卫星的位置和到达时间，有些卫星，尤其是在高倾角椭圆轨道上运行的多转发器卫星，使用操作计划一览表来决定在哪些时候用哪台转发器和天线。这些“状态”信息是根据平均近点角来决定的。

这并不像听起来那么复杂。“近点角”只是表示角度的另一个略复杂的术语。宇航员按照传统把轨道分成 360 个平均近点角单元，经过每个单元所需时间都相同。鉴于普通微处理器的结构，把轨道分成等时的 256 个部分更方便，业余无线电爱好者把这些称为平均近点角或者状态值单元。通过每一部分所需的时间等于卫星周期除以 256 后所得的时间，例如 OSCAR 13 的平均近点角单元大约为 2.68min，其平均近点角为 0° （轨道始点）和 256° （轨道终点）的时候，卫星处于近地点（最低点）。平均近点角为 128° 时，卫星处于远地点（最高点），见图 2.20。

由于业余无线电爱好者和宇航员使用“平均近点角”的方式稍有不同，因此有时会让人怀疑到底实用的是哪一个系统。但任何疑虑都很微小并且很容易解决。大多数 OSCAR 的实时平均近点角遥测和操作一览表都使用 256 的系统。术语“状态值”从未有大于 256 的数字出现的事实是很重要的提示。通常为业余无线电爱好者设计的计算机跟踪软件使用传统的天文标记法。确定这种情况非常容易，因为平均近点角一栏中会包括 257 ~ 360 范围内的项目。

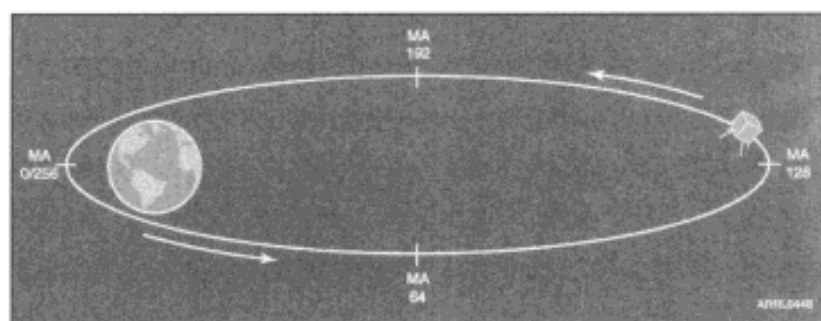


图 2.19 平近点角 (MA) 将每个轨道分为 256 个时间相等的部分。业余无线电爱好者将其称为“平近点角”或者“状态值”单元，每个单元就是卫星的周期除以 256。举例来说，OSCAR 13 的一个平近点角是 2.68min。

在卫星的近地点（最低点）有 MA 0（轨道的开始）和 MA 256（轨道的终点）。

在 MA 128（轨道的中点）处卫星处于远地点（最高点）

如果卫星使用的是以平均近点角为基础的操作表的话，该操作表会被公布到的 AMSAT-NA 网站 www.amsat.org 上（在编写本书的时候，还没有任何使用此类操作表的业余无线卫星，但当计划的卫星进入轨道时情况会有所好转）。如果你使用的追踪软件较为先进的话，程序可能会允许输入该通联计划表，然后它会自动告诉你在给定的时间里哪个操作是有效的。如果你整个下午都要操作通联卫星的话，这会带来极大的便利。

每隔几个月就要调整卫星的方向来校正其朝向阳光的角度，这时就要修改一下通联计划表。下面就是一个典型的 OSCAR 13 的通联计划表，包括其向上行（发射）和下行（接收）的频率波段要求。

Off: from MA 0 until MA 49

Mode U/V (uplink on 70 cm/downlink on 2 meters): on from MA 50 until MA 128

Mode U/S (uplink on 70 cm/downlink on 2.4 GHz): on from MA 129 until MA 159

Mode U/V (uplink on 70 cm/downlink on 2 meters): on from MA 160 until MA 255

斜视角

软件能帮你解决的另一个难题就是斜视角的问题。斜视角描述的是卫星（比如 Phase III）的指向性天线相对于地面站的指向问题，斜视角为 0° 到 180° 不等。 0° 斜视角意味着天线直接指向你，此时的通联效果非常好（见图 2.21）。斜视角在 20° 以上时，信号强度开始下降并且被称为“自旋调制”的振幅波动也会变得很明显，它会扰乱卫星的上行和下行信号。

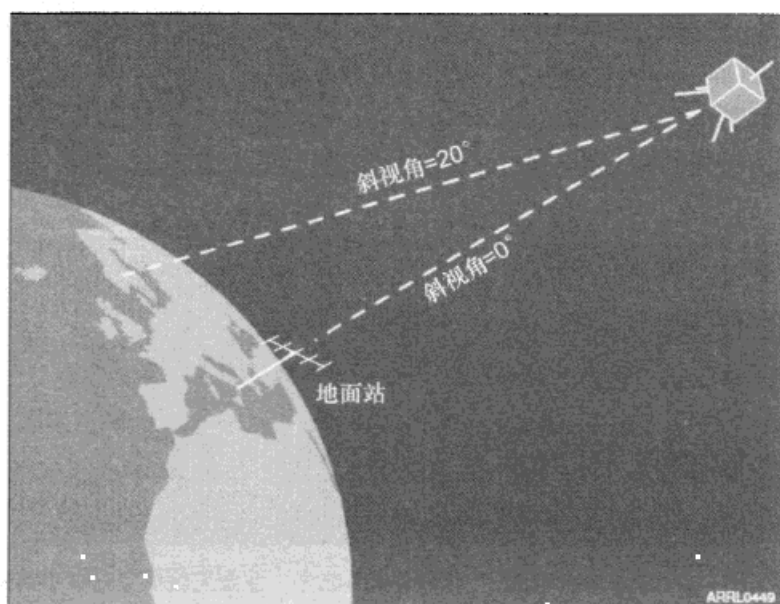


图 2.20 斜视角描述了在卫星（例如 Phase III 的卫星）上的天线指向你的站点的角度。斜视角可以从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

斜视角为 0° 意味着卫星天线直接指向你，这意味着可以得到相当好的连接。当斜视角超过 20° 时信号水平开始下降

带有计算斜视角的程序需要与卫星方向和飞行姿态有关的信息。通常这些信息可以从提供基本轨道要素和直接接收卫星遥测数据来获得。需要的参数是轨道纬度和轨道经度，也可称它们为 BLAT 和 BLON 或者 ALAT 和 ALON（这里 A 表示“姿势”）。

提供斜视角信息的程序也许还提供预计信号强度。通常通过一个很简单的预测模型就能算出预计信号强度值。该模型把卫星的天线方向、斜视角以及有效范围都考虑在内了。对于 Phase III 卫星，该模型会以其在正上空远地点且正好指向你时为 0dB 为基准点。轨道上任何一点的预计信号强度可能高于 (+) 或者低于 (-) 此基准点。

对于大多数的卫星来说都不必考虑斜视角的问题，它只是伴随高轨道卫星的一个参数，因为高轨道卫星使用的是指向性天线。依据平均近点角操作卫星时要先确定卫星的天线对准了你的所在地。选对了软件，你能提前知晓这一情况。

卫星无线电中继这个概念的提出通常归功于亚瑟·C. 克拉克。1945年版的《无线电世界》刊载了他的文章《地球外中继——火箭上的电台能提供全球无线电信号覆盖么?》。文中他提出了这样一个可能：基于太空的无线电中继站运行于距地心约 42 164km 的环赤道轨道上，即平均海平面以上 35787km (22237 英里)，运行周期与地球自转周期相同。在这样的轨道上，这个地球同步中继可以“看到”地球的很大部分（几乎是整个半球）。因为速度与地球自转一致，这个中继看起来每天 24 小时都固定于空中的同一点。它能够接收向它发射的信号，并即时把这些信号转发到它覆盖范围内的任何角落。

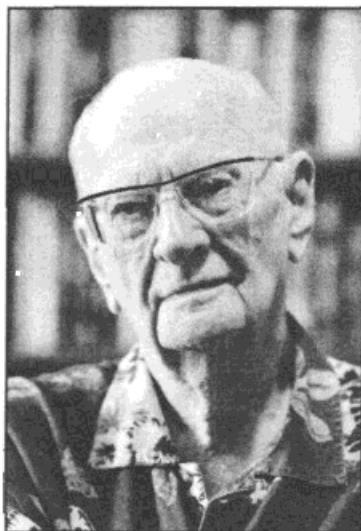


图 3.1 亚瑟·C. 克拉克是预言绕地球运行的无线电中继站能提供全球通信的先驱之一

仅仅不到 20 年，亚瑟·C. 克拉克的预言就成为了现实。现今有数以百计的卫星运行在地球同步轨道上，这条轨道也常被称为“克拉克带”，以表示对他的尊敬。另有数以百计的卫星或运行于近地轨道，或运行于高倾角椭圆轨道，这条轨道既能到达深入太空的远地点，也会掠过距地球仅几千千米的近地点。这些卫星中的一些投入了科学应用，比如太空探索或气象观测。哈勃空间望远镜大概是最知名的科学卫星之一，其他的卫星则被用于政府和军事活动。尽管 GPS（全球定位系统）卫星的功能在民用领域极受欢迎，但它们其实是军事航天器。

然而，与亚瑟·克拉克原先的预见一致，绝大部分的卫星依旧要中继信号，把信息从地球的一点传送到另一点。尽管存在高成本和高风险，卫星依旧是我们创造出的最高效的通信平台。从一开始，卫星就采用了甚高频、超高频和微波通信来传输惊人数量的模拟及数字信息，这要比短波无线电的传输能力大上几个数量级。不同于地面短波无线电通信，卫星不需要巨大的天线或笨重的供电系统。并且，卫星通信不受电离层传播变化无常的影响。

本章中我们将讨论业余无线电卫星所采用的通信系统的类型。这些系统，放大了规模后，同样用在商用卫星上。理解卫星通信系统，是我们从业余卫星“队伍”中获取最大效用和乐趣的关键。为了便于讨论，最简单的方法是把典型的卫星通信系统分为 3 个部分：信标发射机、遥控链路和转发器。

3.1 信标发射机

业余卫星信标发射机通常具备几个功能。在“遥测模式”下，信标传送星上系统的信息（太阳能电池面板电流、各节点温度、电池状况等）；在“通信模式”下，信标可以用来存储并发送无线电信号；在任何模式下，信标都可以用来跟踪，用来测量电波传播，以及用作参数已知的参考信号，来测试地面站的信号接收设备。业余爱好者们历年来使用过几种遥测编码方法。从用户的角度看，每种方法具备不同的数据传输率，同时地面站所需解码设备的复杂程度也不相同。很大程度上来说，这两种因素互为取舍。

最早的业余卫星使用简单的 CW 遥测信标，信息采用莫尔斯码传输。例如 OSCAR 1 卫星，它通过改变 CW 中“HI”的发送速度来传送温度信息。莫尔斯码遥测在随后的卫星中变得更加先进。由于莫尔斯码信息非常易于解码，使得采用这种模式的 OSCAR 6、7、8 卫星（以及绝大多数 RS 卫星上）对教育工作者及业余科学家来说非常有价值。解码只需要 1 个接收机、1 张纸和 1 支铅笔！编码限制在纯数字格式，通常每分钟 25 或 50 个数字（大约每分钟 10 ~ 20 个字），这使得未经训练的人可以较快地学会如何解码传输内容。也正是由于这个原因，至今一些业余无线电卫星仍在使用莫尔斯码。

“最早的业余卫星使用简单的 CW 遥测信标机，信息采用莫尔斯码传输。”

数字数据信标最早出现在 20 世纪 70 年代的卫星上，例如 OSCAR 7。这些早期的信标采

3.2 信 标 设 计

设备精良的地面站会根据所需的信噪比来选择发射功率级别。过度的杀伤力（过大的发射功率）只会导致供给卫星其他子系统的能量减小，可靠性降低，还可能导致与星上其他电子系统的兼容性问题。在 146 和 435MHz 频段上，低轨卫星信标的典型发射功率为 40 ~ 100mW，高轨卫星为 0.5 ~ 1W。信标和卫星所有其他子系统一样，高能效至关重要。Phase III 型航天器更倾向于使用两个信标机：一个高功率的工程信标、在轨道远地点使用全向无线工作时，主要用于（早期变轨阶段或紧急情况）；另一个为不间断工作的主信标。

由于遥测系统是监测航天器健康状态的关键分析工具，航天器通常会装载不同频率的各种冗余信标设备以增进可靠性，这种做法有很多好处。OSCAR 5 和 6 上的信标机曾经失效，但因为两颗卫星都装载了备用信标机，任务均未受严重影响，信标输出功率机的信标机通常是遥测系统采样的据之一。

3.3 遥 控 链 路

经授权的业余无线电爱好者的地面站，在配备所需设备后，可以对 OSCAR 卫星进行控制。第一颗具备遥控链路的 OSCAR 卫星是 OSCAR 5。OSCAR 5 ~ 8 只能对非常有限的指令做出应答。近来，由星载计算机控制的航天器能通过遥控链路接收卫星运行程控指令。因此，具有很高的可操作性。由于以下原因，卫星必须具备可控制性。首先，这是相关法律对卫星业余业务航天器的要求。根据法规，在无线电发射机发生故障导致对其他业务的有害干扰时，要能够关闭发射机。其次，如果不能按时为星载计算机上传控制指令，则卫星将不能够进行初始变轨，以及进行随后为保持 Phase III 型卫星的“健康”运行所需的高度调整。

尽管现今复杂的航天器极其依赖我们通过控制通道向该卫星上传指令件，但对于相对简单的卫星来说，遥控链路的存在也仍旧是决定成败的关键。举一个例子，通过持续传输控制信号，使得一颗几乎没法工作（连续自动关机）的 OSCAR 6 卫星变得稳定可靠。通过控制系统，地面站可以关闭有故障的子系统，根据用户需求调整运转安排，打开或关闭子系统等。

控制系统还用在关键的维护工作中，用来启动需要定期调整的各种星载姿态控制系统。调整航天器与太阳的相对姿态有助于控制其内部的工作温度，还能够判断有多少阳光照射在航天器的太阳能电池上。后者直接决定在太阳光下有多少能量可以用于各个星载系统（包括信标机

和转发器), 以及多少能量可用来给航天器上的电池充电, 以供卫星在黑暗中运行时使用。更不必说, 航天器的“在轨能源致算”是一项需要地面站长期监视并通过控制系统来调整的关键任务。

遥控地面站由热心的志愿者建造并操作。尽管遥控信道频率、密码和指令格式是保密的, 但那些参与业余无线电卫星组织 (AMSAT) 相关项目的地面站可以获得这些资料。

3.4 转发器

转发器是卫星中继信号的核心。目前有 3 种类型的转发器。

3.4.1 “弯管”转发器

弯管转发器从功能上来说是最简单的转发器设计。它在一个频率上接收信号并同时在另一个频率上重新传输该信号。这个名字的来源是形容它像个 U 型管一样, 一头捕获物品并从另一头把它送回原来的地方 (见图 3.3)。

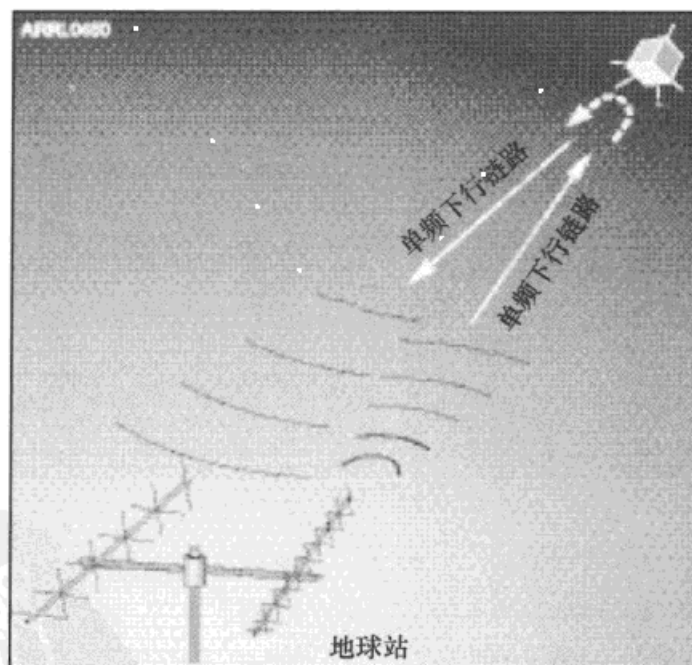


图 3.3 弯管转发器得名于它的工作方式。它接收上行信号并即时通过下行信号转发回来。弯管转发器最常见于主要功能是调频信号转发器的卫星上

地面调频转发器是一种典型的弯管转发器。地面转发器监听一个频率并在另一个频率上转发，通常（但不一定）是在相同的频段内。得益于位于高处的天线系统、高灵敏度的接收机和可观的输出功率，地面转发器可以把调频对讲机或车载电台的信号覆盖扩展到几百甚至几千平方英里。

弯管转发器的主要优势在于，它可以很容易地与普通的业余无线电调频收发信机兼容。你可以使用用于本地调频中继通信的收发信机来通过 AMSAT-DSCAR 51 和 AMRAD-OSCAR 27 卫星的转发器通信通过这些卫星经常可以听到车载电台甚至手持的信号。

解决弯管转发器问题的方法是使卫星能同时中继多个信号。

与同时只能中继一路信号的弯管转发器不同，线性转发器通过接收无线电频谱的一小段信号，并转换频率，线性地放大信号，然后把那一段频率中的信号完整地发送出去。因此装备线性转发器的卫星能同时中继很多路信号（见图 3.4）。

图 3.4 线性转发器把一段频谱中的所有信号全部转发出去。这样卫星能够同时中继许多会话

输入频率和输出频率命名。比如，一个 146/435MHz 的转发器，输入通带中心位于 146MHz，输出通带中心位于 435MHz。该转发器还可以根据波长命名为：2m/70cm 设备。

然而，为了使线性转发器的规格尽可能简单，卫星爱好者通常用所谓的“模式”称谓来代表转发器规格。在业余卫星运行早期，这些称谓的指定相当随意，和转发器实际使用的频率没有多大关系。幸好业余卫星爱好者们随后就转发器规格达成了一致，这一系列命名规则更加直观。还是以前面的例子来说，2m 频段以字母“V”表示，70cm 频段以字母“U”来表示。这样一来，监听 2m 频段并以 70cm 频段发送的转发器，现在叫做 V/U 转发器，见表 3.1。

表 3.1 卫星转发器波段与模式命名

卫 星 频 带	常见运行模式（上行 / 下行）
10m (29MHz): H	V/H (2m/10m)
2m (145MHz): V	H/V (10m/2m)
70cm (435 MHz): U	U/V (70cm/2m)
23cm (1260MHz): L	V/U (2m/70cm)
13cm (2.4GHz): S	U/S (70cm/13cm)
5cm (5.6GHz): C	U/L (70cm/23cm)
3 cm (10GHz): X	L/S (23cm/13cm)
	L/X (23cm/3cm)
	C/X (5cm/3cm)

转发器设计从很多方面来说与接收机设计相仿。典型输入信号在 10^{-13}W 能量级，输出信号可以达到几瓦。当然主要的区别在于转发器输出射频信号，而接收机输出音频信号。线性转发器简易方框简图见图 3.5。因为几个因素的存在，星载转发器设计比图中所示要更复杂。

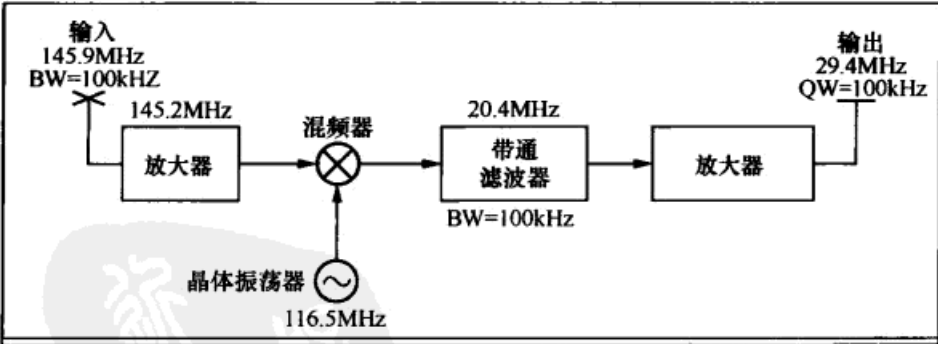


图 3.5 线性转发器方框简图

航天器应用中的一个关键特性是线性放大器的综合效率（RF 输出 /dc 输入）。一旦输出功率达到几瓦，A、AB 以及 B 类放大器的功耗都将难以承受。转发器的发射功率与带宽必须与其他方面和其所要执行的任务相匹配。也就是说，当转发器满载等强度信号输入时，每

一路信号输出都要为地面提供足够的信噪比。仅根据链路计算，以纯理论为基础推算出的数值如果用在实际操作中很容易出问题。多颗卫星试验为 AMSAT 提供了大量的试验数据，从中可以推算出用于不同轨道、带宽、信号强度、频率和天线特性的各种准确参数。

总的来说，采用被动磁稳定和全向天线的低轨卫星（距离地面 300 ~ 1600km）能够在从 29 到 435MHz 频段，使用 1 ~ 10W PEP 功率提供 50 ~ 100kHz 后转发的带宽。采用自旋稳定和适当增益（7 ~ 10dB）天线的高轨卫星（35000km），能够在 146 或 435MHz 频段，以 35W 的 PEP 输出功率在 300kHz 转发带宽上提供令人满意的性能。通常转发器采用频谱倒置以降低多普勒效应。

转发器的动态范围问题与短波接收机大不一样。乍一看卫星转发器要处理的事情挺简单。短波接收机设计要求能够处理强度差在 100dB 左右的输入信号，而低轨卫星所面对的是强度差在 40dB 左右的信号。好的短波接收机过滤掉除所需信号以外的所有其他信号后，进行高增益放大。然而卫星需要同时接纳所有用户，因而最大增益受限于通带中最强信号。

参考最新型转发器设计和航天器能源限制，现在能获取的最大有效动态范围在 25dB 左右。早期卫星上，接收机自动增益控制通常调整到可以容纳信号强度最大的用户。结果，信号强度低于 25dB 的地面站就无法通过卫星有效转发信号，尽管当自动增益控制关闭时，这些地面站的信号是可以传输的。理想状态下，用户应调整上行功率使得卫星上的自动增益永不启动。

“大炮”是个严重问题之一。一个超功率发射的地面站能够瘫痪掉整个线性转发器，经常见到没有经验的操作员，以为调高发射功率能够提升下行信号强度；然而，他所调高的能量只能起到降低其他所有地面站信号强度的作用。在昙花一现的 OSCAR 40 卫星上，设计人员尝试了一种解决“大炮”的革新方案，增加了限幅指示器。限幅指示器的计算机持续监测 10.7MHz 转发器中频通带，当某个上行信号强度超过设定值，计算机在该信号的下行插入一条 CW 信息。这条信息向发射站显示卫星转发器正在过载，并敦促违规发射站降低信号强度直至 CW 信息消失。如果该信号继续过载，或者继续升高至某一预设值，限幅指示器启动陷波滤波器以屏蔽违规发射站的信号。结果证明限幅指示器非常有效。如果你突然在下行信号中听到过载信息，就知道该降低发射功率了，不然就会受到惩罚。

转发器是业余卫星任务的主要载荷，它的可靠性尤其重要。一种提高系统可靠性的方法是配备至少两台转发器，如果一台失效，另外一台可以随时替换。而不使用两台一样的设备也非常重要。

由于大量上行和下行频率的使用，OSCAR 40 卫星的设计团队摒弃了老式的、固定输入输出频段的转发器。在转发器的位置，他们引入了包括接收机前级、发射混频器、功率放大器等设备，并连接到一个共用中频矩阵单元。该中频矩阵工作在 10.7MHz 上，输入输出能量级为 -15dBm，并包含限幅指示器。地面站指挥星载计算机连接一个或多个接收机，以及一个或几个发射机到中频矩阵单元上。卫星运行计划由一个国际性的委员会通过灵活有效的方式来决定，能够适应各种设备失效和性能下降，并能够在卫星短暂的生命周期里满足

用户需求的不断变化。

3.4.3 数字转发器

PACSAT 或 RUDAK 型数字转发器与我们刚才讨论的线性转发器有很大区别。数字转发器解调输入信号。数据可以被存储在卫星上 (PACSAT 邮箱) 或者立即用来生成数字下行信号 (RUDAK 数字中继器)。邮箱服务最适用于低轨卫星, 数字中继器在高轨卫星上最有效。和线性转发器一样, 数字转发器的下行速率是有限的, 设计过程中的关键步骤, 是选择能够最大化下行容量的调制技术和速率。假设数据流类型, 然后选择合适的上行参数。通过对 PACSAT 和 RUDAK 的分析显示, 由于数据冲突的存在, 上行数据容量应该为下行容量的 4~5 倍。

对于 PACSAT 邮箱的运行, 设计者们决定对上行和下行采用相似的速率, 并为 1 条下行链路配备 4 条上行链路。Fuji-OSCAR 12 和 20, 以及 MicroSAT 系列卫星的上下行速率都是 1200bit/s。PACSAT 卫星配备带解调器的调频接收机, 能够接收曼彻斯特数据编码的移频键控上行信号。

要生成合适的上行信号, 地面站需要使用称为终端节点控制器 (TNC) 的分组无线电调制解调器和调频收发信机, 终端节点控制器能够生成曼彻斯特数据编码的上行信号。

PACSAT 下行采用输出功率为 1.5W 或 4W 的二进制相移键控信号。之所以选择这种调制方法, 是因为在给定的功率电平和比特率下, 它的误码率比其他参考方案要低得多。接收下行信号的方法之一是使用单边带接收机, 并把音频输出到一台相移键控解调器上。这里单边带接收机只是作为一台线性降频器, 其他一些方式也能捕获下行信号, 但是目前采用的两种系统都使用上述方法。

“数字转发器解调输入信号。数据可以被存储在卫星上, 或者立即用来生成数字下行信号。”

在 PACSAT 的全盛期, 有几种专门为其设计的终端节点控制器。然而随着 PACSAT 逐渐被淘汰, 这些专用终端节点控制器也从市场上消失了。余下的数字卫星转发器采用 1200bit/s 音频频移键控 (AFSK), 或者 9600bit/s 频移键控进行上下行数字传输。这意味着那些目前用在各种地面设备上的普通分组无线电终端节点控制器, 也可以用在数字卫星上。

抛开 RUDAK 谈论数字转发器显然是不完整的。RUDAK 是自更新数字业余通信转发器的首字母缩写。早期的 RUDAK 系统采用不同方式实现所需的上行和下行速率。OSCAR 13 星载 RUDAK 采用单上行通道, 单下行通道模式, 上行通道速率 2400bit/s, 6 倍于下行通道 (400bit/s)。之所以选择 400bit/s 下行, 是因为这是 20 世纪 70 年代后期以后 Phase III 遥测信号的标准下行速率。能够捕获 Phase III 遥测信号的用户, 在 RUDAK 一开始传输就应该能够捕获它。不幸的是, OSCAR 13 星载的 RUDAK 设备在发射时失效了。

一套名为 RUDAK II 的系统随 RS-14/AO-21 升空, 它实际包含两个设备。其中一个设备

与 OSCAR 13 上的 RUDAK 相似。然而另一个设备称为 RUDAK 新技术实验 (RTX)，是一个采用数字信号处理技术的实验性转发器。它从本质上来说是一个飞行测试台，为将来用在 Phase III 上的新技术做准备。

OSCAR 40 上携带的 RUDAK-U 系统包括两块中央处理器，1 台 153.6kbit/s 的调制解调器，4 台固定的 9600bit/s 调制解调器和 8 台运行于 56kbit/s 速率的数字信号处理调制解调器。新型 RUDAK 系统的最大优势在于其非凡的灵活性。通过数字信号处理技术的采用，RUDAK 能够把自己配置成所需的任何数字系统。如果 OSCAR 40 存活了下来，原计划要用它搭载的 RUDAK 系统在太空中创建一个高容量的数字通信平台。



4

你的卫星通信地面站

王龙 (BA4RX) 译

卫星“地面站”，顾名思义是指在地面上工作的台站。这是你的台站，是你将用于和业余卫星进行通信的台站。有相当多的设备和安装选项供你选择，这取决于你所打算使用的卫星和你想使用的工作模式（调频、单边带、等幅报或数字通信）。在这一章中，我们力争让你对这一系列的选择有所了解。



4.1 天线系统

涉及业余无线电的所有问题同样适用于卫星通信：天线系统是通信台站的最关键部分。如果你想知道如何投资你的台站设备，那么在涉及天线系统时，不要省钱。如果连接到性能很差的天线上，那么价格再昂贵、功能再齐全的收发信机几乎都毫无价值。

当我们在说到“天线系统”时，谈论的不仅仅是天线本身，天线系统包括连接收发信机和天线的馈线，在卫星通联时，还包括前置放大器和天线旋转器。除了本章中关于天线的讨论，你还会在第 6 章中看到几个实用的卫星天线案例。

请记住，为了使用大多数业余卫星，你必须用一个波段发射（上行链路），另一个波段接收（下行链路）。除非你使用的是单一的双波段天线，否则你的卫星通信站至少需要 2 副天线。许多进行卫星通信的爱好者有多个天线，在必要时，可以在不同的上行 / 下行波段组合运行。

4.1.1 天线方向性和增益

所有的天线，即使是最简单的类型，也呈现出定向效果，也就是说从天线发射的电磁波在各个方向上的辐射强度不同。这种在某些方向辐射强度大大高于其他方向的特性叫做天线的方向性。

天线的增益和方向性是密切相关的，很多爱好者认为它们的意思相同。不过方向性是仅仅基于方向图的形状，因此，并没有考虑到实际天线系统中产生的损耗。增益则考虑到这些实际损耗。增益通常用“分贝”来表示，它是实际天线与基准天线的对比，通常基准天线是一个偶极天线或者等向辐射天线。等向辐射天线是一个理论上的天线，如果把它放在假想的球心，那么它将均匀地向球面各处辐射。等向辐射天线是一个明确的标准，因此，它经常用来作为增益测量的对比。

当对比的标准是一个在自由空间里的等向辐射体时，相对于这个全向天线，增益表示为 dB，或者是 dBi。当对比的标准同样也是在自由空间里的偶极天线时，相对这个偶极天线，增益表示为 dBd。天线的方向图被压缩得越大，或者说越聚焦，天线获得的功率增益就越大。这是因为牺牲了其他方向的能量而使能量集中到某一方向的结果。一副天线在某个频率上的天线辐射方向图和增益取决于这副天线的尺寸和形状，以及天线的位置和相对于地球的方位。

在为地面站购买天线时，你一定要谨防广告中关于天线增益的宣传。除非它已经通过与校准的天线进行测试，或者其性能模型通过了天线模型软件的测试，否则其真正的增益几乎

是任何人的猜想。这就是为什么你会很少看到在 ARRL 的 QST 杂志的广告上有天线增益大小。只有当天线制造商提供测量的证据或者模型时，QST 杂志才会刊登天线的增益。

4.1.2 天线的极化

天线的极化取决于天线辐射单元相对于地球的位置。辐射器平行于地球产生水平辐射，而垂直辐射器辐射垂直波（见图 4.1），这些被称为线性极化天线。如果辐射器倾斜于地球，那么它辐射的波既有垂直分量又有水平分量。

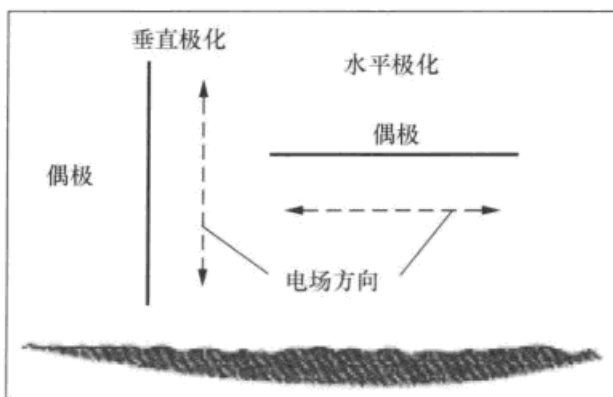


图 4.1 地面上偶极天线的垂直极化和水平极化。极化的方向就是相对于地面最强的电场方向

对于地面甚高频的视距通信，极性匹配非常重要。如果一个电台使用的是水平极化天线，而另一个电台使用垂直极化天线，极化不匹配会造成较大的信号损耗。我们并不担心短波波段的极化匹配，正如短波信号通常那样，当信号通过电离层被反射后，它们的极化总是发生改变，这个有趣的效应被称为法拉第旋转。

极化涉及航天器上的问题是卫星天线的方向相对于你的地面站在不断地变化。当卫星天线的极化和你的天线极化冲突时，经常会导致信号衰减。稍后，你会明白这个问题不仅仅只是卫星特有的麻烦，飞机、汽车和其他移动无线电平台都会遭受同样的影响。幸运的是我们有一个“对策”，这就是圆极化（CP）。圆极化波的波阵面沿它的中心轴线旋转传播，要么顺时针旋转（右手或右旋圆极化），要么逆时针旋转（左手或左旋圆极化），如图 4.2 所示。使用圆极化的好处是能够大大减少极化冲突造成的影响。由于从圆极化天线发出的电磁波旋转通过水平面和垂直面，其产生的结果“消除了”衰减影响，最后产生一个可靠的信号。

这就是说，你的卫星地面站天线不是必须圆极化才行。线性极化天线，无论是水平极化还是垂直极化都完全可以用于卫星通信。有些地面站天线使用倾斜或者交叉的振子混合水平极化和垂直极化分量。调整天线极化的目的是使你的台站具有优势，当你在处理来自太空深处的微弱信号时，这会显得非常重要。不过，尽管圆极化天线使你的台站具有一定的优势，但这不是绝对必要的。

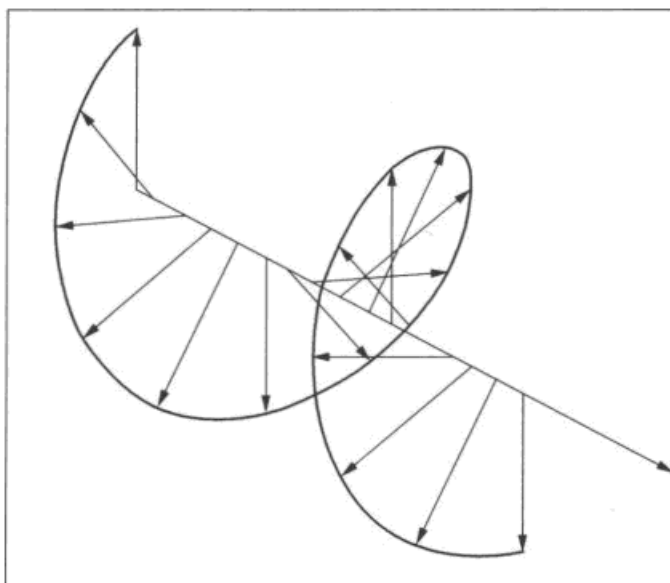


图 4.2 圆极化波阵面沿其中心轴旋转传播，要么是顺时针旋转（右手或右旋圆极化），要么是逆时针（左手或左旋圆极化）

4.1.3 全方向天线

一副理想的全方向天线均匀地发射和接收所有方向的信号。在现实生活中，大多数全方向天线还是有一定的方向性，例如，一根普通的垂直接地天线（见图 4.3）被认为是全方向天线，但当你看图 4.4 时，辐射图并不是如此，在它的顶部正上方纵深范围内为无效区域。当卫星通过这个无效区域时，特别是高仰角通过时，信号急剧变弱。

尽管它们的增益低，但全向天线仍然有吸引力，因为它们在使用时不需要对准目标。这意味着它们不需要机械天线旋转器，这显然会降低地面站的成本和复杂性。和定向天线相比，对于相同的频率，全向天线也更为紧凑。另一方面，它们的低增益在用于低轨道卫星通信时也很实用，低轨道卫星有灵敏的接收机和相对较大功率的发射机。

从技术上来说，任何类型的全向天线都可以用于卫星地面站。爱好者们喜欢用简单的垂直地网天线、J 型天线、“大车轮”天线甚至汽车天线来进行卫星通联。对于一个全方向天线，最佳的效果是具有能够最大限度地减少极化冲突和无效辐射区域的辐射方向图。工程师们

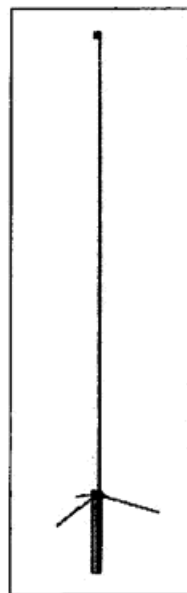


图 4.3 一根普通的直立天线。设计用来作为陆地上 2m 波段通联

从这些问题出发，已经设计了一些专用的全向天线。

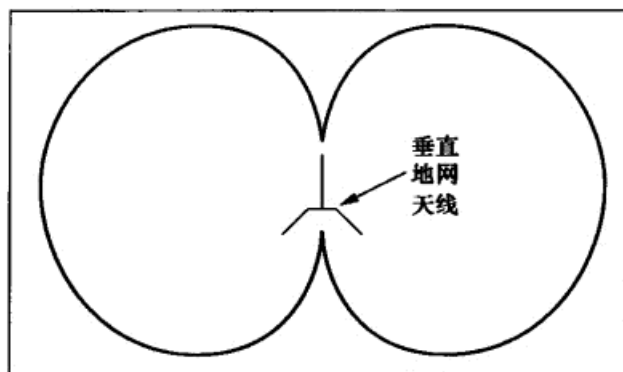


图 4.4 这是垂直天线的简单辐射图。注意，在头顶上方纵深范围内为无效区域

4.1.3.1 打蛋器天线

打蛋器天线是以类似老式厨房的器具而命名的流行设计，如图 4.5 所示。该天线是由 2 个全波长刚性金属丝或管状金属环组成。这 2 个环，每个都有 100Ω 的阻抗。并联时，它们为同轴馈线提供一个理想的 50Ω 的阻抗。这 2 个环互成 90° 接入，这样的结构会产生一个圆极化的辐射图。

在环下，打蛋器天线可以使用一个或者多个无源反射器振子，使辐射图更大幅度地向上调整。这使它成为一副有“增益”的天线，但这个增益是以损失低仰角性能来实现的。对于地平线，打蛋器天线实际上是水平线性极化，随着仰角增加，辐射图越来越变成右旋圆极。经验表明，当反射器振子安装在环正下方时，打蛋器天线表现最佳。

自制打蛋器天线相对比较容易，但也有一些可用的成品天线。在空间受限时，打蛋器天线球形的形状使得天线更加紧凑，这也是它成为吸引人的设计的另一个原因。

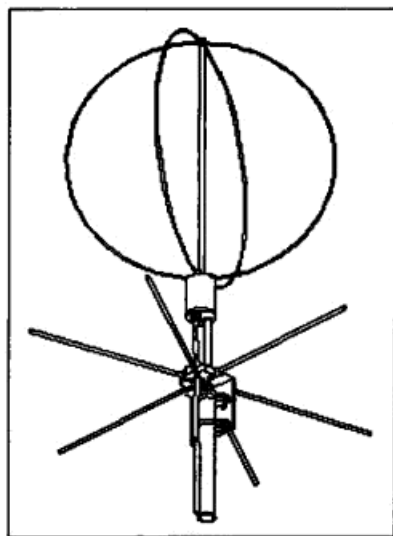


图 4.5 打蛋器天线是以类似老式的厨房器具而命名的流行设计。该天线是由 2 个全波长刚性金属丝或管状金属环组成

4.1.3.2 旋转门天线

最基本的旋转门天线由 2 副水平半波偶极天线在同一个水平面内彼此互成直角安装（像字母 X），其下方有一个反射屏（见图 4.6）。当这 2 副天线被反向 90° 的等大电流激发时，它们典型的 8 字形方向图合并形成一个近似圆形的方向图。

为了在空间通信中获得向上方向的辐射方向图，旋转门天线的底部需要一个反射器。为了获得一个宽幅的辐射图，最好在十字振子和反射器之间保持工作频率 $3/8$ 波长的距离。自制旋转门反射器通常使用在五金店里可以获得的金属窗纱材料（请务必要求是老式的金属纱窗材料，而不是那种涂上聚氯乙烯的玻璃纤维品种）。

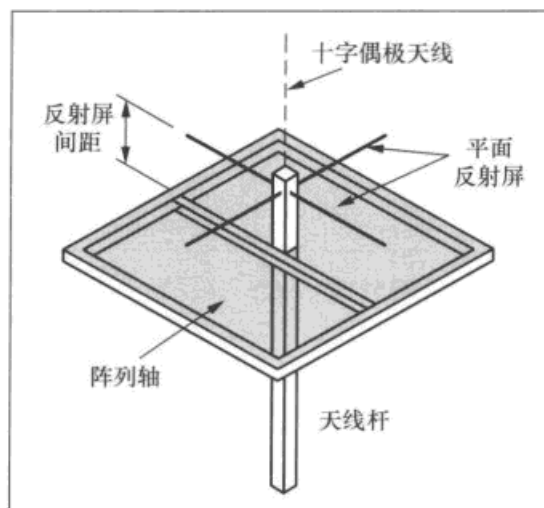


图 4.6 最基本的旋转门天线由 2 副水平半波偶极天线在同一个水平面内彼此互成直角安装（像“十”字形），其下方有一个反射屏

就像它的同类——打蛋器天线一样，旋转门天线也比较容易自制。事实上，自制也许是你旋转门天线的唯一选择，因为很少有成品提供。

4.1.3.3 林登布列（Lindenblad）天线

美国无线电公司的尼尔斯·林登布列（Nils Lindenblad）是林登布列天线的发明者并以他的名字命名。大约在 1940 年，他在为新兴的广播电视（TV）产业从事天线工作。他的想法是采用 4 根偶极振子，每根偶极振子与水平面倾斜 30° ，等距安放在 $1/3$ 波长直径的圆内，每根偶极天线同相等效接入。当所有信号组合在一起时，偶极天线的间距和倾斜角创造出所需要的天线辐射方向图。

几年后，同样是美国无线电公司的乔治·布朗和奥克利·伍德沃德负责解决减少机场和飞机间的无线电链路中信号衰落的问题。这些链路使用线性极化天线，而飞机的飞行经常使机上天线变成正交极化，这经常会造成大量信号丢失。布朗和伍德沃德意识到，在机场使用圆极化天线可以减少或消除这种衰落，所以他们决定尝试林登布列的概念。布朗和伍德沃德设计的天线使用金属管作为偶极振子。

在林登布列天线中，每根偶极振子与一根短的裸线连接，这根裸线也用金属管制成，它起到平衡—不平衡转换器的作用。一根同轴电缆从一端贯穿各自的裸线到另一端，馈电给每根偶极振子。这 4 根同轴馈电电缆在中心部分汇合，在这里它们并行连接，提供一个四路的同相功率分配功能。这个电缆的汇集点连接到另一根电缆，作为阻抗匹配部分，以获得和

50 Ω 阻抗的良好匹配。

布朗和伍德沃德对林登布列天线设计的改进更聪明，工作效果也更好，不过对于一般的爱好者来说很难复制。即便如此，许多卫星运营商都分享这种天线的成功。

造成设计和制造林登布列天线困难的最主要原因是需要四路同相功率分配器。因为我们一般使用 50 Ω 的同轴电缆馈送给天线，所以我们必须以某种方式提供从 50 Ω 的不平衡同轴电缆到 4 根 75 Ω 的平衡的偶极振子负载的阻抗匹配。以前的设计已经使用过折合偶极振子组合、裸线、双芯引线馈电、平衡 - 不平衡转换器和特殊阻抗匹配电缆去设法和 50 Ω 阻抗进行良好的匹配。但是这些方法反过来增加了制作的复杂性和难度。在第 6 章中，你会看到由安东尼奥·蒙泰罗 AA2TX 设计的更简单的林登布列天线（他也提供了你刚才阅读的林登布列天线的一些背景细节），如图 4.7 所示。虽然比打蛋器天线或旋转门天线更复杂，但林登布列天线创造了一个均匀的圆极化模式，在卫星通信应用中更高效。

4.1.3.4 四臂螺旋天线（QHA）

四臂螺旋天线（见图 4.8）在全向卫星天线中排名最好。它是由 4 根等长的导线（丝状）缠绕在螺旋形（螺旋）上组成，每根臂上电流相位两两相差 90° 馈入，其结果是一个近乎完美的圆极化模式。

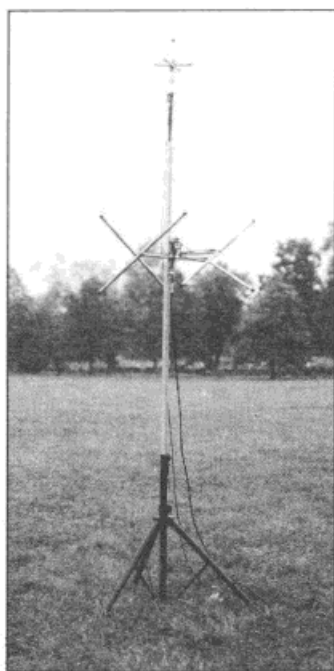


图 4.7 安东尼·奥蒙泰罗 / AA2TX 设计的简易的林登布列天线

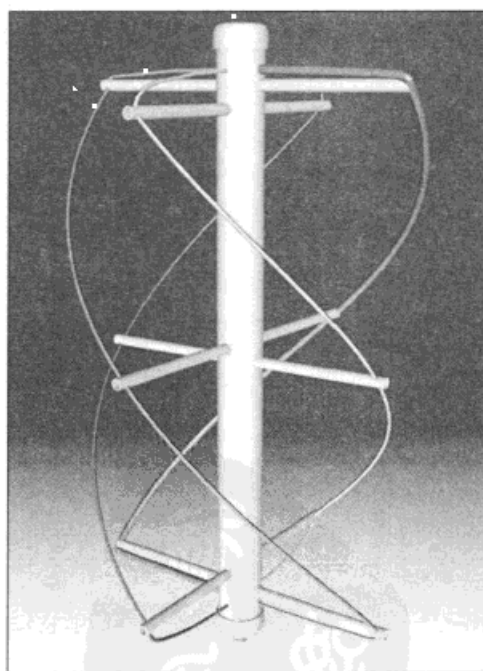


图 4.8 四臂螺旋天线由四根等长的导线（丝状）缠绕在螺旋形（螺旋）上，每根臂上电流相位两两相差 90° 馈入

制作四臂螺旋天线具有挑战性，因为长度和间距必须非常准确（在第 6 章里，你会看到制作这种天线的方案）。即便如此，自制一副四臂螺旋天线可以为你节省一笔可观的经费。

这种天线也有成品供应（海事卫星最喜欢使用这种天线），但可能价格昂贵。

4.1.4 定向天线

正如我们在本章开始所讨论的，增益和方向性是天线的重要指标。这些指标在定向天线中得到充分发挥。事实上，设计定向天线的目的是为了在其轴线上创建一个高度定向的方向图（见图 4.9）。普通的手电筒就是定向天线的合理模型，虽然定向天线的方向图并不如手电筒光束那么汇聚（当然抛物面反射天线与其非常接近）。

定向天线的最主要的优点是有相当好的方向性和增益。当你用于接收来自太空的微弱信号时，你需要尽可能获得所有你能得到的增益。当 Phase III 卫星在远地点，将近 50 000km 外时，必须使用定向天线。定向天线对于低轨小卫星也非常出色，它给你强大、稳定的信号，而这是全向天线很少能达到的。

不过，定向天线的主要缺点也是它的方向性。使用定向天线的目的是为了获得最佳的通信效果，你必须想方设法把天线指向需要通联的卫星。这就需要用手或者电动装置，如我们熟知的天线旋转器来完成。如果你只是简单地将定向天线固定在一个位置，你只能享受到卫星瞬间通过天线方向时的良好信号。旋转器增加了地面站的成本，同时安装也不是个简单的工作。另一方面，有一种方法可以降低旋转器的成本，我们将在后面讨论。

如果你能承受定向天线和旋转器系统的费用，这种投资将永远不会令你后悔。

4.1.4.1 八木天线

八木天线，最初也叫八木 - 宇田天线，是根据两位发明者的名字命名的，二战后深受业余无线电爱好者们的喜爱。这种定向天线由一个偶极振子（驱动振子）和多个紧密耦合的寄生振子（通常是一个反射器和一个或多个引向器）组成，如图 4.11 所示。反射器正好在偶极振子的后面，它比偶极振子长大约 5%。引向器放在偶极振子的前面，由于相位通过反射器相消和引向器的增强，实际产生一个指向性的辐射方向图。八木天线的方向在振子平面上，沿轴垂直于偶极振子，从反射器经过驱动振子，通过引向器引出。

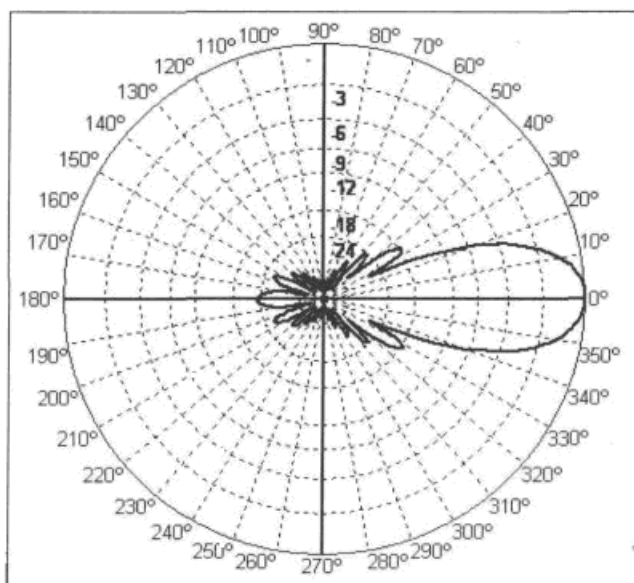


图 4.9 设计定向天线的目的是为了在其轴线上创建一个高度定向的方向图。这个例子展示的是一个高增益八木天线的辐射方向图

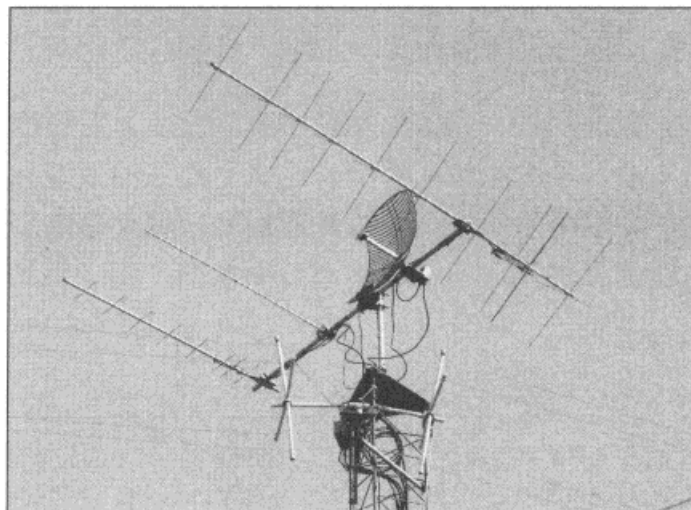


图 4.10 在 ARRL 业余无线电协会总部电台 W1AW 的卫星天线，它包含了 3 副八木天线。
在外面的 2 个分别是用于 2m 和 70cm 的十字八木天线

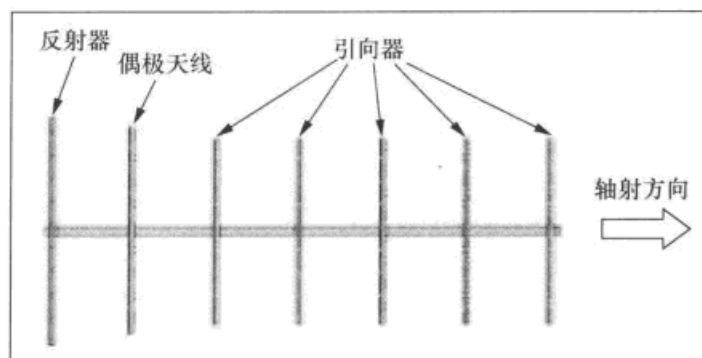


图 4.11 一个 7 单元八木天线的简化框图

八木天线拥有的引向器越多，它的方向性越强，增益越高。这就是为什么你会经常看到长的八木天线，用于地面上 VHF 以上频率。这似乎是说，为了卫星通信，你最好设计使用长八木天线，通常这是正确的。但是，请记住，方向性越好，天线的方向图更汇聚（狭窄）。换句话说，瞄准卫星时天线必须有更高的精确角度。在你的通联目标是一个快速移动的低轨小卫星时，这可能是一个挑战。

你通常看到的八木天线是线性设计的，它们要么是水平极化，要么是垂直极化安装。正如设计时那样，这些相同结构的天线可以成功地用于卫星通信。不过可以通过一些方法来优化它们，以增强它们的有效性能。

八木天线上的偶极振子辐射线性极化信号，但要记住，真正的天线的极化方向依赖于天线相对于地面的方向。如果 2 个八木天线安装在同样的支撑杆上，安放成水平极化和垂直极化，用正确的相位差（ 90° ）结合起来，结果是一个圆极化模式。因为天线上两列振子的电场值相同，从发射机里发出的功率将平分为这 2 个电场。从另一角度来考虑，发射机发出的

功率被这 2 副天线平分，因此，从它们各自方向的平面内单独来看，每副天线的增益会降低 3dB，这种设计被称为十字八木天线。

2 副天线之间相位必须相差 90° ，最简单的方法是通过 2 根馈线来获得。一根馈线部分的长度比另一根馈线长 $1/4\lambda$ ，如图 4.12A 所示。这 2 个独立的馈线并联接入一根公共的传输线然后接入电台。然而，在这个系统中有个头疼的问题，假使忽略十字天线之间的耦合，并联部分传送给公共传输线的阻抗只是它们单独部分阻抗的一半（当天线阵列中天线之间相互耦合时，这并不准确）。

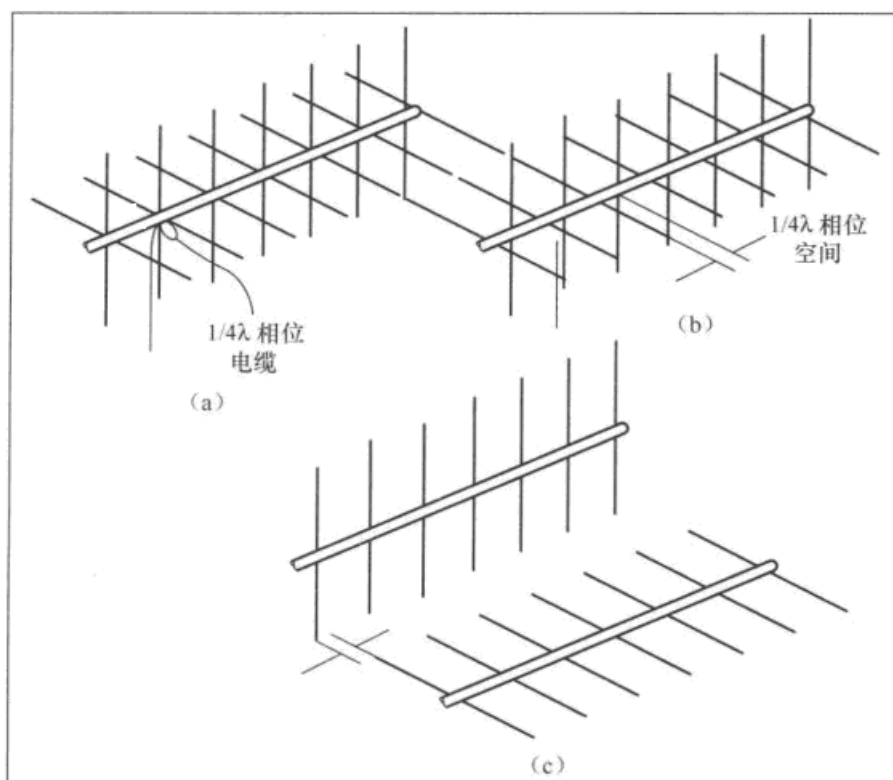


图 4.12 圆极化八木天线的演变。十字八木天线最简单的结构——天线 A，是通过馈入两个异相 90° 的驱动振子馈入，产生圆极化辐射。天线 B 有同相馈入的驱动振子，但安装的位置比其他天线要靠前 $1/4\lambda$ 。天线 C 通过使用单独的主杆提供椭圆（圆）极化，同组中的单元和其他单元相互垂直安装，并且比其他单元靠前 $1/4\lambda$ 。

另一种获得圆极化的方法是使用长度相等的馈线，放置一副天线在比另一副天线超前 $1/4$ 波长的位置，这对偏移安装的十字交叉天线如图 4.12B 所示。等长度环形馈线接入的优点是能够以相同的阻抗接入到馈电端，如图 4.13 所示。为了获得一幅极化方向可切换的偏移安装型八木天线，你可以用如图 4.14 所示的连接，虽然你必须通过增加继电器和连接器并补偿额外的相位误差。

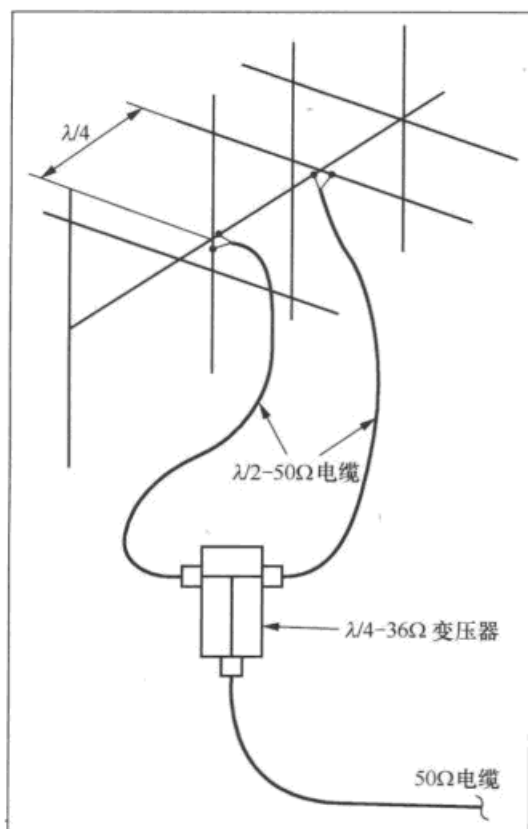


图 4.13 等长馈线的优势是馈送到公共馈线的阻抗相等，
如图所示，是一个固定的环状馈电结构

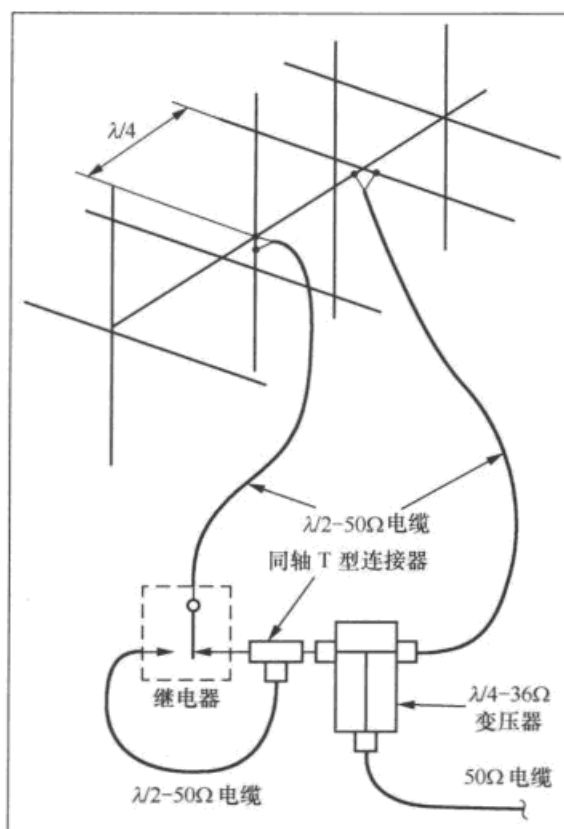


图 4.14 偏移安装的十字交叉圆极化八木天线，可以
切换天线极化方向

图 4.12C 展示了一种 2 个独立现成的八木天线互相垂直安装的常用方法。这 2 个八木天线可以位置偏移 $1/4$ 波长安装，并联馈电。也可以安装成没有位置偏移，移相 90° 馈电，装在 2 根独立的主杆上，这 2 种安装方式都不能产生真正的圆极化，反而，在这样的系统中，结果是椭圆极化。图 4.15 所示是这种安装在 2 根主杆上的椭圆极化八木天线。

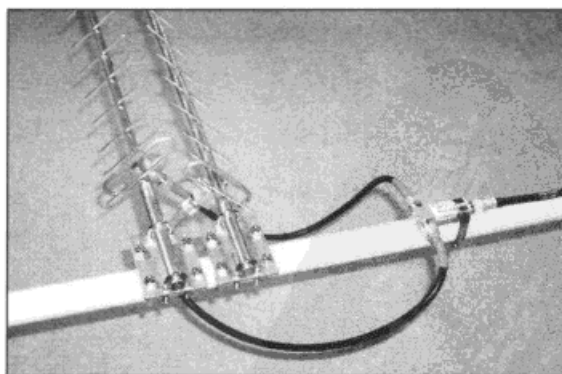


图 4.15 一个固定极化方向的位置偏移安装十字交叉圆极化八木
天线。在这个例子中展示的是一对安装在升降杆上的
L 波段 (1 269MHz) 的美国 M² 公司出品的 23CM22EZA 天线

到目前为止，我们一直在讨论设计单波段十字八木天线去获取圆极化或近似圆极化。如果圆极化不是最高标准，你可能要考虑将 2 个独立波段的线性八木天线安放在同一个主杆上的双波段八木天线。虽然这种设计不会产生圆极化，但它部分弥补了在便利和经济方面的不足。图 4.15 是最常见的 2m 和 70cm 波段的八木天线安装在同一根主杆上的组合天线设计。你可以用 2 根独立的馈线，或者用单根馈线连接电台并通过一个天线共用器将两根天线的信号分开。利用一根单独的 2m/70cm 的八木天线，你可以享受几乎所有可利用的业余卫星。对于精打细算的爱好者来说，购买一根这样的天线很有吸引力。

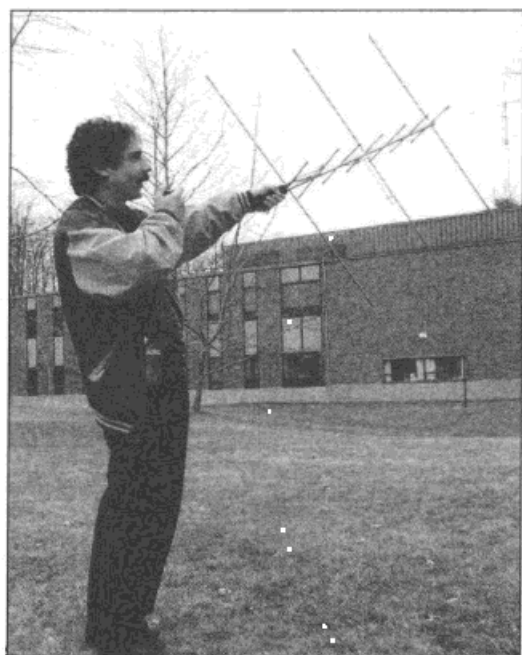


图 4.16 Joe Bottiglieri (AA1GW) 使用一副双波段八木天线，用手持收发信机利用低轨卫星的调频中继通联

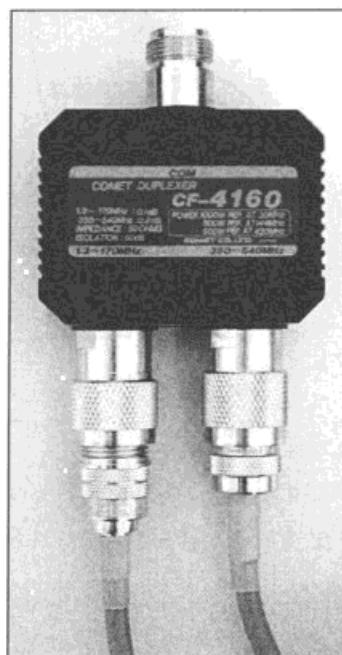


图 4.17 由 Comet 公司制造的天线共用器。天线共用器能够在不同的频段上分离或者组合信号

你可能遇到的另一种八木天线是环形振子八木天线，如图 4.18 所示。在这种设计中，每个单独的振子被弯曲成环状安放在一个公共的主杆上。忽略它们的外表，环形振子八木天线其实是一个线极化天线，它们的优势是在相对狭小的物理空间里创造出较高的增益。由于环的尺寸问题，环形振子八木天线在微波频率上最实用，也最常见。

4.1.4.2 螺旋天线

另一种创造圆极化信号的方法是依靠螺旋天线。轴向螺旋天线是由 Dr. John Kraus (W8JK) 在 20 世纪 40 年代提出的。图 4.19 显示的是一个微波螺旋天线的例子；图 4.20 显示的是一个工作于 70cm 波段的大型螺旋天线。

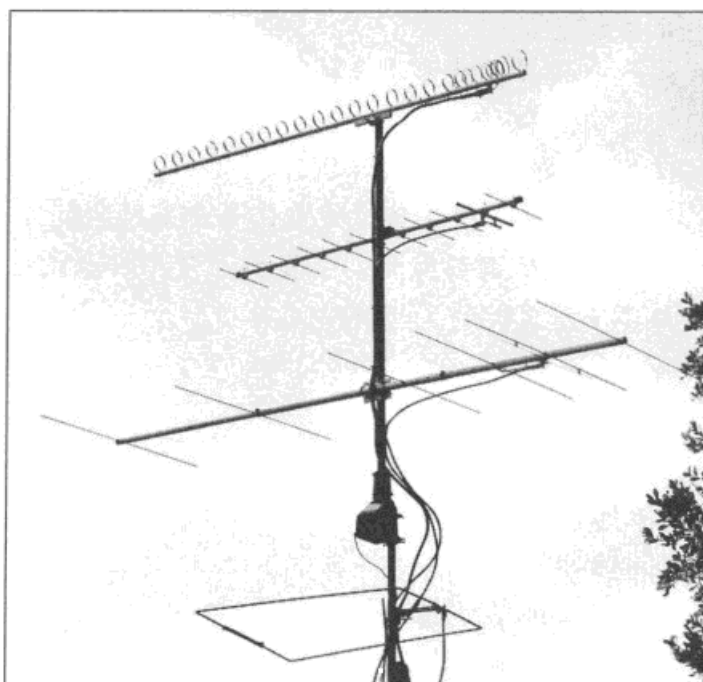


图 4.18 这个天线组合中包括一个装在最高处的
环形振子八木天线

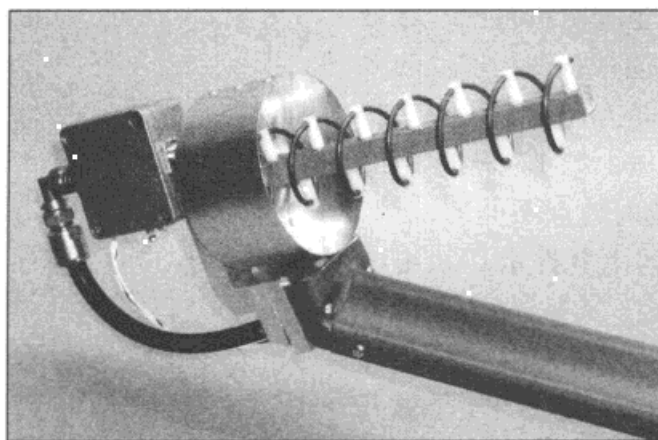


图 4.19 一个用做 2.4GHz 碟形天线馈源的七螺旋左旋极化天线。这个螺旋转天线使用杯形的
反射器和一个直接安装在天线的馈电点的前置放大器

阁楼里的天线

如果你住的地方不允许外置天线，你也许想看看你的屋顶下的阁楼。即使是公寓和单元楼也经常有能让顶楼居民进入的阁楼。根据阁楼的高度，你也许能安装定向天线，甚至天线旋转器。如果阁楼太小，可以考虑全向天线。

在阁楼安装天线最严重的问题是由于屋顶材料造成的信号衰减。用石板或沥青油毡覆盖的木屋顶能通过 VHF 和 UHF 波段的信号，但有相当的信号损失，微波信号可能会被衰减到无法使用的程度；当屋顶潮湿，或有冰雪覆盖，VHF 和 UHF 信号将进一步恶化。当然，金属屋顶对于所有的无线电信号都是致命的。

为了在阁楼进行有效的低轨卫星通联，强烈推荐使用接收前置放大器。你可能还会发现比室外天线需要使用更大的上行链路发射功率。

这种天线有两个特性，使得它制作特别有趣并且对卫星通信特别有用。首先，螺旋天线是圆极化，如前所述，简单地说，圆极化意味着线极化无线电波在空间传播的同时也在旋转。在螺旋天线的情况下，这种旋转是沿天线的轴线方向。可以想象一下，手表中的秒针以所应用频率相同的速度在运动，秒针的位置可以被想象为信号的瞬时极化。螺旋天线的第二个有趣特性是它在一个很宽的频率范围内的可预测的物理模型、增益和阻抗特性。这是为数不多的同时拥有较宽的带宽和高增益的天线之一。这个特性的好处是当用于窄带时，螺旋天线可以极大地宽容机械上的不精确。

螺旋天线是天线领域内与众不同的范例，它的物理结构暗示了它的电气性能。从电学上说，螺旋天线看起来像一个一端馈送给接地面的空心线圈。接地平面通常由 $0.8 \sim 1.1$ 个波长直径的栅格组成（或 $0.8 \sim 1.1$ 个波长的正方形接地面）。在轴向模式中，线圈的周长必须介于 $0.75 \sim 1.33$ 个波长之间。在这种模式下辐射，线圈至少需要 3 圈，每圈之间的间距（以波长计算）应该在 $0.2126 \sim 0.2867$ 范围内。线圈逆时针方向绕线离开反射面时螺旋天线产生左旋圆极化，顺时针方向绕线的则产生右旋圆极化。

你不会找到很许多用于业余卫星通信的现成的螺旋天线，但是你自己做一个也不是太难。在第 6 章里，你会看到制作 70cm 波长螺旋天线的方案。

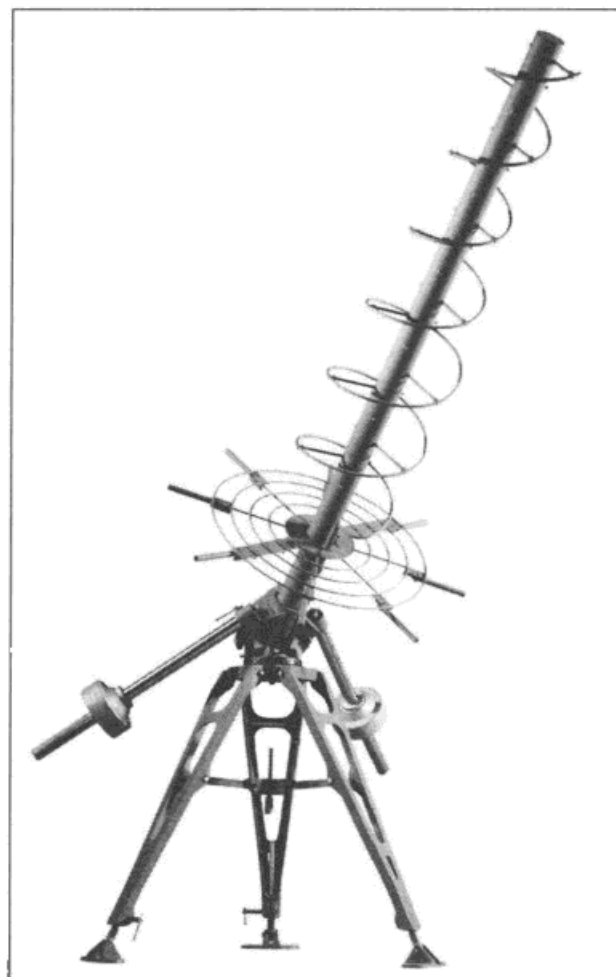


图 4.20 一副用于 70cm 波段的螺旋天线

4.1.4.3 抛物面反射天线

现在许多现代业余无线电卫星已经包含了微波转发器，这使爱好者们对有效的微波天线产生了极大的兴趣。从卫星地面站的角度来看，用于微波的天线不仅非常小，而且在紧凑的结构中具有极高的增益。使用抛物面反射器（常比喻为碟）集中发射和接收能量的天线是用于微波的最好的高性能天线设计。

从“碟”的表面看，就像手电筒中的灯泡一样，抛物面天线必须有一个馈源——天线的辐射和接收部分。有的天线设计成馈源直接安装在碟的正前面，这被称为中心馈电碟，如图 4.21 所示。有的天线将馈源设计在一旁，称为偏置馈电碟，或称为偏离馈电碟，如图 4.22 所示（你应该能从你的邻居那里看到一些用于卫星电视的这样的天线）。偏置馈电碟可以被看作是中心馈电的一部分。中心馈电碟会由于馈电系统的遮挡而产生一些信号衰减，不过这通常是非常小的。偏置馈电碟最初的对准非常困难，因为接收方向不在中轴线，这个方向是中心馈电碟的方向。

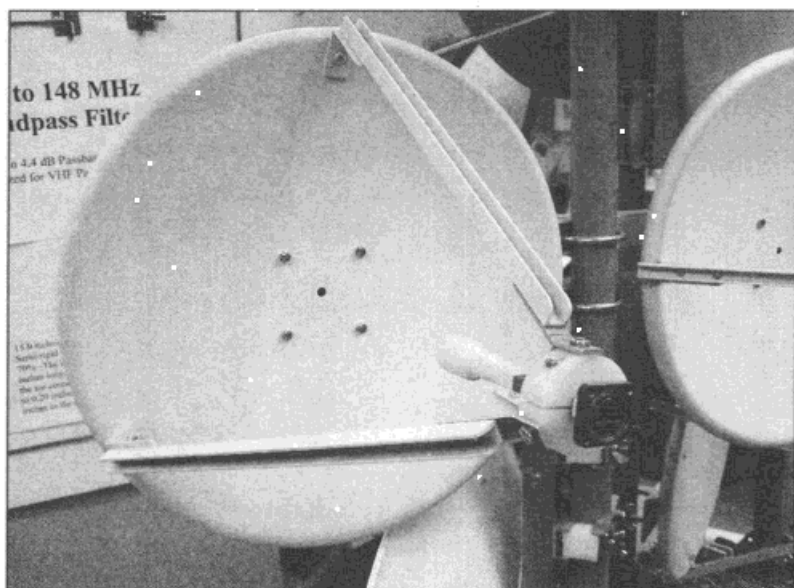


图 4.21 正如你所看到的，馈源直接安装在前面，成为一个中心馈电碟

天线的抛物面可以这样设计，使焦点——馈源必须放置的地方——靠近碟的表面，称为短焦距碟，或者馈源远离碟面，称为长焦距碟。要确定焦距（ F ）的准确长度，需测量碟子的直径（ D ）和碟的深度（ d ）。

$$F = D/16d$$

焦距的长度除以碟的直径得出焦比，通常用 f/D 表示。中心馈电碟通常有范围在 $f/D = 0.3 \sim 0.45$ 之间的较短的焦比。偏置馈电碟通常有 $f/D = 0.45 \sim 0.80$ 范围内的较长的焦比。如果你将两个小镜子贴在碟的外层表面上，然后将碟指向太阳，你可以很容易就找到这个碟的焦点，这

也是你放置馈源的地方。

需要再次用到手电筒来比喻一下，馈源需要均匀照亮整个碟，任何馈给的能量都不能超越碟的反射面。但是，没有任何一个馈电系统能完美“照亮”碟面。这就是所谓的“溢出损失”，要么没有全部被“照亮”，要么过度“照亮”，从而影响增益。典型的碟的效率为 50%，这是 3dB 的增益损失。

对于某一种碟面是很好的馈电系统而相对于另一种碟面来说则可能是个废物。例如，如果你能得到一个剩余的偏置馈电卫星电视碟，你会发现螺旋辐射是最好的馈源，设计范围为 2~6 圈。2 圈的螺旋经常被用于很短焦距（焦比 $f/D = 0.3$ 范围内）的碟中。而 6 圈螺旋通用于典型的长焦距（焦比 $f/D \sim 0.6$ 范围内）的偏置馈电碟上。一般说来，螺旋馈电在短焦距碟中工作不好，而在长焦距偏置馈电碟中表现很好。



图 4.22 这是偏置式馈电碟的很好的例子。注意，馈源在照片底部的边缘，指向抛物面的中心。
另请注意，这是一个美国直播电视公司的卫星电视天线，已被“改变用途”，用于业余卫星

你可以发扬业余无线电的优秀传统，将多余的碟子（商业的或者是军事上多余的），包括卫星电视碟，动手改造成抛物面天线。你也会发现不少业余无线电器材销售商销售的被称为“烧烤碟”的碟，这种碟起初是为多信道多点分配业务（MMDS）或称为“无线电缆电视”而设计（见图 4.23）。MMDS 天线配有内置馈源，所以你需要做的就是连接上馈线，然后使用。这些都是业余卫星通联狂热者们最受欢迎的碟形天线。

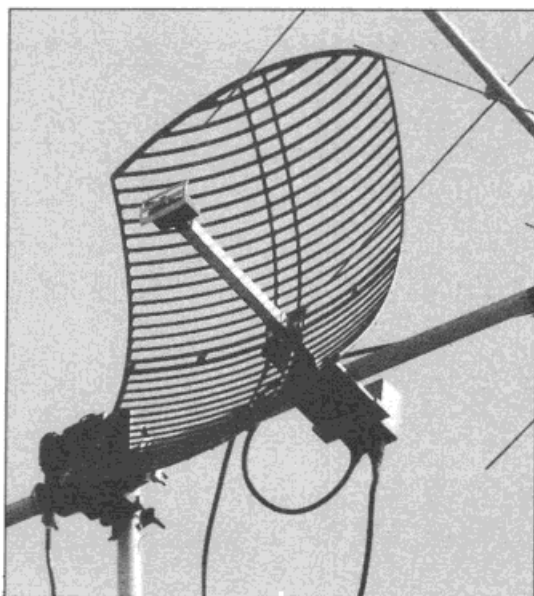


图 4.23 ARRL 总部电台 W1AW 的 2.4 GHz 下行链路的卫星天线，被称为烧烤碟形天线，最初是为多通道多点分配服务（MMDS 系统）设计。这些廉价的天线可在几分钟内组装和安装

自制这种天线更进一步的想法，在第 6 章中你会发现，你甚至可以用覆盖铝箔的纸箱制作一个角反射器天线（从抛物面天线概念演变而来）。

4.1.5 馈线

在本章开头我们说过，如果连接上很糟糕的天线，即使用一台昂贵的收发信机也毫无价值。引伸一下这种观念，如果你使用糟糕的馈线（也称为传输线），再好的天线和收发信机也毫无价值。馈线是收发信机和天线之间的重要管道，通常使用同轴电缆。它负责将射频功率传递到天线，从天线接收信号传送给收发信机。

馈线最主要的问题是损耗。每根馈线都有一定程度的损耗，如果你的电台输出 100W 的功率，而天线得到的功率总会小于 100W。同样，反过来看，天线接收的信号到达电台时总会减弱一些。馈线上的损耗随频率和长度而增加，当天线的阻抗和馈线的阻抗不匹配时，这个损耗随之增加，造成驻波比（SWR）升高。

虽然馈线上的损耗永远不会被消除，但可以通过以下方法降低到可以接受的水平：

- (1) 选择使用最低损耗的馈线；
- (2) 保持馈线尽可能短；
- (3) 调整天线，使驻波比最小。

在表 4.1 中，你会看到一张批量生产的馈线及其特性的内容丰富的清单。这些电缆中大多数都被设计成 50Ω 的阻抗特性（表格中 Z_0 栏，左起第 3 栏），这也是我们业余无线电中经常用到的类型。

表 4.1
常用传输线的标称特性

类型	产品型号	特性阻 抗 Ω	速比 %	电容皮法 / 英尺	中心导体的美国 线缆规格	绝缘体 类型	护套 型号	护套 材料	外径 英寸	最大电压 (平均值)	衰减常数 (dB/100 英尺)		
											1MHz	10	1 000
RG-5	Belden 1694A	75	82	16.2	#18 Solid BC	FPE	FC	P1	0.275	600	0.2	7	5.9
RG-6	Belden 8215	75	66	20.5	#21 Solid CCS	PE	D	PE	0.332	2700	0.4	0.8	2.7 9.8
RG-8	Belden 7810A	50	86	23.0	#10 Solid BC	FPE	FC	PE	0.405	600	0.1	0.4	1.2 4.0
RG-8	TMS LMR400	50	85	23.9	#10 Solid CCA	FPE	FC	PE	0.405	600	0.1	0.4	1.3 4.1
RG-8	Belden 9913	50	84	24.6	#10 Solid BC	ASPE	FC	P1	0.405	600	0.1	0.4	1.3 4.5
RG-8	Cxp1318FX	50	84	24.0	#10 Flex BC	FPE	FC	P2N	0.405	600	0.1	0.4	1.3 4.5
RG-8	Belden 9913F7	50	83	24.6	#11 Flex BC	FPE	FC	P1	0.405	600	0.2	0.6	1.5 4.8
RG-8	Belden 9914	50	82	24.8	#10 Solid BC	FPE	FC	P1	0.405	600	0.2	0.5	1.5 4.8
RG-8	TMS LMR400UF	50	85	23.9	#10 Flex BC	FPE	FC	PE	0.405	600	0.1	0.4	1.4 4.9
RG-8	DRF-BF	50	84	24.5	#9.5 Flex BC	FPE	FC	PE	0.405	600	0.1	0.5	1.6 5.2
RG-8	WM CO106	50	84	24.5	#9.5 Flex BC	FPE	FC	P2N	0.405	600	0.2	0.6	1.8 5.3
RG-8	CXP008	50	78	26.0	#13 Flex BC	FPE	S	P1	0.405	600	0.1	0.5	1.8 7.1
RG-8	Belden 8237	52	66	29.5	#13 Flex BC	PE	S	P1	0.405	3700	0.2	0.6	1.9 7.4
RG-8X	Belden 7606A	50	86	23.5	#15 Solid BC	FPE	FC	PE	0.240	600	0.2	0.7	2.3 7.4
RG-8X	TMS LMR240	50	84	24.2	#15 Solid BC	FPE	FC	PE	0.242	300	0.2	0.8	2.5 8.0
RG-8X	WM CO118	50	82	25.0	#16 Flex BC	FPE	FC	P2N	0.242	300	0.3	0.9	2.8 8.4
RG-8X	TMS LMR240UF	50	84	24.2	#15 Flex BC	FPE	FC	PE	0.242	300	0.2	0.8	2.8 9.6
RG-8X	Belden 9258	50	82	24.8	#16 Flex BC	FPE	S	P1	0.242	600	0.3	0.9	3.1 11.2
RG-8X	CxpoBxB	50	80	25.3	#16 Flex BC	FPE	S	P1	0.242	300	0.3	0.9	3.1 14.0
RG-9	Belden 8242	51	66	30.0	#13 Flex SPC	PE	SCBC	P2N	0.420	5000	0.2	0.6	2.1 8.2
RG-11	Belden 8213	75	84	16.1	#14 Solid BC	FPE	S	PE	0.405	600	0.2	0.4	1.3 5.2

续表

类型	产品型号	特性阻 抗 Ω	速比 %	电容皮法 / 英尺	中心导体的美国 线缆规格	绝缘体 类型	护套 型号	护套 材料	外径 英寸	最大电压 (平均值)	衰减常数 (dB/100 英尺) 1MHz 10 100 1 000
RG-11	Belden 8238	75	66	20.5	#18 Fles TC	PE	S	P1	0.405	600	0.2 0.7 2.0 7.1
RG-58	Belden 7807A	50	85	23.7	#18 Solid BC	FPE	FC	PE	0.195	300	0.3 1.0 3.0 9.7
RG-58	TMS LMR200	50	83	24.5	#17 Solid BC	FPE	FC	PE	0.195	300	0.3 1.0 3.2 10.5
RG-58	WM CQ124	52	66	28.5	#20 Solid BC	PE	S	PE	0.195	1400	0.4 1.3 4.3 14.3
RG-58	Belden 8240	52	66	28.5	#20 Solid BC	PE	S	P1	0.193	1900	0.3 1.1 3.8 14.5
RG-58A	Belden 8219	53	73	26.5	#20 Flex TC	FPE	S	P1	0.195	300	0.4 1.3 4.5 18.1
RG-58C	Belden 8262	50	66	30.8	#20 Flex TC	PE	S	P2N	0.195	1400	0.4 1.4 4.9 21.5
RG-58A	Belden 8259	50	66	30.8	#20 Flex TC	PE	S	P1	0.192	1900	0.4 1.5 5.4 22.8
RG-59	Belden 1426A	75	83	16.3	#20 Solid BC	FPE	S	P1	0.242	300	0.3 0.9 2.6 8.5
RG-59	CXP 0815	75	82	16.2	#20 Solid BC	FPE	S	P1	0.232	300	0.5 0.9 2.2 9.1
RG-59	Belden 8212	75	78	17.3	#20 Solid CCS	FPE	S	P1	0.242	300	0.6 1.0 3.0 10.9
RG-59	Belden 8241	75	66	20.4	#23 Solid CCS	PE	S	P1	0.242	1700	0.6 1.1 3.4 12.0
RG-62A	Belden 9269	93	84	13.5	#22 Solid CCS	ASPE	S	P1	0.240	750	0.3 0.9 2.7 8.7
RG-62B	Belden 8255	93	84	13.5	#24 Flex CCS	ASPE	S	P2N	0.242	750	0.3 0.9 2.9 11.0
RG-63B	Belden 9857	125	84	9.7	#22 Solid CCS	ASPE	S	P2N	0.405	750	0.2 0.5 1.5 5.8
RG-142	CXP 183242	50	69.5	29.4	#19 Solid SCCS	TFE	D	FEP	0.195	1900	0.3 1.1 3.8 12.8
RG-142B	Belden 83242	50	69.5	29.0	#19 Solid SCCS	TFE	D	TFE	0.195	1400	0.3 1.1 3.9 13.5
RG-174	Belden 7805R	50	73.5	26.2	#25 Solid BC	FPE	FC	P1	0.110	300	0.6 2.0 6.5 21.3
RG-174	Belden 8216	50	66	30.8	#26 Flex CCS	PE	S	P1	0.110	1100	1.9 3.3 8.4 34.0
RG-213	Belden 8267	50	66	30.8	#13 Flex BC	PE	S	P2N	0.405	3700	0.2 0.6 1.9 8.0
RG-213	CXP213	50	66	30.8	#13 Flex BC	PE	S	P2N	0.405	600	0.2 0.6 2.0 8.2
RG-214	Belden 8268	50	66	30.8	#13 Flex SPC	PE	D	P2N	0.425	3700	0.2 0.6 1.9 8.0

续表

类型	产品型号	特性阻 抗 Ω	速比 %	电容皮法 / 英尺	中心导体的美国 线缆规格	绝缘体 类型	护套 型号	护套 材料	外径 英寸	最大电压 (平均值)	衰减常数 (dB/100 英尺)			
											1MHz	10	100	1 000
RG-216	Belden 9850	75	66	20.5	#18 Flex TC	PE	D	P2N	0.425	3700	0.2	0.7	2.0	7.1
RG-217	WM CO217F	50	66	30.8	#10 Flex BC	PE	D	PE	0.545	7000	0.1	0.4	1.4	5.2
RG-217	M17/78-RG217	50	66	30.8	#10 Solid BC	PE	D	P2N	0.545	7000	0.1	0.4	1.4	5.2
RG-218	M17/79-RG218	50	66	29.5	#4.5 Solid BC	PE	S	P2N	0.870	11000	0.1	0.2	0.8	3.4
RG-223	Belden 9273	50	66	30.8	#19 Solid SPC	PE	D	P2N	0.212	1400	0.4	1.2	4.1	14.5
RG-303	Belden 84303	50	69.5	29.0	#18 Solid SCCS	TFE	S	TFE	0.170	1400	0.3	1.1	3.9	13.5
RG-316	CXP TJ1316	50	69.5	29.4	#26 Flex BC	TFE	S	FEP	0.098	1200	1.2	2.7	8.0	26.1
RG-316	Belden 84316	50	69.5	29.0	#26 Flex BC	TFE	S	FEP	0.096	900	1.2	2.7	8.3	29.0
RG-393	M17/127-RG393	50	69.5	29.4	#12 Flex SCCS	TFE	D	FEP	0.390	5000	0.2	0.5	1.7	6.1
RG-400	M17/128-RG400	50	69.5	29.4	#20 Flex SPC	TFE	D	FEP	0.195	1400	0.4	1.1	3.9	13.2
LMR500	TMS LMR500UF	50	85	23.9	#7 Flex BC	FPE	FC	PE	0.500	2500	0.1	0.4	1.2	4.0
LMR500	TMS LMR500	50	85	23.9	#7 Solid CCA	FPE	FC	PE	0.500	2500	0.1	0.3	0.9	3.3
LMR600	TMS LMR600	50	86	23.4	#5.5 Solid CCA	FPE	FC	PE	0.590	4000	0.1	0.2	0.8	2.7
LMR600	TMS LMR600UF	50	86	23.4	#5.5 Flex BC	FPE	FC	PE	0.590	4000	0.1	0.2	0.8	2.7
LMR1200	TMS LMR1200	50	88	23.1	#0 Copper Tube	FPE	FC	PE	1.200	4500	0.04	0.1	0.4	1.3
Hardline														
1/2"	CATV Hardline	50	81	25.0	#5.5 BC	FPE	SM	none	0.500	2500	0.05	0.2	0.8	3.2
1/2"	CATV Hardline	75	81	16.7	#11.5 BC	FPE	SM	none	0.500	2500	0.1	0.2	0.8	3.2
7/8"	CATV Hardline	50	81	25.0	#1 BC	FPE	SM	none	0.875	4000	0.03	0.1	0.6	2.9
7/8"	CATV Hardline	75	81	16.7	#5.5 BC	FPE	SM	none	0.875	4000	0.03	0.1	0.8	2.9
LDF4-50A	Helix-1/2"	50	88	25.9	#5 Solid BC	FPE	CC	PE	0.630	1400	0.05	0.2	0.6	2.4
LDF5-50A	Helix-7/8"	50	88	25.9	0.355"BC	FPE	CC	PE	1.090	2100	0.03	0.10	0.4	1.3
LDF6-50A	Helix-1 4/1"	50	88	25.9	0.516"BC	FPE	CC	PE	1.550	3200	0.02	0.08	0.3	1.1

在这个讨论中，值得关注的是表格中右边第4栏，标题是匹配损耗的下面的那些数字。这些数字代表100英尺长的馈线匹配到天线时总损耗（用分贝[dB]表示）。所谓“匹配”，我们是指对天线进行了调整，使馈线的接入点和天线的阻抗相等，结果产生完美的驻波比1:1。请注意，损耗栏里标出的4个频率等级：1 MHz、10 MHz、100 MHz和1 000MHz。

让我们来看看百通（Belden）8240的RG-58同轴电缆，假设我们用100英尺长的这种电缆馈送给2m/70cm组合的八木天线，在100MHz（非常接近2m波段），匹配损耗是3.8dB。因为我们讨论的是损耗，衰减3dB表示功率减半，所以在电台和天线之间，馈线将使信号损失一半。哎！在70cm波段表现更差，损耗可能4倍以上。显然，在这个应用中，这种电缆是非常糟糕的选择。

那么，型号为RG-213（百通8267）的电缆表现如何呢？现在将2m波段的损耗降到1.9dB。对于2m波段来说，这是可接受的，但在70cm波段，损耗仍然与3dB情况相似，这样其实不好。

现在来考虑一下TMS（Times Microwave Systems）公司品牌LMR400，型号是RG-8的电缆。在2m波段，损耗是1.3dB，而在1 000MHz则上升到4.1dB。这在2m波段是可接受的损耗，在70cm波段2dB损耗一样可以接受。如果馈线长度低于100英尺，损耗会更低。

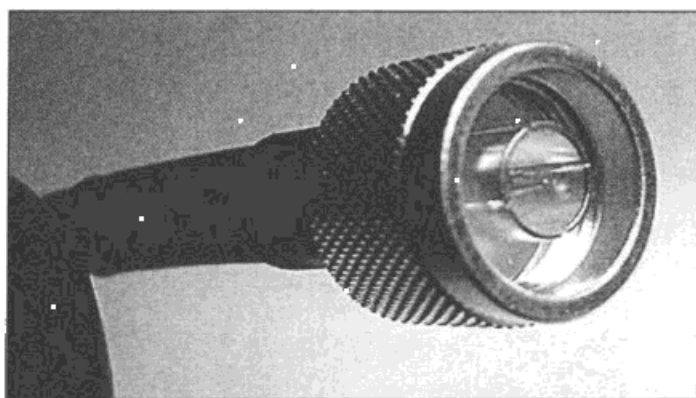


图 4.24 配有N型接头的LMR400型号的同轴电缆

如果考虑到微波信号，在爱好者们喜欢购买的电缆型号中，损耗变得太大。考虑一下表4.1中Helix品牌的LDF6-50A，在1 000MHz上的匹配损耗表现出色，但这种电缆非常昂贵，而且使用起来很难，因此对大多数火腿来说不切实际。对于一个微波地面站，划算的解决方案是在电台上用较低的频率工作，然后在天线上通过装置，例如收发变频器和下变频器，将信号频率转换成微波或将微波转换过来，我们将在后面对此进行讨论。

4.2 天线旋转器

卫星天线的一个有利的特性是它们并不需要安装在很高的地方。只要天线能“看到”尽可能宽阔的天空，你甚至可以把天线安装在地面上。发送到卫星和卫星发射出的信号在太空中已经穿越几百、几千甚至上万英里，因此增加一点你地面电台天线的高度不会显著增强这些信号的强度。然而，增加天线的高度，不必要地增加了收发信机和天线之间电缆的长度，也就相应地增加了馈线损耗。

如果你的天线在地面上对天空已经一览无遗，你通常不需要塔或在屋顶上安装，除非天线周围的树木或者建筑物阻挡向上的视野。或者，换言之，你的天线必须架设到足够的高度，确保天线阵的末端在天线竖直向上时可以保证和地面有足够的空间，防止它影响下面的行人通过。

更重要的是，正如我们已经讨论过的，卫星天线（特别是那些圆极化类型的，以及装有旋转器的）往往比普通地面使用的短波或者 VHF/UHF 天线安装更加复杂。因此，将它们靠近地面安装，使得调整和维修大大简化（也更安全）。

如果你打算使用定向天线，而不希望手工控制它们，那么你就需要安装一个天线旋转器。旋转器差不多就是一个通过多芯电缆远程控制的高扭矩电机（见图 4.25）。正确决定旋转器需要多大的扭力非常重要，这可以确保它可靠运行。

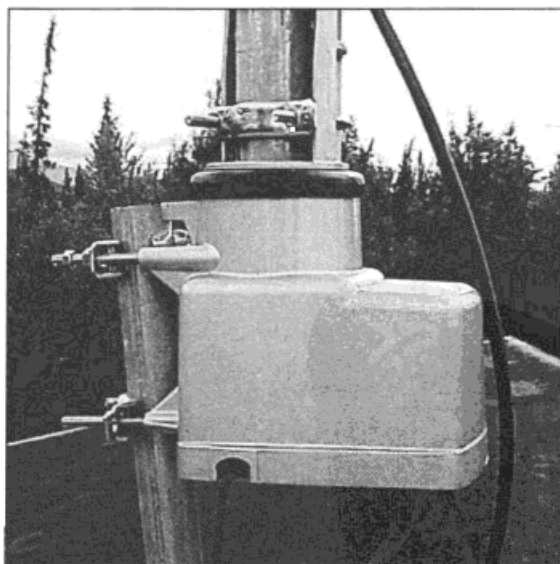


图 4.25 这是一个简易的轻型天线旋转器，用于旋转电视天线。从旋转器底部外壳中伸出的电线是多芯电缆，负责为旋转器提供电源和控制旋转器

通常旋转器制造商会给你提供天线表面积等级，帮助你选择合适的型号。可使用的天线的最大面积与旋转器的扭力有关。有些旋转器制造商提供更多的资料，帮助你计划使用的天线选择正确规格的旋转器。Hy-Gain 公司提供了有效的力矩值，八重洲公司称其为 K 系数。所有这些定值都是以英尺—磅为单位的扭矩值。用天线的旋转半径乘以天线的重量，你可以算出你的天线的必要力矩。只要旋转器的有效力矩等级大于或等于天线的必要力矩，旋转器就可以正常地使用。

有几种等级的旋转器可以用于业余无线电。最轻型的旋转器通常用于旋转电视天线，这些旋转器可以控制小型卫星天线，例如十字八木。电视天线旋转器的问题是，它们缺乏制动能力。强风可以使它通过齿轮反向转动，有时会导致齿轮断裂。

更高级的电视天线旋转器包含制动装置，因此，当动力没有传送给旋转器时，天线会保持在一定的位置上。通俗地说，制动装置防止传动装置在大风天气遭受损坏。如果采取适当的预防措施，这种类型的旋转器有能力，能转动一些卫星天线，其中包括抛物面天线，当然由于其自身特点，这种天线有相当大的风力载荷。不过请记住，旋转器的功率越大，它们的价格也越贵。

你需要使用方位角 / 仰角 (AZ/EL)、旋转器

也许在操作中最便利的是方位角 / 仰角旋转器。这种旋转器可以具有同时在水平方向（方位角）和垂直方向（仰角）移动的能力。有八重洲公司（见图 4.26）和阿尔法公司精心设计

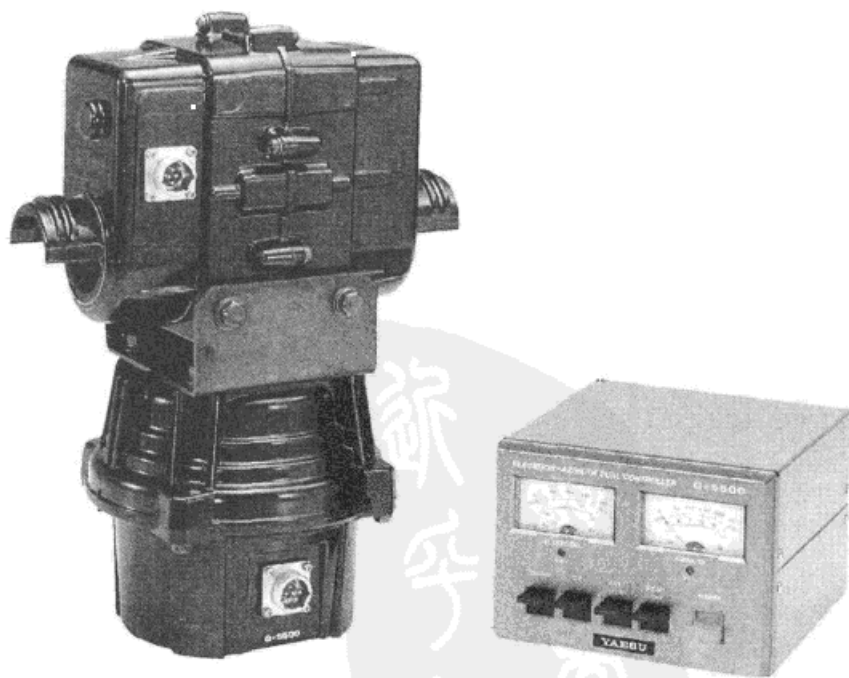


图 4.26 八重洲的 G5500 方位角 / 仰角旋转器（左图）和控制器（右图）

的产品（见图 4.27）。你可以手动操作这些旋转器，或者连接到你的电脑上进行自动跟踪。缺点是这样的旋转器往往价格昂贵，在编写本书时，它们属于 600 美元档次的范围。

如果你的预算可以承受得起，AZ/EL 旋转器显然物有所值。另一方面，如果你想节省开支，可以考虑选用一个标准的旋转器来替代。虽然传统的旋转器只能在方位面（水平面）移动你的天线，但你可以通过使天线永久性保持 25° 角来达到折中（见图 4.28）。信不信由你，这样的结构可以让你通联到大多数卫星，并取得说得过去的成功。不过，当卫星经过头顶时，你不能跟踪它，不过你能享受每次卫星经过时的较长的通联时间。考虑到可以节省几百美元的投资，在天线覆盖范围上的损失还是值得的。

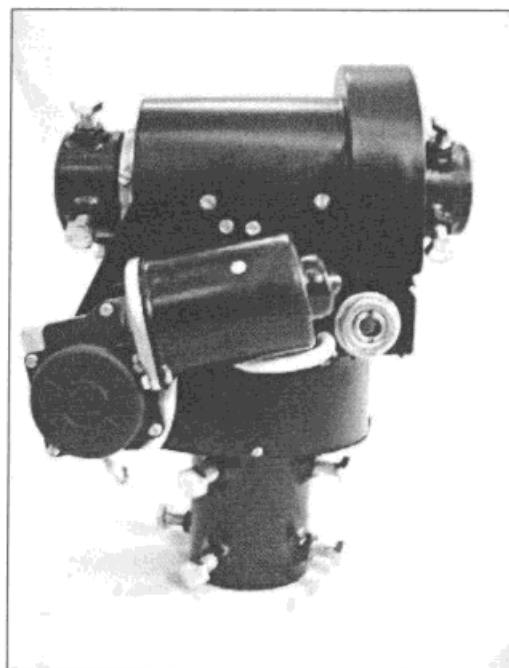


图 4.27 阿尔法公司生产的方位角 / 仰角旋转器

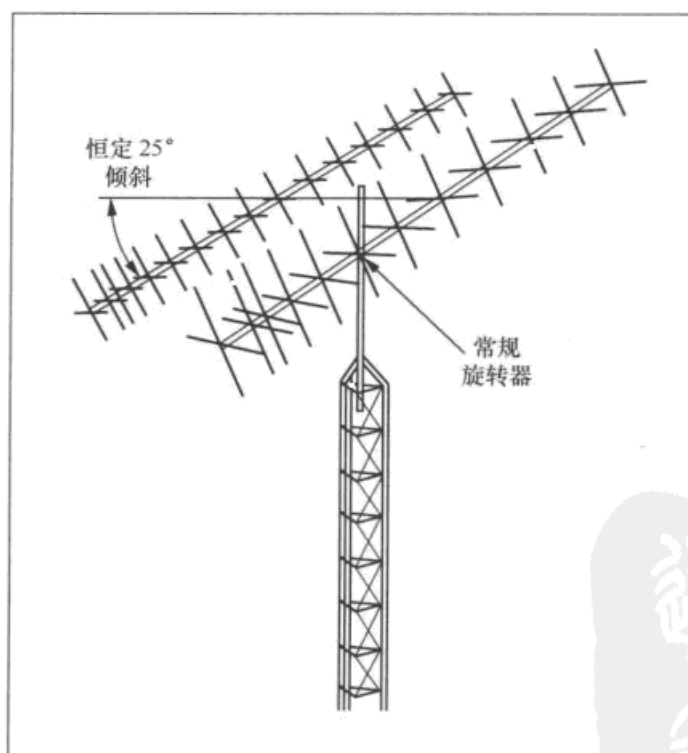


图 4.28 除了选择使用昂贵的方位角 / 仰角旋转器，还可以选择以 25° 倾斜角简单安装你的天线，而使用一个普通的旋转器使它们左右移动（仅仅改变方位角）。这样的结构可以通联到大多数的卫星

无论你选择哪种类型，正确地安装天线旋转器可以为你提供多年可靠的服务。马虎的安装可能导致问题的出现，比如烧毁电动机，滑脱，电缆缠绕，甚至旋转器内的齿轮、轴或外壳铸件断裂。

大多数旋转器能够适应不同直径的主杆，对于较小直径的主杆必须做好适当的预防措施，用垫片确保固定中心使其旋转。例如，如果你决定在塔上安装旋转器，比较合适的是将其安装在塔内，尽可能低于塔顶。主杆会吸收天线由于大风产生的扭力，以及开始和停止旋转产生的扭力。许多爱好者使用长的主杆，从塔顶一直延伸到塔底。尽管这是个特殊的例子，但是主杆在旋转器之间的长度达到 10 英尺或更长，让主杆充当了减振器的作用，这将大大增加整个系统的寿命。将旋转器安装在天线下 10 英尺或更远的另一个好处是任何旋转器、主杆和塔顶之间的偏差影响都不显著。

主杆穿过在塔顶部的管状物（轴套或轴承），通过主杆几乎完全消除了所有作用在旋转器外壳上的侧向力。旋转器仅支撑天线系统的重量并转动天线阵列。

即使是一个大的天线系统，天线和主杆的正常重量通常也不会超过几百磅，你可以很容易地通过在塔顶安装一个推力轴承，来减弱对旋转器的压力。这时，推力轴承就承变了天线系统零件的重量，而旋转器只需要完成旋转任务。

不要忘记预留一圈电缆，让你的天线能正确转动，另外，确保用于天线旋转的这圈电缆的准确位置，使其在任何情况下不会阻碍天线的旋转。

在安装时业余爱好者常碰到的一个问题是旋转器的控制盒上的方向指示和天线的指向存在角度偏差。对于轻型的电视天线旋转器，当风吹动天线时，会经常造成天线方向变化。由于没有制动系统，风的力量可以移动旋转器的齿轮和电机，而天线指示器的方向并未随之改变。有机械制动的旋转器系统可防止旋转器被外力转动，通常还可以从室内重新调整指示器来抵消机械上的偏差。当然，在安装时天线和旋转器的极限方位必须正确安装，通常都要对准正北。

在有足够制动的大型旋转器系统中，指示器的偏差是由天线横梁和主杆构件的滑动造成的。很多文章建议，用大的螺栓将横梁和主杆栓住，并将旋转器和主杆栓住，以阻止滑动。但在强风时，事实上滑动可能起到离合器的作用，阻止对旋转器造成严重的损坏。另一方面，每次强风以后，你大概都不想爬到塔上去重新调整你的天线系统。

如前所述，你可以将旋转器连接到地面站的计算机上，让你的卫星跟踪软件自动瞄准天线（假设你的软件支持旋转器控制）。过去常常有不少商业的旋转器 / 计算机接口装置在销售，但近年来，可用的接口大大减少，那些可用的接口往往价格昂贵，如八重洲的 GS-232 接口，在编写本书时，价格大约在 600 美元。如果你用这个接口，结合八重洲的方位角 / 仰角旋转器，你将总共投资 1 300 美元。现在能发现的较便宜的替代品是套件或者是自制装置。一个很好的实例是 www.g6lvb.com/Articles/LVBTracker 上的 G6LVB 跟踪接口。如果你自己做一个，费用低于 50 美元。你在第 6 章还会看到一个简易、廉价的接口方案。



图 4.29 八重洲 GS-232 允许你的计算机和卫星跟踪软件自动控制方位角 / 仰角天线旋转器

4.3 接收前置放大器

来自卫星的信号可能极度微弱，这意味着为了辨别信号，需要尽可能多地去放大信号。可惜，有许多因素会共同导致你的电台降低接收信号的能力：

(1) 你使用的是全向天线。正如我们前面所讨论过的，全向天线极度缺乏定向天线捕捉信号提高增益的能力。

(2) 天线和电台之间的馈线过长或者是使用了损耗大的电缆。记住，即使是最好的电缆，馈线越长，你的信号损失越多，特别是在较高的频率上。

(3) 你尝试和在远地点的 Phase III 或 Phase IV 通联。当信号穿越 50 000km 到达你的电台，即使是高增益定向天线也许还是不够。

确保你能接收到合适强度的信号的办法是在天线上安装前置放大器（见图 4.30）。这是一个只适合一个波段频率响应的高增益、低噪声放大器。

当你购买前置接收放大器时，你希望获得最大的增益和最小的噪声。但是，每个前置放大器都会给系统增加一些噪声，但你需要尽可能减少额外噪声。前置放大器的增益和噪声用分贝(dB)来描述。例如，一个设计得不错的 VHF 频段前置放大器的增益在 15 ~ 25dB 范围内，而噪声系数(NF)在 0.5 ~ 2dB 范围内（越小越好）。



图 4.30 Advanced Receiver Research 研制的接收机前置放大器，在信号从同轴电缆到达你的接收前使信号大大增强

如果你的天线在室外，你就需要购买“塔顶安装”式前置放大器，这些前置放大器装有防水外壳。

如果你的前置放大器是塔顶安装式，你就要设计一个方法，为前置放大器提供直流电。这也很简单，用一根两芯电源线连接到这个设备上即可。此外，前置放大器可以用馈线本身输送直流电，有些收发信机具有在馈线上插入 12V 直流电的性能，就是为了这个目的。如果没有，你可以在电台处接入直流电插入器，在接近天线处用直流电插入器输出直流电（见图 4.31）。有些前置放大器设计时包括馈线供电能力，所以你所需要的就是在“电台末端”接入直流电插入器。

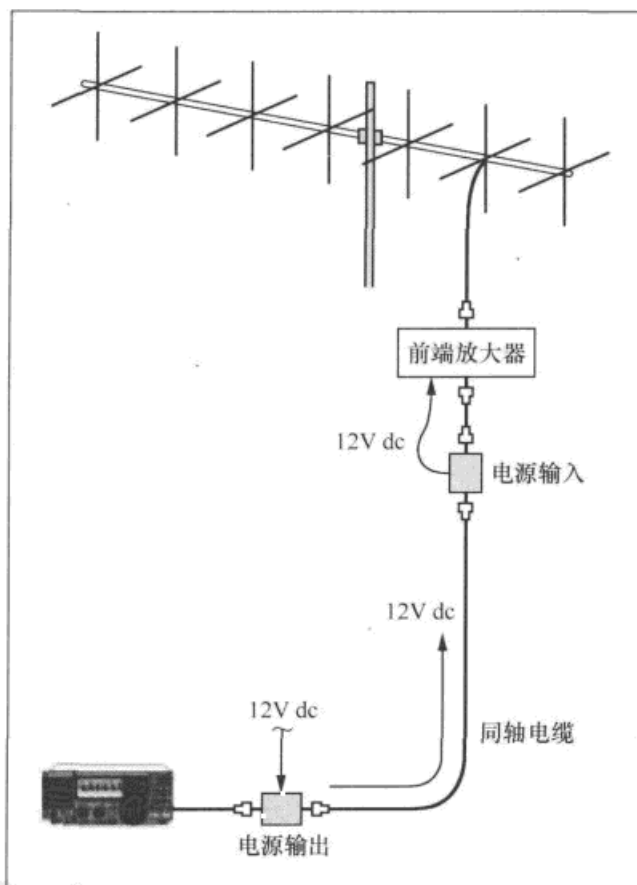


图 4.31 直流电插入器担当着名副其实的工作——它在电台这段给同轴电缆插入直流电压。设计这个插入器的目的是为了阻止直流电回流到电台。电流通过电缆流入天线端，那里的另一个插入器从电缆中取出直流电并提供给设备（在这种情况下是为前置放大器供电）。这两个插入器都可以几乎没有损耗地通过射频

安装在馈线上的前置放大器也将受到从电台上输出的射频功率的影响，你需要这样一个模块，包含一个内部继电器，能暂时切断电路，避免电台工作时损坏前置放大器。有的前置放大器已经包含了这样一个继电器，所以不在需要额外的继电器，你的任务是在电台发射前想办法去激活继电器，然后再发射。这个任务通过一个所谓的“时序控制器”来完成。时序控制器和你的收发信机一起工作，在电台发送射频功率前自动将前置放大器从馈线中断开（见图 4.32）。

一个比较简单的选择是购买带有射频感应开关的前置放大器。这个设计包含一个传感器，能检测到从电台传输来的射频信号，并立即切断电路，使前置放大器脱离危险。请注意，带有射频控制开关的前置放大器根据它们能够安全通过的功率来划分等级。如果你的收发信机的功率是150W，那么，你要购买的带有射频控制开关的前置放大器的等级需要等于或者大于150W。

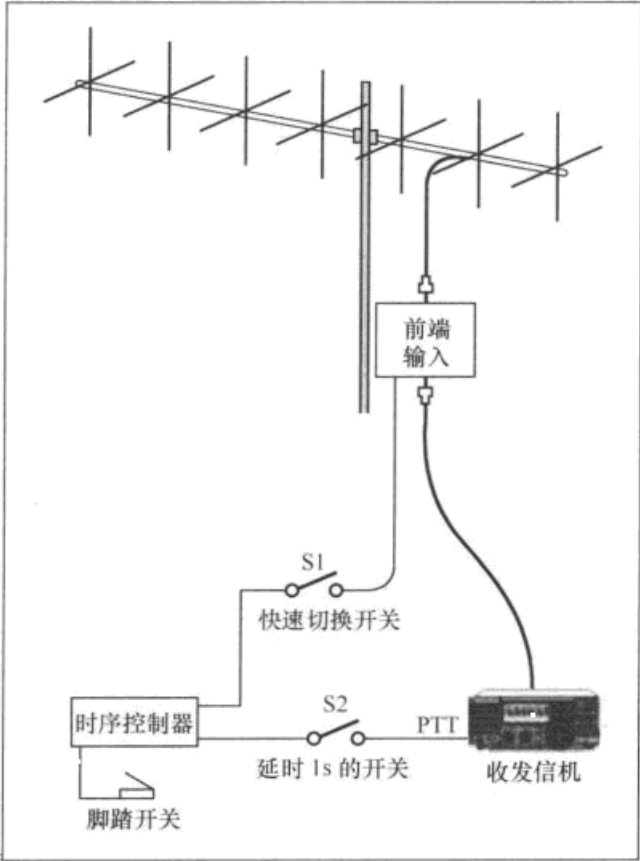


图 4.32 在这个简单的例子里，当操作者按下脚踏开关时序控制器被触发。它立即闭合开关 S1，激活天线上的接收前置放大器的“旁路”继电器，实际上就将放大器从馈线电路中切断。接着，时序控制器闭合开关 S2，它连接到收发信机的 PTT（按下发射），控制电台发送射频功率

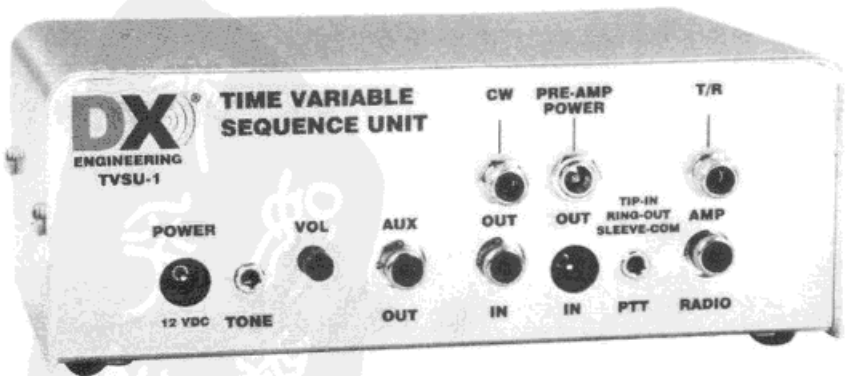


图 4.33 DX Engineering 公司的 TVSU-1 时变定序器 (www.dxengineering.com)

下变频器

下变频器也称为接收变频器，正如它的名称所包含的意思，下变频器把一个波段的信号“向下”转换成另一个波段的信号。例如，一个2至10m的下变频器，它将把信号从144～146MHz范围，向下转换到28～30MHz范围。

在被称为所谓“从直流到日光”（超宽频带）收发信机出现之前，下变频器通常的意思是在短波设备上接收VHF和UHF信号。今天，下变频器更常用作接收微波信号的一种方式。例如，微波下变频器，将2.4GHz的频率范围降频到2m频率范围。在完成将微波信号降频到VHF波段后，更容易将这些信号传送给电台，馈线也更便宜。如图4.34所示，一个典型的微波下变频器被正确安装在天线上，在微波能量被馈线损耗前，微波信号被转换成低频信号。

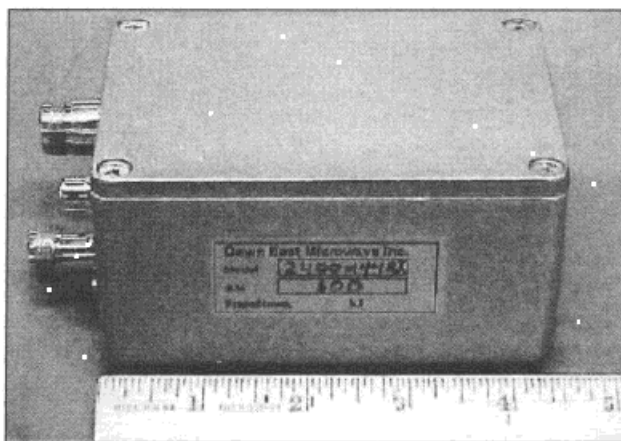


图 4.34 这个用 Downeast Microwave 公司制造的下变频器将 2.4GHz 转换成 2m 波段。
因为有防风雨设计，它被设计安装在天线上

当接收前置放大器类似，下变频器用增益和噪声系数来描述。同样地，你希望最小的噪声并得到最大的增益。

当谈到下变频器安装时，所有问题和接收前置放大器所涉及的问题一样。如果下变频器被安装在室外（因为很可能这样做），它必须安装在防水外壳内。你还必须提供直流电，而且当发射信号送往同一副天线时必需切断下变频器。

4.4 收发变频器

收发变频器不仅转换接收信号，而且还转换发射信号。也就是说，当你用2m的收发信机发射射频信号时，可以用收发变频器生成1.2GHz的上行信号。同样，收发变频器也可以

将 1.2GHz 的下行信号转换成 2m 信号（见图 4.35）。

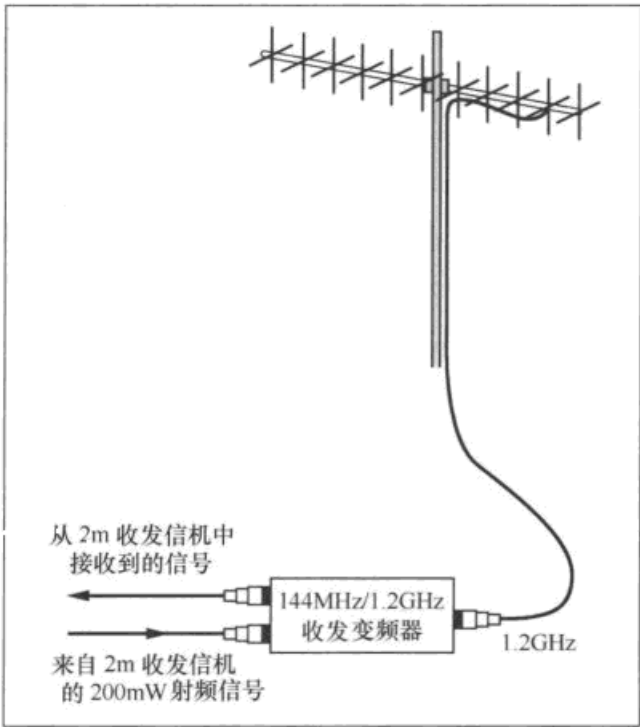


图 4.35 在这个例子中，在接收信号时，收发变频器将接收的 1.2GHz 信号转换成 2m 波段信号，而发射时，将 2m 波段信号转换成 1.2GHz

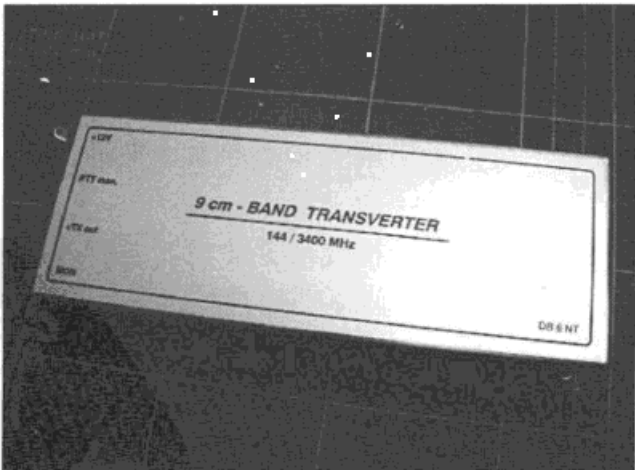


图 4.36 这是 DB6NT 的收发变频器，将 3.4GHz 信号转换成 2m 波段，反之亦然

与接收前置放大器和下变频器一样，收发变频器最好安装在天线上。因此，再次说明，你必须解决直流电源供电问题。在大多数收发变频器中的收 / 发转换是由内置的开关通过“时序控制器”键控来完成的。有的型号提供自动射频感应开关。

当使用收发变频器时，首要问题是提供一个安全水平的射频输入。例如，假设你的收发信机在 2m 波段功率输出 50W 功率，对大多数收发变频器来说这么大的射频功率很难应付。除非它有内置的射频功率衰减器，收发变频器通常被设计用来对付毫瓦级的射频功率（通常为 200 ~ 300mW）。如果你非常有幸得到一台拥有变频器端口的发信机，那么从那个端口你可以获得毫瓦级发射功率。如果没有，你就需要在收发变频器的输入端添加一个衰减器，把你电台的输出功率降低到毫瓦级水平。

4.5 收发信机

有许多业余无线电收发信机包含 VHF 和 UHF 波段。事实上，本章中前面所提的“从直流到日光”（超宽频带）电台也提供所有短波波段。选择适合卫星通信使用的收发信机所面临的问题，就是在你能负担得起的价格中，选择你所喜欢的型号。

4.5.1 调频中继和数字卫星

几乎所有的双段（2m 和 70cm）调频收发信机都适合进行卫星调频中继的通信，例如，OSCAR 51、与国际空间站及大量其他低轨道卫星进行数字通信（见图 4.37）。



图 4.37 ICOM 公司生产的 IC-2820 调频收发信机能在 2m 和 70cm 波段独立接收和发射。
有了这样的双波段调频设备，你可以通过卫星调频中继进行通联，甚至可在汽车上通联

大多数现代双频段设备提供 30 ~ 50W 的“大功率”输出设置。这个功率比用一个定向天线把可靠信号发送到卫星实际所需要的功率大的多。这个功率对于全向天线，包括移动天线也都绰绰有余（是的，当你在开车行驶时，你可以通过调频中继卫星进行联络）。

如果你考虑进行数字通信，在选购设备时一定要选择带有数据接口的调频收发信机。这将使它更容易连接外置无线调制解调器，例如，无线分组终端节点控制器（TNC），甚至

有些电台还有内置的 TNC(见图 4.38)。此外,要确保收发信机标明能够处理 1 200 波特和 9 600 波特的数据信号。几乎所有调频收发信机都可以在 1 200 波特工作,但 9 600 波特是另一回事。如有疑问,请查阅 QST 杂志的“产品评论”,ARRL 会员可以在 ARRL 网页(www.arrl.org)上在线浏览“产品评论”,查看比特误差率(BER)的测试结果。



图 4.38 Kenwood 的 TM-D710 是一个具有用于数字通信的内置无线分组通信终端节点控制器(TNC)的双波段收发信机

那么,手持调频收发信机情况如何呢?是的,你可以使用一台双频手持收发信机跟有调频转发器的卫星通联,不过,由于手持机的射频输出功率太低(5W 或更低),你一定要配合定向天线使用,在众多的信号中聆听你所要的信号(见图 4.39)。此外,在编写本书时,大多数较新的手持机不具有所谓真正的(或“全”)双工操作。稍后,我们将讨论全双工的含义,以及为什么这是卫星通信所需要的。

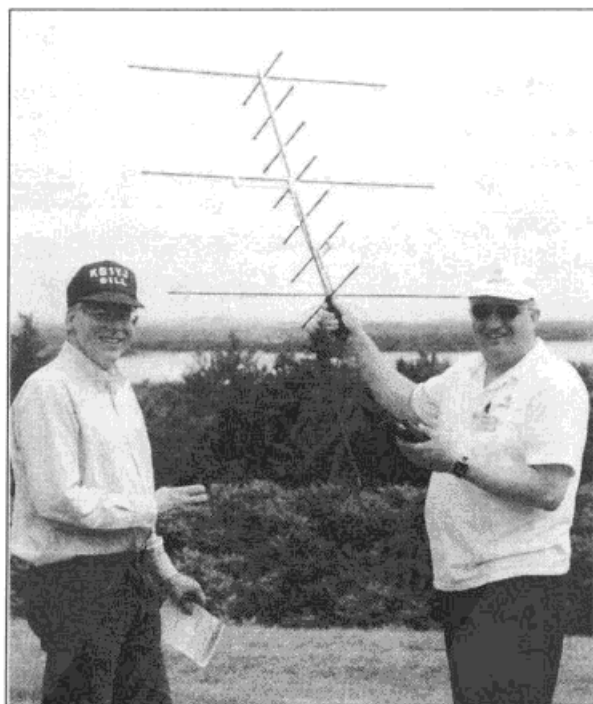


图 4.39 手持式“箭牌”定向天线在调频卫星中继通信中很受欢迎

如果你手头的资金有限，用一个双波段调频电台和卫星中继开始通联是一个可行的选择。新的调频收发信机的价格已经下降多年，你还可以在火腿节的跳蚤市场和网站，例如 eBay (www.ebay.com) 上发现很多二手调频设备的交易。

4.5.2 线性转发器 (SSB/CW) 卫星

调频信号的频带较宽，调频接收机对频率的变化有一定宽容度。这些幸运的特点使它容易去补偿当卫星在高空快速飞过而产生的多普勒频率偏移。在你下一章的学习中，你可以在收发信机上储存几个上行/下行频率步进，在卫星经过时，从一个频率切换到另一个频率。

单边带 (SSB) 和等幅报 (CW) 的信号非常窄，当你通过卫星线性转发器工作时，你的信号和其他人的信号分享通带。你不仅需要几乎不断地调节你的收信频率 (下行)，去保持单边带的声音或使等幅报 (CW) 听起来“正常”，而且你还要继续保持在你的频率上，防止飘移到其他人的通联频率里。最有效地方法是在你发射上行信号时，能听到通过卫星传来的自己的“实时”信号。这种类型的操作方式称为全双工。

当你开始考虑一台用于卫星通信的 SSB/CW 收发信机时，对全双工能力的问题容易产生误会。你会发现很多全模式 (SSB、CW、FM) 收发信机，它们自称拥有“跨频段异频”或者“跨频段双工”功能，不过，千万要小心！你所需要的电台是能同时在不同频段发射和接收。没有多少业余无线电收发信机能够有这样的功能。

市场上有两种型号的全模式业余无线电收发信机设备能进行全双工操作：VHF/UHF 模式的 ICOM IC-910H (见图 4.40) 和全波段 Kenwood TS-2000 (见图 4.41)。但是，如果你到二手市场购买，你会发现不少非常出色的卫星通信用的电台，例如，Yaesu FT-736 (见图 4.42)，ICOM IC-820 和 821，Yaesu FT-726 和 FT-847 以及 Kenwood-790，所有这些设备都具有全双工的能力。



图 4.40 ICOM 公司生产的 IC-910H 是用于 VHF/UHF 卫星通信的收发信机



图 4.41 Kenwood 公司的 TS-2000 不仅覆盖整个短波频段，而且还具有 VHF 和 UHF 全双工卫星通信能力



图 4.42 Yeasu 公司的 FT-736 是一个具有传奇色彩的卫星通信收发信机。虽然已经停产，但在二手市场仍能看到“736”的身影

如果你无法找到或者负担不起全双工收发信机，不要放弃，很多火腿已经成功使用的另外一个选择是使用计算机控制他们的普通的不具备双工性能的全波段收发信机，在“盲目地”发射上行信号时，用计算机补偿多普勒偏移。正如我们在第 2 章中所讨论的，许多卫星跟踪软件在跟踪卫星飞行时能自动改变你电台的频率。它们通过数学计算出频率的偏移，然后调整你的电台频率。这种频率跟踪的方法不像你自己用全双工模式来收听自己下行信号那么准确，但它能有效工作。

另一种方法是使用一台收发信机发送上行信号，另一个接收机或者收发信机接收下行信号。有的爱好者甚至将 VHF 或者 UHF 下变频和老式的短波接收机一起使用。他们用 2m 或 70cm 的单边带电台发送上行信号，而用短波接收机和下变频器一起去接收下行信号。

如果你工作的卫星线性转发器的上行频率是 1.2GHz 或者更高，尽管有些收发信机提供 1.2GHz 的模块选择，但你可能需要使用收发变频器进行工作。幸运的是，卫星制造者都知道，大多数火腿拥有 2m 和 70cm 收发信机，所以他们设计的新的卫星时即使转发器下行使用微波，但通常配置 2m 或 70cm 的上行链路。因此，如果你购买了一台 VHF/UHF 收发信机，

可以这么说，你已经解决了一半的问题，你所需要的是增加一个下变频器去接收下行微波信号。

4.6 VHF/UHF 射频功率放大器

如果你选择的收发信机在上行频段上能提供至少 50W 输出，那你就不需要射频功率放大器去使你的信号让低轨卫星“听到”，特别是当你使用定向天线的时候。

另一方面，如果你使用全向天线，100W 或 50W 的输出对你相当有用。而如果你的目标是轨道在 50 000km 高度的 Phase III 或 IV 卫星，100W 或更大的功率，连同定向天线都是必需的。如果在使用中你的收发信机缺乏力度，解决的办法就是一台外置射频功率放大器。

你要购买多大功率的放大器呢？在大多数情况下，100W 或者 150W 的放大器是一个不错的选择（见图 4.43）。当你在购买放大器时，一定要小心注意输入和输出的规格。也就是说，多大的射频输入才能够产生 150W 的输出？你的电台能否提供这么大的功率？

另一个要考虑的是你的直流电源。虽然一台 25A 13.8V 的直流电源对一台 100W 的收发信机工作完全够用，但如果你决定给你的卫星电台增加一台 100W 或者 150W 的放大器，那么电流的需求将大大增加。当收发信机和放大器同时发射时，需要一台单独的电源提供额外 20A（或更多）的电流，去安全驱动放大器。



图 4.43 由 Tokyo Hy-Power 制造的 150W 2m 功率放大器

4.7 典型的地面站设计

图 4.44 列举的是用于低轨卫星的一个基本具备调频语音和数据通信的台站，其核心是一个双波段调频收发信机，“大功率”输出范围在 30 ~ 50W。在这个例子中，使用的是全方向天线，假定这台收发信机只有一个天线接口，这就是为什么它需要一个天线共用器。否则，你需要 2 根独立的同轴馈线连接到电台。

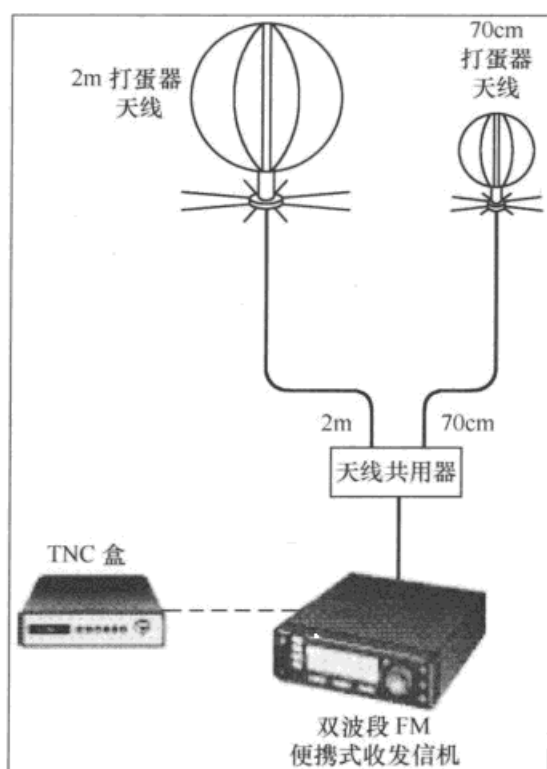


图 4.44 一个简易的用于低轨卫星通信的调频语言和数据模式的台站。其核心是一台双频调频收发信机，“大功率”设置的输出功率为 30 ~ 50W。在这个例子中使用的是全向天线，而且假设这台调频收发信机只有一个天线接口，这就是为什么里面需要一台天线共用器。在收信天线上有一个前置放大器，它将信号强度极大提高

通过使用定向天线或者双波段八木天线可以提高地面站的性能，不过这就需要增加一个天线旋转器（人工的或者机械的）。虽然没有在图中画出，但在下行天线上添加一个接收前置放大器是个值得的投资。

在图 4.45 中，我们看到一个全双工、多波段、多模式收发信机和定向天线。这个台站对于使用线性 SSB/CW 转发器的低轨道卫星，如 OSCAR 52，以及 FM 语音和数据卫星将有出色表现。通过增加一台射频功率放大器（电台的输出功率小于 100W），这个台站就可以具有和遥远的 Phase III 和 IV 卫星通联的能力。

请注意，这幅图显示的是 2 副独立的天线和馈线，你可以很方便地使用一个单独的双波段八木天线和一根馈线，不过，如果你的收发信机使用分开的 VHF 和 UHF 天线接口，那么你也也许需要在收发信机上安装一个天线共用器。

图 4.46 展示了至少一种方法来处理卫星的微波下行信号。假设上行频率是 70cm 波段，下行频率是 2.4GHz，而且这个卫星可能是高轨道的 Phase III 或 IV 的航天器（注意，上行链路使用射频功率放大器）。

还要注意下变频器的使用，在将信号馈送给电台前，将天线上的 2.4GHz 的信号转变成 2m 信号。实际上，对任何波段和设备的组合，你可以采用同样的方法。例如，你联通低轨道的调频模式的卫星，但你只有用于上行链路的 2m 调频收发信机和一个单独的 VHF 调频

的“警用频段扫描接收机”用于下行链路。你可以为 70cm 下行链路使用下变频器，将信号变频为 2m 波段，用 VHF 波段的“警用频段扫描接收机”来接收。

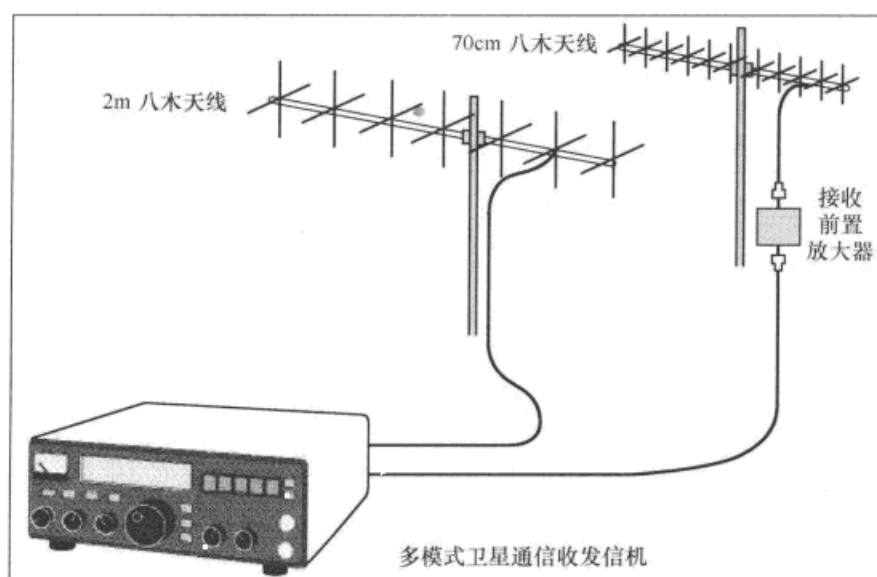


图 4.45 这个地面站适用于装有线性 SSB/CW 转发器的低轨卫星,如 FO-29 和 HO-68(中国的希望一号业余无线电卫星),以及调频语音和数据通信卫星。此图显示了 2 个独立的天线和馈线。你也可以很方便地使用单独一副双波段八木天线和一根馈线。不过,如果你的收发信机使用分开的 VHF 和 UHF 天线接口,那么你还得需要在收发信机上安装一个天线共用器

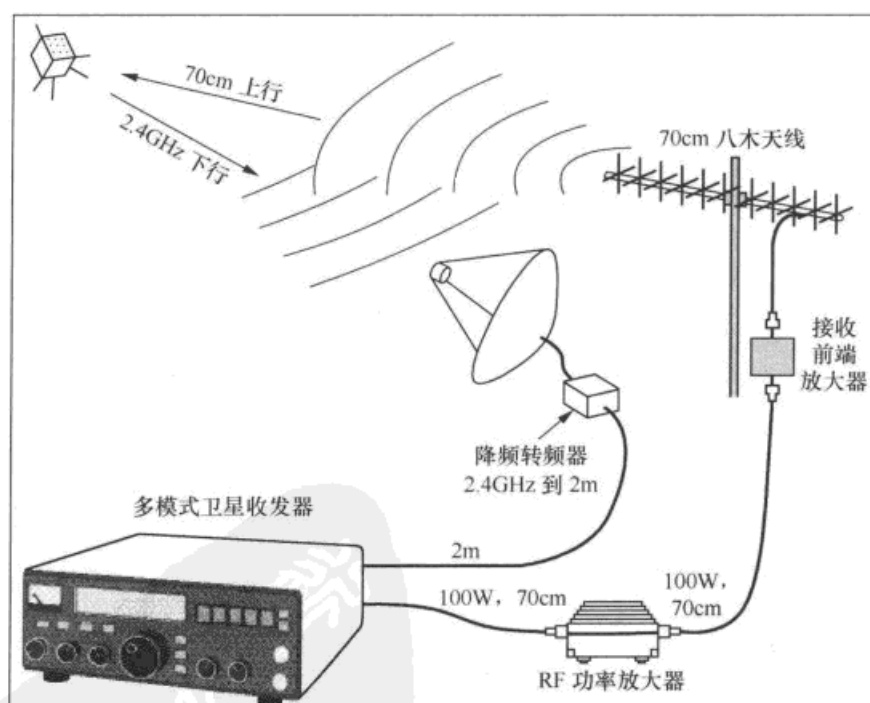


图 4.46 这个举例是一个工作于微波下行链路的远距离 Phase III 或 IV 卫星。假定上行链路工作在 70cm,而下行链路工作在 2.4GHz。请注意,在信号馈送给电台前,天线上的下变频器将 2.4GHz 的信号转换成 2m 信号

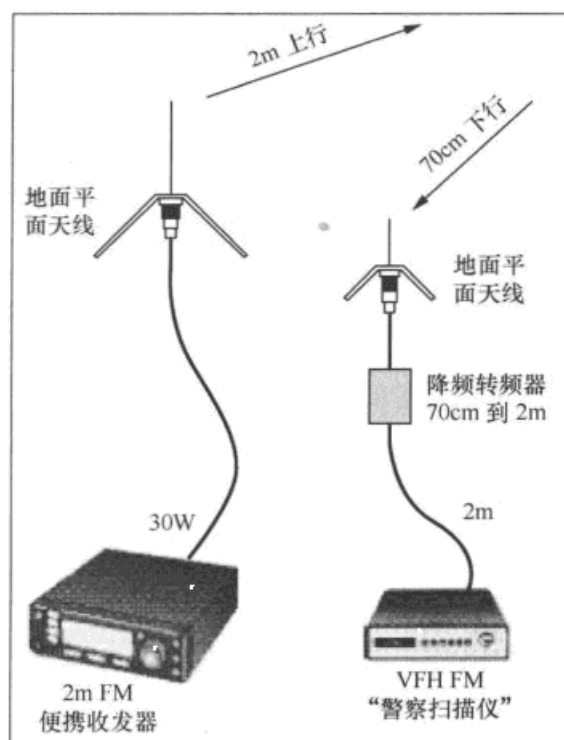


图 4.47 比如说，你想进行调频低轨卫星通联，但是你只有一台用于上行链路的 2m 波段的调频收发信机，而将一台 VHF 调频“警察扫描仪”用于 70cm 的下行链路。你可以在 70cm 下行链路上使用一台下变频器，将下行信号转换成 2m 波段，用“警察扫描仪”接收

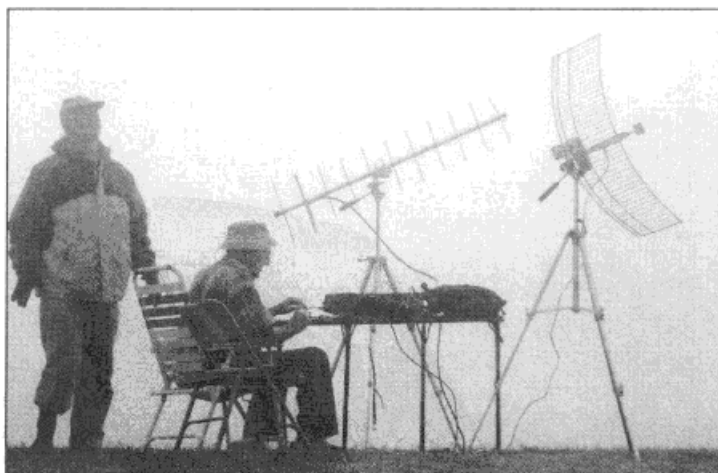


图 4.48 WD9EWK 停下车，在车上利用 OSCAR 51 卫星上的调频中继进行通联。他使用一副短主梁的 2m 八木天线用于上行链路，在他的车后身，一副全向天线用于 70cm 的下行链路



图 4.49 卫星天线不必架设在塔上或屋顶上。这个用于 AO-40 的电台就架设在郊外住处的后院天井中。请注意，这个“烧烤型”碟形天线用于 2.4GHz 的下行链路，它和用于 70cm 上行链路的天线共用横杆

卫星通信不同于其他的业余无线电活动，它并不仅仅是需要你坐下来操作电台来进行通联这么简单。正像你在前面的章节中看到经验教训一样，你必须知道卫星在什么时候可以通联，以什么路径从地平线升起及采用何种上、下行频率工作，另外还需要处理多普勒效应等问题。所有这一切都像高难度杂耍一样，你尝试通联的对象是在太空中以每小时成千上万英里的速度飞驰的卫星。因此，卫星通联是一种挑战，也是享受业余无线电乐趣的一部分。如果它与操作本地 FM 中继一样简单易用，你也不会感到什么乐趣了。操作卫星的老手们会告诉你，没有什么能比通过卫星进行通联更刺激了。即使在这技术高度发达的时代，也能给你带来前所未有的体验。



在多雾的天气中等待卫星经过

5.1 单信道中继卫星

从设备的角度和实际应用来看，单信道中继卫星属于最简单的业余无线电卫星。

正如第4章中所讨论的，我们可仅仅使用双频段（2m/70cm）FM 移动无线电收发信机和一副全向天线——甚至一根双频段移动鞭状天线也是可以用来利用低地球轨道卫星进行通联。你也可以使用一个双频段手持式对讲机，但不要期望那种缩短的“橡胶”天线可以成功通联，你需要使用更好的天线，像双频段的八木天线。在第6章中，你会看到一种由 Thomas Hart/AD1B 设计的八木天线，那是特别为手持对讲机设计的。

在编写本书时，已经有3个在轨 FM 模式的中继卫星和1个其他模式的单信道中继卫星。每个卫星都有不同的特点，所以通联的方式也不同，但相同的技术将会应用于在本书出版之后的任何一个新发射的单信道卫星中。下面让我们分别介绍一下这些卫星的不同特点。

5.1.1 AMSAT-OSCAR 51

在当前的单信道卫星中，OSCAR 51 是最好的选择，在很多情况下它作为一个 V/U 模式的中继（可以参考表5.1中上行/下行模式的对照），但是 OSCAR 51 偶尔会转换成其他的模式，所以最好是查看 AMSAT 的工作计划来确定它的当前状态。你可以在 www.amsat.org/amsat-new/echo/ControlTeam.php 网站上找到它。

表 5.1 卫星上行 / 下行模式代号

卫星频段代号	通信操作模式（上行 / 下行）
10 m(29 MHz):H	V/H(2 m/10 m)
2 m(145 MHz):V	H/V(10 m/2 m)
70 cm(435 MHz):U	U/V(70 cm/2 m)
23 cm(1260 MHz):L	V/U(2 m/70 cm)
13 cm(2.4 GHz):S	U/S(70 cm/13 cm)
5 cm(5.6 GHz):C	U/L(70 cm/23 cm)
3 cm(10 GHz):X	L/S(23 cm/13 cm)
	L/X(23 cm/3 cm)
	C/X(5 cm/3 cm)

不幸的是，OSCAR 51 的通用性也是它的缺陷之一，有许多电台都尝试使用它，但是只能有一个电台能被转发。由于 FM 接收机存在同频抑制，在任何特定的时候只有最强的电台信号才能被 OSCAR 51 解调及转发。如果卫星接收到几个幅值几乎相当的信号，那么调制输出的信号将会是一种难听的啸叫声。

当许多人同时使用 OSCAR 51 时，你可以听到通联中夹杂着啸叫声。在周末，更多的业余无线电爱好者使着 OSCAR 51，OSCAR 51 的信号通道将会变得很拥挤。除非你能用更高的功率发射 2m 的上行信号（50W 或更大）并使用定向天线，否则你最好在 OSCAR 51 不繁忙的时间段来尝试使用它。例如，在工作日的上午，其信号显然不会拥挤。在这种时段，作者成功使用不超过 5W 的功率车载电台和双频段的鞭状天线（见图 5.1）就打开了 OSCAR 51。工作日的晚上也是一个好机会，尽管那时段的信号也有可能比较拥挤。

由于 FM 信号带宽较宽（大约 5kHz），消除多普勒频移就非常简单，事实上，你可以充分利用无线电收发信机的存储信道，使消除多普勒频移变成了一件简单到像按按钮一样的事情。

我们从建立 5 个存储信道（见表 5.2）开始讲解。几乎所有的现代双频段无线电收发信机都允许设置存储信道来异频工作，你可查阅如何进行设置的说明书。对于每个信道，你将需要设置 2m 的上行发射频率和相应的 70cm 的下行接收频率。

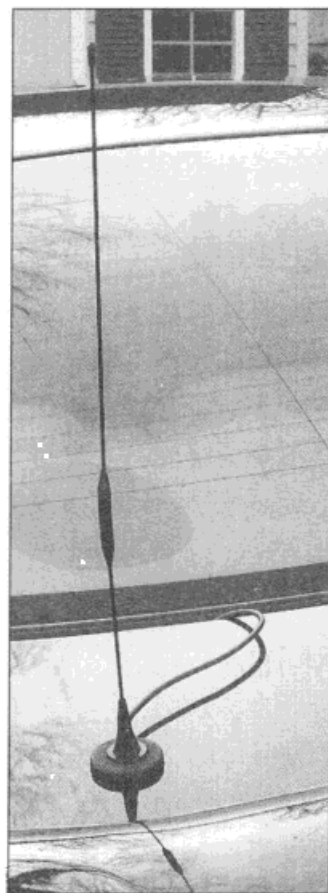


图 5.1 作者本人用这个小型的双频段移动天线就能使 OSCAR 51 上的转发器工作，上行功率仅有 5W

表 5.2 收发信机存储的 OSCAR 51 的转发器信道频率

频 道	时 间	发射 (MHz)	接收 (MHz)
1	AOS (开始)	145.910	435.310
2	AOS+3min	145.915	435.305
3	最高点	145.920	435.300
4	最高点 +1min	145.925	435.295
5	LOS (结束)	145.930	435.290

更重要的是，OSCAR 51 的 FM 中继有时在 2m 波段上行上需要 67Hz 的亚音，但是在写本书的时候，67Hz 亚音静噪暂时关闭了。但无论如何，你依然需要学会设置亚音，以防将来 AO-51 的管理员决定用亚音来阻止某些信号。

我们以表 5.2 为例，当 OSCAR 51 出现在地平线以上的时候选择存储信道 1，3min 后由于多普勒效应对上行和下行信号的影响，转向存储信道 2。你不用紧盯着表，当下行通信信号变差或有杂音时，你就知道需要转换信道了。当卫星达到它的最高点时，转换到信道 3，1min 后选择信道 4 并保持到接近信号消失（LOS）。此时转到信道 5，记录下在此过程中存储信道是如何设置来使得上行频率向上递增同时下行频率向下递减的，这样就保证了对卫星的上行信号和下行信号的多普勒频移补偿。

许多收发信机都允许你用字母来代替存储信道的频率。如果你的电台有此功能，你可以用独特的标识来表示每个不同情况下的存储信道（见图 5.2）。这样，在当卫星飞过上空时，你就不会忘记该选择那个存储信道了。

下面是一些 OSCAR 51 通信操作的小知识：

★ 如果你没有在下行频率上听到任何声音，不要发射。如果你听不到任何信号，而卫星却能收到你的信号，这种情况是很可能出现的。盲目地发射信号会对别人引起不必要的干扰，在 OSCAR 51 通过的覆盖范围内你能通过静噪被开启或听到有噪声或有声音突然出现来判断 OSCAR 51 是否发射。

★ 不要呼叫“CQ”。当操作 OSCAR 51 的 FM 中继器时，你仅需要简单地报出呼号并等待回答的信号，或是回答那些已经报出呼号的人。冗长的“CQ、CQ、CQ、CQ……”呼叫会让你非常不受欢迎。

★ 保持通联对话简短，不要独占卫星。如果你达成通联，非常好，注意保持对话尽可能短。你要记住卫星飞临到离开只有 10 ~ 15min，并且还有很多业余无线电爱好者在等着这个机会，应避免讨论天气、天线等。当然你可能会幸运地发现几乎没有人使用卫星，如果是这样，你可以继续聊，但必须确保留出空余以便其他人可以插入使用。

★ 如果有通联正在进行中，不要打扰，应等到他人通联结束再发出你的呼号。

一个典型的 OSCAR 51 通联可能会像这样：

“WJ1V。”

“WJ1V，这里是 N9ATQ。”

“N9ATQ，这里是 WJ1V，在康涅狄格州的柴郡 Fox Nancy 31，我叫哈罗德。”

“早上好，我在伊利诺伊州的昆西，Echo Nancy 40。我的名字是克雷格，你的信号非常好。”

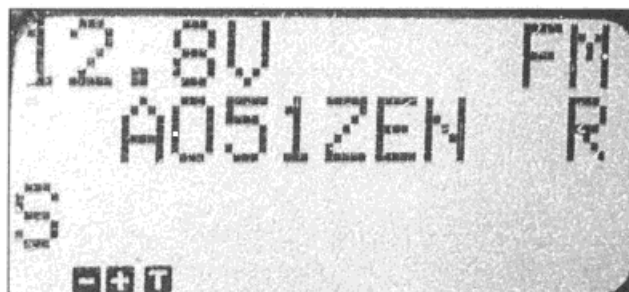


图 5.2 许多收发信机允许你用数字和字母标记存储频道以方便查找。这个收发信机频道被编程为在 AO-51 经过最高点时设定为其上行 / 下行频率

“太好了，我是在车上用 10W 功率发射的。”

“听起来非常清晰，哈罗德。希望能再次遇到你，73！N9ATQ 完毕。”

“73！克雷格，WJ1V 完毕。”

可以看到此对话很短。你注意到上面隐密地提到“Fox Nancy 31”和“Echo Nancy 40”了吗？这些是网格标识，并且他们知道这些标示的含义。

了解自己的网格位置

网格标识用于对你的台站位置的简单描述。在前面的例子中，Fox Nancy 31 意为 FN31，它是中心位于康涅狄格州的一个假想的矩形网格。

这些长方形的方块代表 1 度纬度 × 2 度经度的范围，是梅登黑德（Maidenhead）定位系统的重要组成部分。但火腿们仅用 2 位字母 / 2 位数字来标记（例如 FN24）。这种标识符号可以确定所在地大概位置的经纬度，没有哪两个网格有相同的标识代码，网格标识若再加两个字母可以变得更加精确，如（FN24kp），但火腿却很少使用 6 位版式的标识版本。

火腿互相交换网格位置，这是因为他们想取得各种业余无线电奖状或者标示自己的通联对象的位置，来展示自己在这方面的成就。

几乎所有的奖项，包括 VHF 频段的通联，都需要这种带有位置标识的通联确认（不论是纸质的 QSL 卡还是通过电子方式交换的）才有资格申请，通常一些稀有地区的电台更是受到火腿们的高度关注。

在上述的奖项中，50MHz 以上的最富盛名的奖项是 ARRL VHF/UHF 世纪俱乐部的 VUCC 奖项（见图 5.3）。你也可以申请 VUCC 奖状，获得一个 VUCC 奖是根据你在某频率及通联的数量决定的。相关频率及通联数量的要求可见表 5.3。可见，你必须通过卫星获得 100 个带不同位置标识的通联确认。

表 5.3

VUCC 奖状要求

频 段	所需的不同网格数量
50 和 144 MHz	100
卫星（任何波段）	100
222 和 432 MHz	50
902 和 1296 MHz	25
2.3 GHz	10
3.4 GHz 和以上	5

当与卫星通联时，你已经知道自己位置的大概经纬度，因此你可以根据这些信息来确定你的网格位置。只要登录 www.arrl.org/locate/grid.html 并在该页面输入你所在位置的经纬度，就可以显示你的网格标识代码。

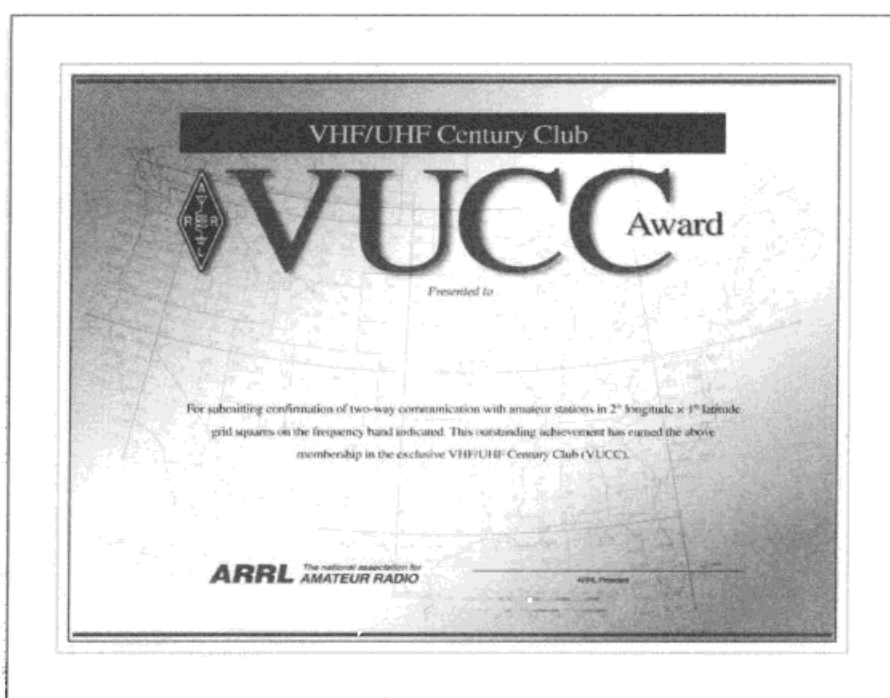


图 5.3 大家梦寐以求的 VHF/UHF 世纪俱乐部奖，你可以通过在 100 个独占网格中联络站点来获得 VUCC，但你不需要通过同一颗卫星来完成这 100 次通信

ARRL 还提供一个网格地图，你可以将它挂在墙上（见图 5.4），在通联过的网格上涂色来追踪自己的通联进程。可以在 www.arrl.org/catalog 上购买到 ARRL 地图。

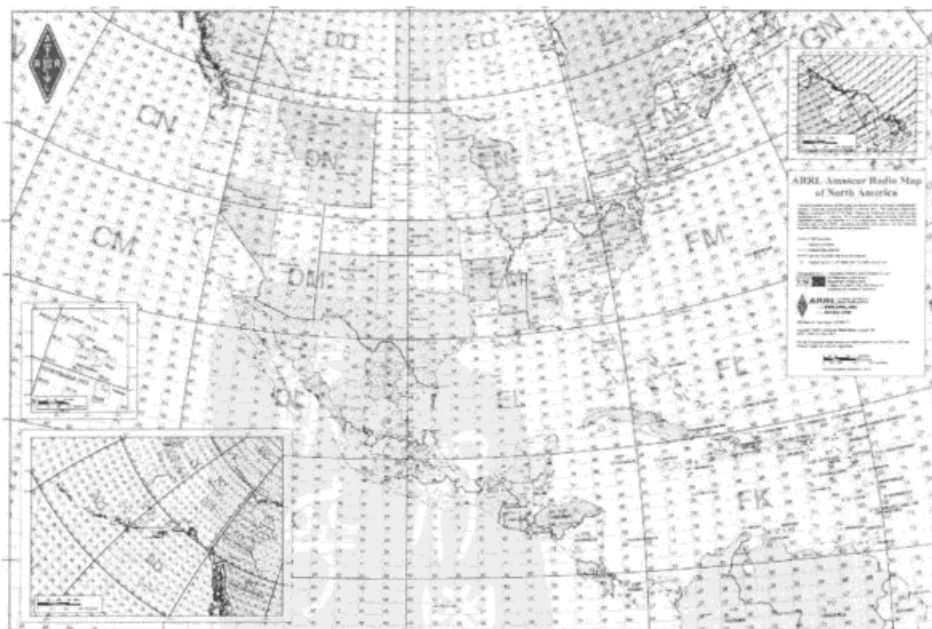


图 5.4 你可以在 www.arrl.org/catalog/?item=8977 上订购一幅 ARRL 北美网格地图

5.1.2 AMRAD-OSCAR27

OSCAR 27 是另一颗流行的 FM 中继卫星，同 OSCAR 51 一样为 V/U 模式。它在 2m 接收并在 70cm 转发信号，但是它还有一些与 OSCAR 51 的不同之处。OSCAR 27 不需要上行亚音频，所以你不用担心收发信机的存储信道设置需要亚音频。在设置存储信道时，你可以参照 OSCAR 27 建议的配置表（见表 5.4）。

表 5.4 用于 OSCAR27 通信的收发信机存储信道

频 道	时 间	发射 (MHz)	接收 (MHz)
1	AOS (开始)	145.840	436.805
2	AOS+3min	145.845	436.800
3	最高点	145.850	436.795
4	最高点 +1min	145.855	436.790
5	LOS (结束)	145.860	436.785

在配置表中我们可以看到 OSCAR 27 最不寻常的地方就是它的工作安排。它的大部分时间都处于 V/U 工作模式（除了发送遥测数据时），但是由于该卫星受限制于能源容量分配，发射机只能是在运行轨道通过北美时的白天部分时间工作。OSCAR 27 依靠星蚀定时算法电源管理系统（TEPR）来工作。

就像 Chuck Wyrick/N1UC 所说的，TERP 计算卫星进入和离开阳光的时间。TERP 数字会每隔几个月进行调整，来符合 OSCAR 27 南北运行时进入和离开阳光的季节性变化。

目前 AO-27 的星载软件系统有 6 种不同的轨道运行状态：

TEPR State 1——卫星进入星蚀区（无阳光区）

TEPR State 2——进入 TEPR State 1 状态后开启一个已设定的定时器（在星蚀期）

TEPR State 3——在 TEPR State 1 定时器开启后，开启另一个已设定的定时器（在星蚀期）

TEPR State 4——卫星进入日照区

TEPR State 5——进入 TEPR State 4 状态后开启的已设定定时器（日照区）

TEPR State 6——进入 TEPR State 5 状态后开启的已设定定时器（日照区）

当 AO-27 卫星在白天经过时，卫星将在星蚀区出来后进入 TEPR State 4，并且开始充电。TEPR State 5 被设定为卫星信号覆盖区域的纬度到达美国地区之前一直停留在 TEPR State 4 状态，之后将转入 TEPR State 5 状态并且发射机开始工作。

TEPR State 5 状态时设置的间隔时间是发射机可以工作的最大时间，并且这样的工作时间可使电池保持良好的寿命周期。在编写本书时，它可以持续约 18min。如果让发射的时间

更长，那卫星的寿命将缩短。TEPR State 6 设置的时间间隔需要让 AO-27 再次进入星蚀区 (TEPR State 1) 时有足够的充电时间。

AO-27 在 TEPR State 6 状态设置的时间间隔限制了南方的火腿使用卫星，用图 5.5 说明下面的例子。

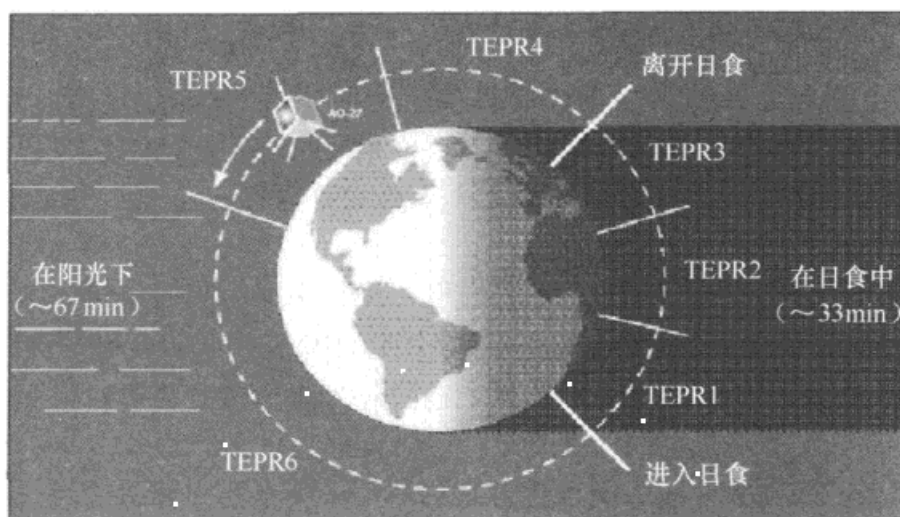


图 5.5 由于 OSCAR 27 的供电限制，转发器只能在日光期路过北美半球的部分时段处于开启状态。
为了电池系统，OSCAR 27 依赖于一种称为日蚀计时电源管理的方法 (TEPR)

AO-27 将充电时间设置为 “x” min，进入光照区后卫星的电池是按 TEPR State 4 的间隔设置单位 $\times 30s$ 来递增计算的。比如 42 的 TEPR 4 值等于 21min ($42 \times 30s = 1260s$ 或 21min)。

TEPR State 5 设置间隔多长时间开始发射是从 TEPR State 4 状态开始的时候设定的，而不是在 TEPR State 4 状态结束后设定的。例如，TEPR State 5 设置时间单位是 78，那么就意味着发射机将在 TEPR State 4 状态开始后 39min ($78 \times 30s = 2340s$ 或 39min) 关闭。因此，发射机将在 TEPR State 4 状态结束时开启并在 TEPR State 5 状态结束时关闭，而整个发射过程是 18min ($78 - 42 = 36$, $36 \times 30s = 1080s$ 或 18min)。

如果你觉得 TEPR 这个概念很难理解的话，也不用担心，只要记住 OSCAR 27 只能在白天操作就可以了。

在通联方法方面，OSCAR 27 和 OSCAR 51 是一样的——简短的对话和交换网格代码等，同时对相关设备的要求也基本相同。但是，OSCAR 27 的使用者报告说，使用定向天线远比使用全向天线更有效。这可能是为了让老化的电池能使用更长的时间，AO-27 卫星的下行信号发射功率刻意设置得非常低，通常是 500mW 或更低。

你有可能会听到 OSCAR 27 发出“嗡嗡”的数字信号的声音。这个卫星常被用于新技术实验，特别是在火腿们越来越感兴趣的数字通信方面。例如 2007 年，一些业余无线电爱好者使用 AO-27 进行了 D-STAR 数字中继试验。

5.1.3 OACAR 50

Saudi-OSCAR 50 是一个类似于 OSCAR 51 的 V/U 模式的中继卫星，但是具有与众不同的通信接入方式。这颗卫星需要 2 个亚音频，一个用来触发卫星工作，另一个用来接通每次发射。

在 OSCAR 50 响应上行信号之前，它需要一个时长 2s 的 74.4Hz 上行触发亚音频。一次成功的触发可以激活一个 10min 的定时器。任何信号的转发都必须遵照此规则，就像 OSCAR 51 必须使用 67Hz 的亚音频一样。要重新设定计时器，必须再次发送 2s 长的 74.4Hz 亚音频。

由于必须要使用触发信号且其下行信号较弱，使得它成为利用率较低的 FM 模式中继卫星。这种低利用率反而成为一种优势，因为较少的信号更能引起收听者的注意。

当 OSCAR 50 从地平线升起时开始收听，注意，如果你听到声音，很明显这意味着已经有人触发启动了 10min 计时器，如果没有听到，这时你就有机会启动计时器并转发信号。表 5.5 是 OSCAR 50 对于多普勒补偿的信道设置方案，使用一个不同的信道来启动卫星。方案中使用字母与数字来标记存储的信道，非常容易识别。你可以标记一个信道为“SO50 OPEN”并同时使用 74.4Hz 的亚音频，而其余的信道使用 67Hz 的亚音频工作。通过这种方式，你就能快速选择正确的发射 / 亚音频组合来触发 OSCAR 50 的计时器，然后再转到其他带有多普勒补偿的信道工作。

表 5.5 收发信机存储的 OCSAR 50 频道

频 道	时 间	发射 (MHz)	接收 (MHz)
1	AOS (开始)	145.840(67 Hz CTCSS)	436.805
2	AOS+3min	145.845	436.800
3	最高点	145.850	436.795
4	最高点 +1min	145.855	436.790
5	LOS (结束)	145.860	436.885
6	重设计时器	145.850(74.4 Hz CTCSS)	

5.1.4 AMSAT-OSCAR 16

OSCAR 16 寿命周期的大部分时间用来进行业余电子邮件和数字信号的转发工作。在 2008 年，OSCAR 16 控制小组上传了新的软件并激活了一个新的功能，使它转变成一个单信道的语音中继卫星。这个中继器有些与众不同，尽管它接收 2m 波段的 FM 上行信号，却在

70cm 波段转发 SSB 模式的下行信号。

OSCAR 16 这个不同寻常的多模式方式意味着你需要一个多模式（FM 和 SSB）收发信机来配合卫星工作。或者至少有一个 2m 波段的 FM 上行和一个单独的 70cm 波段的 SSB 模式的电台（见图 5.6）。你也可以方便地设置带有多普勒补偿的存储信道（见表 5.6）。但是窄带的 SSB 下行信号变化很快，要求你手工调整接收 VFO 频率来补偿或通过计算机来控制调整。

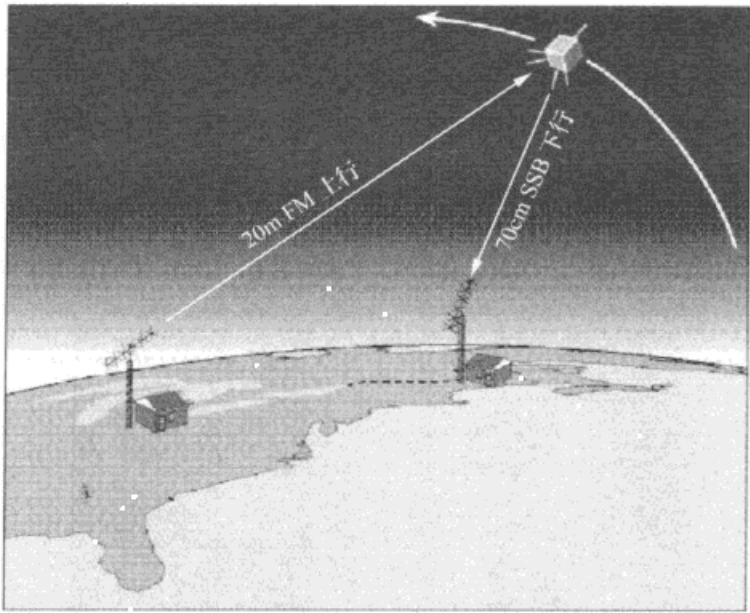


图 5.6 要使用 OSCAR 16，你需要在 2m 波段发送 FM 信号并在 70cm 波段用 SSB 收听

表 5.6 收发信机存储的 OCSAR 16 频道

频 道	时 间	发射 (MHz)	接收 (MHz)
1	AOS (开始)	145.910	437.036
2	AOS+3min	145.915	437.031
3	最高点	145.920	437.026
4	最高点 +1min	145.925	437.021
5	LOS (结束)	145.930	437.016

当 OSCAR 16 在地平线上出现时，请将你的 FM 收发信机频率调整到上行频率 145.910MHz 和下行频率 437.036MHz。就像对于所有卫星一样，直到你听到下行信号再开始发射信号，当你听到信号时，用一只手调整下行信号的接收机，保持接收信号的清晰度。另一只手在必要的时候迅速切换 FM 模式的信道或调整 FM VFO 频率。尽管你不必全双工地操作来维持 OSCAR 16 的信号，但是这也不是一个坏主意。在下行接收机上一定要使用双耳耳

机监听信号以避免通过 FM 上行链路产生反馈。

OSCAR 16 有一个灵敏度很高的接收机和一个较强的发射机，因此作为一个 FM/SSB 模式的中继器，它吸引了相当多的活动。考虑到这一点，你应该像操作其他单信道卫星一样保持尽可能简短的对话，以便更多人都有机会通联。由于这颗卫星被用于各种试验，所以它可能会变更不同的状态，请在 www.amsta.org 网站关注 OSCAR 16 的当前状态。

5.1.5 国际空间站

由于 ARISS (the Amateur Radio on the International Space Station) 国际空间站业余无线电计划使得国际空间站在业余卫星通联活动中占有重要地位。也许你通过媒体看到过空间站的工作人员使用业余无线电设备与小学生交谈的故事（见图 5.7），这些是业余无线电爱好者在帮助学校建立和使用必要设备而事先安排好的联络。

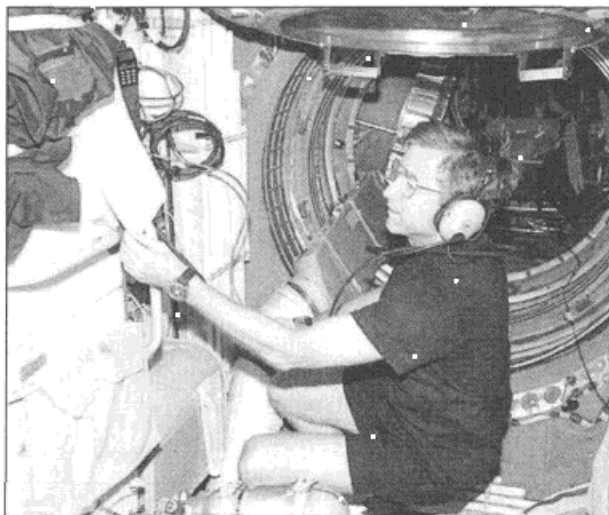


图 5.7 宇航员 Frank Culbertson/KD5OPQ 使用国际空间站上的业余无线电台与地面爱好者通联

ARISS 也支持数字通信，我们将在后面进行讨论。空间站上携带有一个 FM 模式的语音中继器，有时候空间站工作人员会拿起话筒呼叫，往往令直接与之通联的业余爱好者感到非常惊讶。

ARISS 的工作安排受到国际空间站上其他活动的限制，比如，每当补给或与其他部分进行对接时，业余无线电设备都会关闭（见图 5.8）。关于国际空间站相关活动的安排，你可以在 www.amsta.org/amsta-new/satellites/status.php 上关注 AMSTA 卫星的状态。

如表 5.7 所示，FM 语音中继处于跨段工作模式时，在 437.800MHz 接收，并在 145.800MHz 转发。这是一个常规的 FM 语音中继，可以使用标准的双频段 VHF/UHF FM 模式收发信机。像使用 OSCAR 51 一样，应尽量保持简短的对话，这尤其适用于空间站，因为它所处的轨道较低，轨道飞行的最佳信号覆盖时间只有 10min。

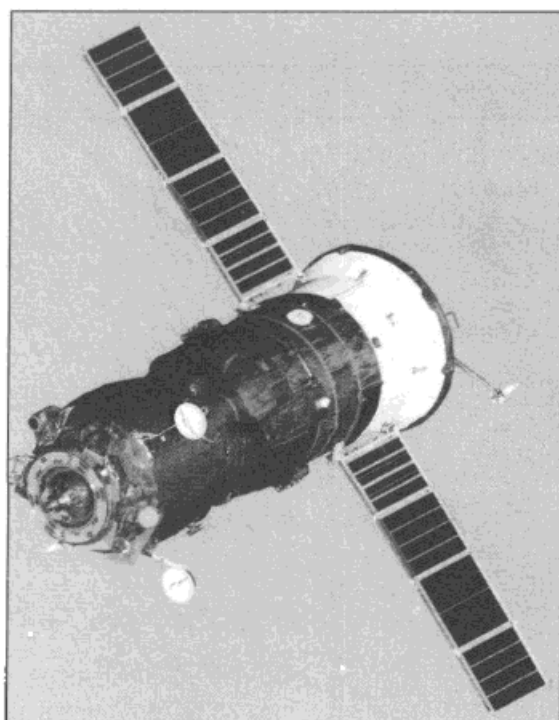


图 5.8 俄罗斯进步号 (Progress) 货运飞船停靠在国际空间站上。在此期间 ARISS 设备会被关闭

表 5.7

目前在使用中的业余无线电卫星

2008 年 9 月的卫星	上行 (MHz)	下行 (MHz)	模 式
AAUSAT-II	—	437.425 (packet)	Telemetry
AMSAT-OSCAR 7		29.502	Beacon
		145.975	Beacon
		435.106	Beacon
	145.850 ~ 145.950	29.400 ~ 29.500	SSB/CW,non-inverting
	432.125 ~ 432.175	145.975 ~ 145.925	SSB/CW,inverting
AMSAT-OSCAR 16	145.920(FM)	437.026(SSB)	FM/SSB repeater
AMSAT-OSCAR 27	145.850	436.795	FM repeater
AMSAT-OSCAR 51	145.920	435.300	FM repeater
			CTCSS required
	145.880	435.150	USB/FM voice
	145.880	2401.200	FM voice
	145.860	435.150	9600 bps digital
	145.860	2401.200	9600 bps digital
	1268.700	2401.200	FM voice
	1268.700	435.150	FM voice
ARISS(ISS)	144.490	145.800	Crew contact,FM(Rgn.2/3)

续表

2008 年 9 月的卫星	上行 (MHz)	下行 (MHz)	模 式
	145.200	145.800	Crew contact,FM(Rgn.1)
	145.990	145.800	Packet BBS
	145.825	145.825	APRS digipeater
	—	144.490	SSTV downlink
	437.800	145.800	FM repeater
Compass-One	—	437.275 (CW)	Telemetry
	—	437.405 (packet)	Telemetry(including images)
CubeSat-OSCAR 57	—	436.8475(CW)	Telemetry
		437.4900(packet)	Telemetry
CubeSat-OSCAR 58	—	437.4650(CW)	Telemetry
		437.3450(packet)	Telemetry
CubeSat-OSCAR 66	—	437.485(packet)	Telemetry(including images)
Cute 1.7+APDII	1267.600	437.475	9600 baud packet
Dutch-OSCAR 64	145.870(packet)	Telemetry	
	435.530-435.570	145.880 ~ 145.920	SSB/CW,inverting
Fuji-OSCAR 29	145.900-146.00	435.800 ~ 435.900	SSB/CW,inverting
Gurwin-OSCAR 32	145.930	435.225	9600 baud APRS packet
	145.850		9600 baud APRS packet
	145.890		9600 baud packet
	145.930		9600 baud packet
	1269.700		9600 baud packet
	1269.800		9600 baud packet
	1269.900		9600 baud packet
Navy-OSCAR 44	145.827	145.827	1200 baud APRS packet
Saudi-OSCAR 50	145.850	436.795	FM Repeater—67 Hz
			CTCSS required
Sumbandila-OSCAR 67	145.880	435.350	FM Repeater 233.6 Hz
VUSat-OSCAR 52	—	145.860	CW Beacon
		145.936	Carrier Beacon
	435.220-435.280	145.870 ~ 145.930	SSB/CW,inverting
Hope-OSCAR 68	145.825	435.675	FM Repeater-67 Hz
	145.925-145.975	435.765 ~ 435.715	SSB/CW,inverting
	145.825	435.675	1200 baud packet

和宇航员直接联络的机会往往在你最意想不到的时候发生。当你正在收听 145.800MHz 的声音时，突然听到了宇航员正在呼叫 CQ，你应该马上调整你的收发信机，让上行信号工作在 144.49MHz 并开始呼叫（有个好主意，你可以提前设定相关频率的存储信道来应对这种突发事件）。如果宇航员回答了你的呼叫，一定要确保简短的谈话，报出你的姓名、位置等即可。要知道，还有很多火腿想和宇航员进行通联。

5.2 线性转发器卫星

单信道卫星吸引人的地方在于，与此类卫星通信时地面站所需的设备非常少，而它们最大的缺点是不能在同一时间进行多个通信。在使用此类卫星时，你常常要面临缩短通信时间的压力，以便其他人也能使用该卫星。

相反，线性转发器可以同时转发一段频谱，而不是单一的频道，因此它们支持多个信号同时通信，但有时也会出现相互干扰的问题，本书稍后再做说明。一旦与此类卫星建立通联，便可不限时地与其通信——至少在卫星的可用时间内如此。近地轨道卫星的通信时长在 10 ~ 15min 不等。如果是高轨道卫星的话，其通信时长可达数小时。

5.2.1 典型转发器

在编写本书时还没有任何可用的高轨道卫星，所有的线性转发器卫星都在近地轨道上运行。参看表 5.7，你可以发现 4 种线性转发器卫星：

AMSAT-OSCAR 7

VuSAT-OSCAR 52

DUTCH-OSCAR 64

FUJI-OSCAR 29

这些卫星很容易识别，图表中显示它们的上行和下行频带。其带宽为 40 ~ 100kHz。也就是说，即使带宽只有 40kHz 的转发器，例如 DUTCH-OSCAR64 转发器，也能支持 12 个同时的单边带通信以及更多的 CW 通信。

你也可以看到一些转发器被注明为“倒频”或“非倒频”。倒频转发器转发的是上行传输频谱的镜像。这意味着上行传输时的上边带信号在下行传输时变成了上边带信号。同时，上行传输频带高端的信号会出现在下行传输通频带的低端，请看图 5.9 中的例子，非倒频转发的上行信号将不变地出显在下行频带内——边带类型没有改变，并且上行输信号在下行传输通频带里的相对位置也没有改变。

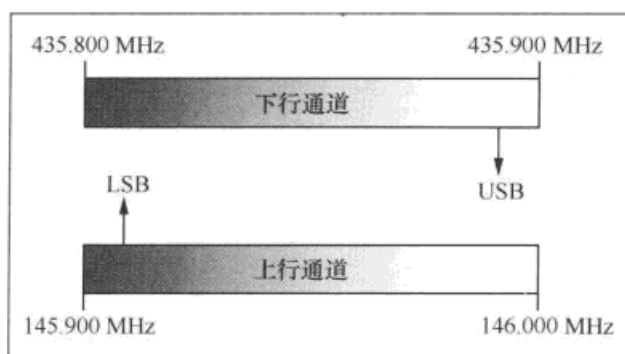


图 5.9 一个倒频转器的例子。LSB 信号从上行通道中的低端变为下行通道中的高端

由于设计的原因，大多数线性转发器都是倒频型的。这给通信带来了极大的挑战。例如，当你提高上行传输频率时，下行传输频率却在下降——方向完全相反。幸运的是，很多收发信机都能进行可变频率振荡器（VFO）倒频跟踪（见图 5.10）。它以反向的方式锁定上行和下行传输的 VFO，例如，你改变上行传输 VFO 使信号频率增加 5kHz 的话，下行传输（接收）VFO 也会自动下降相同的频率。



图 5.10 一个收发信机的范例（Kenwood TS-2000），在倒频模式下使用双 VFO 工作模式。
在用于接收的主 VFO 调整好以后，副 VFO（在右边）会同步跟踪

5.2.2 找到你自己和别人

强烈建议使用线性转发器卫星时采用全双工通信方式。由于单边带信号和 CW 信号的带宽相对较窄，因此多普勒效应也会更加明显。在传输时，你需要听到自己的信号以便调整下行传输接收机来保持音调或者声音清晰度。

可以用计算机预测多普勒频移并让接收机自动调整（假设你的无线电地面站是由计算机控制的），计算机尽管其预测结果最多只是高科技猜测而已。如果想更精确的话，你就需要一副耳机，通过听自己的下行传输信号来校正多普勒频移（耳机对于避免噪声来说是必须的）。

在第一次进行与线性转发器卫星通信前，最好在卫星经过时先练习接收自己的信号。让我们举例说明，假设使用 VuSAT-OSCAR 52（一个较受欢迎的使用线性转发器的卫

星) 并进行单边带通信。图 5.11 说明了上行传输和下行传输相对于彼此的通频带频率。如果以 435.230MHz 作为向上传输频率的话, 你在 145.920MHz 左右会听到你自己的下行信号。对于单边带来说, 惯例是在上行发送下边带 (LSB), 在下行传输时会转变成上边带 (USB)。

如果你使用的发射机和接收机是分开的话, 把发射机设置为 435.230MHz LSB 并保持这一值。如果你用的是能进行 VFO 跟踪的多波段卫星收发信机的话, 对频率跟踪“解除锁定”, 并把转发器的 VFO 设置为 435.230MHz LSB。

当 OSCAR 52 上升到地平面上时, 在 2m 下行通带内迅速转动接收机 VFO 搜索信号 (另外一个方法是, 如果可行的话, 听卫星的信标信号), 只要听到信号, 就把接收机调至 145.920MHz。如果频率较干净的话, 就开始发射报出你的呼叫或者呼叫“testing”。在你说话的同时, 在 145.920 ~ 145.930MHz 之间来回调整接收机频率。这个过程可能会需要几分钟, 但幸运的话, 你很快就能从噪声中听到自己的声音, 在这么做时要快速调整直至你的声音变正常为止。恭喜! 你刚刚听到了卫星转发自己的信号。

此时试验的好时间。停止调整接收机的频率, 并留意多普勒效应如何改变你的声音, 再次练习调整频率来让你的声音保持正常。如果你用的是卫星通信专用的收发信机, 试着锁定上行发送和下行接收的 VFO, 并观察反向追踪是如何影响你的信号的。

435.280	145.870
435.270	145.880
435.260	145.890
435.250	145.900
435.240	145.910
435.230	145.920
435.220	145.930
上行 (MHz)	下行 (MHz)

图 5.11 VuSAT-OSCAR 52 中的上行和下行频率的关系。在左边选中一个上行频率然后你就会看到它的相应下行频率显示在右边

5.2.2.1 呼叫任何人 (CQ)

适应了找自己的信号后就要试着进行呼叫。把上行发射机和下行接收机调整到你选择的频率 (如果你的电台有 VFO 跟踪功能的话, 确保此时它处于非锁定状态)。当卫星进入有效范围后, 在听到下行传输中的自己的信号时开始进行呼叫。一旦听到就必须调整接收机使你的声音保持正常。

如果听到一串 CW 嘀哒声的话, 不要感到奇怪, 这是好事——这发射频率是听到你呼叫的人用 CW 电键发出一串连续莫尔斯码“滴”来迅速调整其发射频率。他们在试着听自己的信号, 并把其信号调至你的信号频率。或者, 你可能会听到一个高音调的声音突然变低“进入”你的 CQ。这是另外一个听见你声音并准备回答的台站。

“一旦你对找到自己的信号熟悉起来, 那就试试呼叫 CQ 吧。”

通信开始以后, 你要做的只是调整接收机使你和其他操作者的声音保持正常。如果你的通信伙伴操作正确的话, 他也在做同样的事。切记不要调整发射频率。

5.2.2.2 回答 CQ

当你在回答别人的 CQ 时，能进行 VFO 跟踪的全双工无线电收发信机能带来很大的便利。对上行和下行信道的 VFO 进行了设定后，开启跟踪功能将它们锁定在一起。然后你只需用接收机 VFO 调整下行频率，上行频率会自行调整。如果发现有人呼叫 CQ，收听并关闭频率跟踪。你的上行发射 VFO 就能独立调节了，慢慢调整向上发射 VFO 使信号出现在下行频率上，然后开始回答其呼叫。一旦你的频率与他的频率相匹配（下行信号中你的声音或 CW 音调听起来正常）时，就不要再碰发射 VFO。开始享受这次通信并调整下行（接收）VFO 来校正多普勒频移。

如果你使用的上行和下行设备是分开的，你就需要在收听他台呼叫 CQ 后估算正确的相应上行频率，画一个类似图 5.11 所示的图表会很有帮助。然后开始回答并调整上行频率，直到你的信号与他的信号在下行中相匹配。

5.2.2.3 拥挤的频带

在通信的时候，你可能与其他人共用一个转发器。由于多普勒效应，所有的下行信号——包括你的，都在通频带中发生偏移。如果所有人都遵从同样的操作协议——只调整接收机频率的话，那么所有人都会以同一速率进行偏移，任何通信之间都不会发生“冲突”。

遗憾的是，你不能指望所有人都遵从同一规则。有许多台站在发射的时候调整上行频率，这样可以使他们固定在下行通频带中的一个频率上。但其他人的信号频率却在飘移，最后也许其他的通信也都飘移进来了。

鉴于这类情况，在准备呼叫 CQ 的时候要尽可能地拉开你与离你最近的通信信号间的频率间距。理想的距离是 10kHz，但在较拥挤的转发器中并不是总能达到这一数值。

5.2.3 多大功率才足够

上行功率和线性转发器的问题一直存有争议。当然，你肯定想使用足够的功率以便能听到下行信号。对于低轨道卫星来说，只需 30 ~ 50W 就足够了，使用的天线不同，所需的功率也会有所不同。对于高轨道卫星来说，100 ~ 150W 的上行功率是很常用的。

遗憾的是，一些业余爱好者迷信“越多越好”，可以听到的信号还不够——他们想要特别响亮的信号。其中一些人使用定向天线操作近地轨道卫星，并且常常使用 100W 甚至更大的输出功率，这样的话，等效辐射功率可超过 1kW。

“对于高轨道卫星来说，上行功率 100 ~ 150W 是正常的。”

强信号导致线性转发器的接收机被阻塞。所有比大功率台站的信号弱的信号都会在下行信号中被极大地削弱，有的也许会集体消失。这是因为卫星的大部分输出功率都被用于转播响亮的上行信号而无暇顾及其他。

“过度占用转发器”的问题十分常见，因此 AMSAT-OSCAR 40 的设计者们发明了一种 LEILA(功率限制指示器)。正如我们在第 3 章中讨论过的一样，LEILA 的计算机不间断地监视频率为 10.7MHz 的转发器的中频通频带。无论什么时候，只要遇见超过预期水平的上行信号，计算机都会在入侵者的下行信号中插入 CW 信息。当听到这个信息时，你应迅速减小上行功率。如果你忽略这个警告信息的话，LEILA 会启动一种陷波滤波器，将你的信号滤掉，不遵守游戏规则的人将被淘汰出局。在编写本书时，没有任何卫星有 LEILA 系统（尽管下一代高轨道卫星很可能会有）。

想要在使用线性转发器时做一个好邻居，其基本原则就是你所使用的功率能把你的信号保持在与别人的信号同等强度即可。另外一个方法是，如果卫星有遥测信标的话，将该信标作为下行信号的强度标准。换句话说就是你的下行信号永远不能大于此信标。

通信模式与功率

你肯定注意到了我们还没有讨论线性转发器中 FM 的使用问题。没有任何规定说不能通过此类卫星传输 FM 信号，但这种行为会被认为是极差劲的业余无线电爱好者才会做的事。主要的问题并不在于 FM 的信号带宽——尽管也应把这一因素考虑在内，而在于 FM 是 100% 负载周期通信模式，这意味着 FM 发射机在整个发射过程中要动用其全部的输出功率。如果线性转发器要转发 FM 号的话，只要地面站在上传信号，它就要使用最大功率来进行下行传输。这不仅减弱或消除通带内的其他所有信号，也给卫星的电源系统带来了极大的压力。

业余无线电卫星没有商业卫星或军事卫星那样强大的电力供给，这就是线性转发器选择使用单边带和 CW 模式的原因。工作在单边带和 CW 模式的地面站的发射功率波动很大，平均负载持续率为 50% 或小于 50%，在业余卫星转发器和电源系统的可接受范围之内。

谈到了卫星的电源系统，我们不妨再说一个特殊的案例，AMSAT-OSCAR 7。你也许还记得，在第 1 章中我们说过 AO-7 是一个“奇迹般的卫星”，它在沉寂了几十年后又开始工作，它依靠一个损坏了的电源系统。AO-7 使用的是 V/H 和 U/V 模式的线性转发器（见图 5.1），但只有当太阳能电池板接收到足够的阳光时它们才能发挥作用。目前 U/V 是最受欢迎的模式，但要注意 AO-7 有随时地改变其操作模式的可能性，尤其是当它经过星蚀时更是如此。

由于 OSCAR 7 的电源系统几乎不能工作，因此它很“脆弱”并应特殊对待。它的转发器不能为下行传输提供充足的输出功率，所以你要尽可能限制上行发射功率。如果听到你的下行信号在迅速地改变频率或者“颤抖”的话，这意味着电源系统的负担过重，这时应马上减小上行传输的发射功率。

5.2.4 高轨道卫星通信需考虑的因素

尽管在本书出版之时还没有任何的高轨道卫星，但两个此类卫星正在建造之中——AMSAT-DL 的 Phase 3E 和 AMSAT-NA 的 Eagle(见图 5.12)。如果一切都按计划进行的话，其中之一或两者都能在几年之内进入轨道。在 www.amsat.org 的 AMSAT 网站上可了解最新动态。

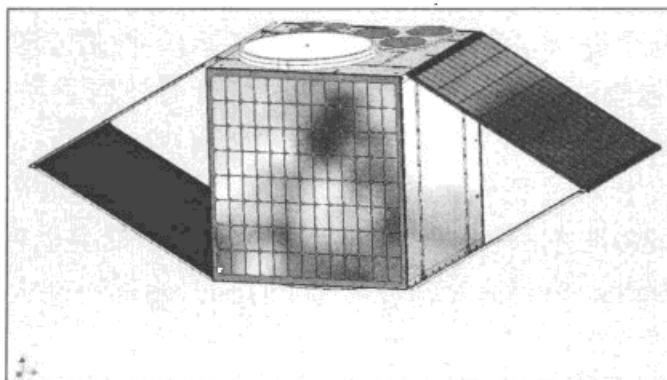


图 5.12 AMSAT Project Eagle 卫星的外形图。这个高轨道卫星预计将在接下的几年间升空

这两个卫星都会在某几个波段使用线性转发器并且近地轨道卫星通信技术也同样适用。然而，这些高轨道卫星的转发器最有可能按照卫星在轨道上的不同弧段来安排工作，这意味着你要在通信之前先要熟悉卫星的轨道，详见第 2 章中有关卫星在轨道上位置的讨论。

如果你通联的高轨道卫星在椭圆形轨道上运行的话，那么当卫星到达远地点时，多普勒效应会减弱。在轨道的这个位置，卫星与你的台站之间的相对运动是最慢的，因此多普勒效应也最弱。如果能幸运地获得与地球同步的高轨道卫星转发器的话，你根本就不必担心多普勒效应的问题。

全双工通联高轨道卫星仍然是一个不同寻常的挑战。卫星在椭圆形轨道的远地点时，它离我们的距离可达 50000km 之远。由于距离过于遥远，因此无线信号从上行至卫星到回到地面需要 3/10s 的时间。如果你在下行信号中听自己的信号，你可以很明显感觉到时间的延迟。许多操作者都不能接受这 3/10s 的延迟——它会扰乱对话，让你变得结结巴巴或声音变调。解决这个问题的方法是，在讲话时关掉接收的音频信号。当卫星在远地点时，你不必太担心多普勒效应，因此也不必一直听自己的下行信号。

5.3 数 字 卫 星

在“互联网”这个词变得家喻户晓之前，业余卫星操作者通常都使用分组无线网来共享

电子邮件、二进制文件以及其他数字信息。这要归功于数字中继卫星，尤其是在 20 世纪 90 年代由业余无线电爱好者开拓的 MicroSats。

互联网的兴起极大减少了业余分组无线网在地面以及太空中的活动。即便如此，仍有部分业余卫星爱好者使用这种数字通信手段，并且仍然有支持这种创新性活动的卫星。

5.3.1 TNC——分组无线网的中心

正如第 4 章中所述，TNC——终端节点控制器，是任何数字卫星地面站的核心。它像是计算机与无线电台站之间的中间人。TNC 从计算机中获取数据，创建 AX.25 数据包，然后把 AX.25 协议的数据转化成射频信号以便通过无线电收发信机发送。反过来，TNC 将收到的信息进行解调，再次将其转换成数据，拆分 AX.25 数据包并把结果发送给计算机。

对于 1 200 波特的应用来说，TNC 输出音频移频键控（AFSK）信号。1 200 波特的分组无线通信是最常见的。对于产生 1 200 波特的信号来说，1 200Hz 表示一个传号或比特“1”，2 200Hz 表示 1 个空号或比特“0”，连续的传号和空号波形之间以 1 200 波特的速率进行转换。1 200 ~ 2 200Hz 的频率适用于宽带 FM 无线电设备的音频带宽，因此 AFSK 发出的频率 1 200 和 2 200Hz 信号可直接输入到标准的 FM 语音收发信机的话筒输入端。

9 600 波特数据包使用频移键控（FSK），并且这种信号必须通过无线电收发信机专用的 9 600 波特的硬件接口。这确保收发信机能在不失真的前提下传输这些信号。幸运的是，大部分卫星通信用的无线电收发信机都能做到这一点，并且都有 9 600 波特信号所需的专用硬件接口。

所有的 TNC 功能都相同。当买单独的 TNC 时通常会带有一根可以把它与无线电台连接起来的电缆，但需要你自已来进行连接的工作，还要自备连接 TNC 和计算机通信端口的电缆。大多数情况下使用的都是 RS-232 串行电缆。在编写本书时，尽管要购买转换电缆和软件才能连接 RS-232 串行 TNC 接口和计算机的 USB 硬件接口，但大多数的业余无线电爱好者还是使用 TNC 联接到 USB。

“所有的 TNC 在功能上都相同。当你买下一台 TNC 时它通常都包含有一根用于和无线电台连接的电缆，但是你需要为联接无线电台准备一个合适的插头。”

注意，在使用本章稍后将提到的 WiSP 软件时，你的 TNC 必须能以 KISS（Keep it Simple, Stupid）模式运行。KISS 模式直接在无线电台和计算机之间传输数字信息，不需要特别指令等。大多数 TNC 都以 KISS 模式运作，但有一些不是——尤其是无线电收发信机里集成的 TNC。你要提前检查并确认这一情况。

任何终端软件都能检测由 TNC 到计算机的通信（微软 Windows 98 和 XP 就包含这种应用程序）。你需要启动该程序，具体说明你要使用的通信端口并且设定该端口的波特和数据

参数，这个过程要参照你所选择的具体软件的使用说明。计算机的波特率必须与 TNC 的相匹配，有的 TNC 会自动调至匹配，有的需要软件指令或开关来进行设置。同样，这个过程也要参照具体的操作说明。在设置数据参数的时候，8-N-1 很常用，8 个数据位，没有奇偶性，1 个停止位。但是计算机与 TNC 的参数必须像波特率一样达到匹配。

5.3.2 卫星的自动位置报告系统 (APRS)

自动位置报告系统，也称为 APRS，是由 Bob Bruninga(WB4APR) 发明的。事实上，APRS 是 WB4APR 注册的商标。最初 APRS 是用来追踪移动的物体，这也是其目前最受欢迎的项目。

APRS 站点发送位置信息，由接收点解码。站点的位置在计算机生成的地图上由符号（被称为图标）来表示。当站点发生移动并发送一个新位置时，图标也会跟着移动。

任何关于 APRS 的讨论都必须从其核心技术——全球定位系统 (GPS) 谈起。

5.3.2.1 GPS 和 APRS 的发展

全球定位系统 (GPS) 是以卫星为基础的无线电导航系统。它使用 24 颗卫星进行极为精确的定位，可以在任何时间，不论白天还是黑夜，找到地球上的任何一个地方（见图 5.13）。虽然 GPS 是目前最受欢迎的电子导航系统，它却不是第一个提供此类服务的。在它之前有很多为人熟知的电子导航系统，包括无线电测向机 (RDF)、双曲线导航系统 (OMEGA、DECCA、Loran-A 和 Loran-C) 以及第一个以卫星为基础的导航系统——TRANSIT。

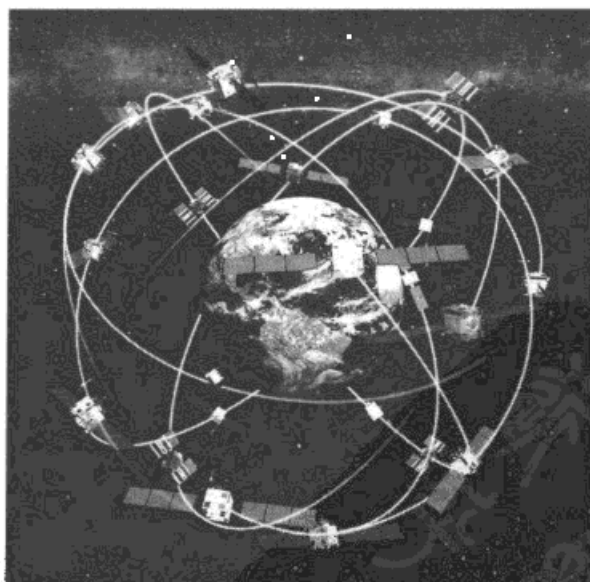


图 5.13 全球定位系统 (GPS) 是一个以卫星为基础的无线电导航系统，它用 24 颗在轨卫星带来能在任何时间和地点上高精度的定位能力

GPS 由美国国防部拥有和管理,其官方名字为 NAVSTAR,是导航卫星定时和测距 (NAVigation Satellite Timing and Ranging) 的首字母缩写词。为了满足美国对用于军事和情报组织的高精确电子导航器系统的要求,美国国防部于 1973 年开始研发 GPS。美国空军指定为这一提供多种服务的项目的指挥机构。第一颗 GPS 卫星是在 1978 年 2 月 22 日发射的。

最初, GPS 的使用被严格限制,只能用于军事用途。但在 1983 年前苏联击落了大韩航空 007 航班后,情况发生了改变。这个悲剧发生的部分原因是韩国 747 飞机的机组人员在导航时出了差错,把飞机带到了前苏联领空而被前苏联人击落。有争议说,如果可以使用 GPS 的话就能避免这场悲剧。因此,里根总统颁布了一项行政法令,准许在全世界范围内,部分 GPS 系统可免费用于非军事用途。然而,美国军方坚持要降低该部分 GPS 系统的准确性,防止其被美国的敌方暗中利用。当 GPS 中的标准定位服务向民用用户开放时,美国向其施加了选择可用性技术 Selective Availability, 以此把准确度降低了 50 ~ 300 英尺。

即使部分 GPS 向公众开放了,可用的 GPS 接收机也非常少,并且十分昂贵。在 1991 年沙漠风暴期间, GPS 使用得非常广泛,但军方发现没有足够的 GPS 接收机可供使用,于是他们通过多种渠道获得了大量的接收机并将其应用到沙漠风暴中,导致大量技术流入民用部门,反过来也使得高科技 GPS 接收机出现在民用市场上。尽管在开始的时候, GPS 接收机非常昂贵,但该技术的广泛接受性以及大量接收设备的出现导致了出现定位误差在 10 英尺之内且价格低于 100 美元的设备。

经过多次研究和游说国会后,克林顿总统宣布自 2000 年 5 月 2 日起,选择可用性技术 (SA) 将被永久关闭。从那以后,非军事领域中 GPS 的准确性得到了极大改善,并且军方还发明了一种在不影响世界其他地区的前提下降低某些地区 GPS 准确性的方法。

人们能支付得起的 GPS 接收机瞬间变成了可能,很快 WB4APR 以及其他一些人便开始试用。他们发现,获取 GPS 接收机的数据流以及通过业余无限分组网传送位置信息是可行的。在接收端,人们用特殊软件来解码位置信息,并在计算机生成的地图上做出标识 (图标)。不论何时,只要 GPS 接收机发生移动,一个新的位置报告就会被发出。接收点解码该信息后会把图标“移动”到新位置上去,这样就诞生了今天我们所熟知的 APRS。

实际上,目前地球上所有的 APRS 活动的频率都是 144.39MHz,并且都使用 1200 波特的分组 TNC 和普通的 FM 话音收发信机。过去几年,APRS 转发站的数量激增,在全美及其他地区建立了一个广阔的网络系统,APRS 信息也被放到了因特网上。业余无线电爱好者 (或非爱好者) 都可以在诸如 www.wulfden.org/APRSQuery.shtml 之类的网站上浏览业余 APRS 站点的信息。

“对 APRS 进行透彻的讨论就大大超出本书的范围了。想要对此加深了解,请翻阅 ARRL《VHF/HF 数字通信手册》。”

APRS 软件可应用于 Windows (UIView: www.ui-view.org), MacOS (WinAPRS: www.wulfden.org).

winaprs.com) 和 Linux (Xastir: xastir.sourceforge.net)。有些软件还带有精确的地图, 其精细程度可达每条街道。

除了常见的分组 TNC 外, 一些热衷于 APRS 的人还使用专用的 APRS 跟踪设备。这些设备不同于 TNC, 它们只发送位置信息, 并不进行接收。他们把这些跟踪器与 GPS 接收机连接起来, 与 2m 波段的 FM 无线电收发信机一起安装到车辆中。

在固定的站点操作 APRS 不需要 GPS 接收机, 只需把你的经纬度输入 APRS 软件即可。

APRS 数据不仅包括站点的位置信息, 还包括其他的信息。其中包括方向与速度、遥测信息, 甚至还有简短的文本信息。本书没有详尽地讨论 APRS, 想要了解更多的话请参看 ARRL 《VHF/HF 数字通信手册》。本章的主要目的是讨论如何将卫星用于 APRS 中继。

5.3.2.2 Gurwin-OSCAR32 的 APRS 应用

在本书出版之际, Gurwin-OSCAR32, 或简称为 GO-32, 是最受欢迎的数字模式卫星之一。它是由以色列 Technin Institute of Technology 于 1998 年发射的近地轨道卫星, 其数字通信只能以 9 600 波特进行。

GO-32 除了能转发信息和文件 (稍后我们将讲到) 外, 它还有 APRS 专用的转发器频道。表 5.7 中显示 APRS 转发器以 145.850MHz 和 145.930MHz 的频率进行接收, 并以 435.25MHz 的频率转发这 2 个频道的信息。使用 MIC-E 格式的 APRS 站点的上行发射频率为 145.930MHz, MIC-E 是一种在话音发送结束后立即发送 APRS 数据的方法 (www.aprs.net/vm/DOS/MICE.HTM)。通常本身就带有分组 TNC 的 Kenwood 无线电收发信机都使用 MIC-E, 其他格式的 APRS 向上发射的频率都使用 145.85MHz。

每一个 APRS 程序 (以及 APRS 跟踪器) 都提供输入转发路径的方法。在地面上的 APRS 里, 路径说明明确了转发数据包的站点类型。对于 GO-32 的 APRS 来说, 只需在路径域里输入 4XTECH 即可。软件 (或跟踪器) 也允许设置发送 APRS 数据包的间隔时间, GO-32 使用的间隔为 1min。

当 GO-32 出现在你的地平线上时, 把接收机的频率调至约 435.235MHz, 关闭静噪并开始收听下行信号。9 600 波特的数据包传输听起来像是普通的噪声, 如果 GO-32 的信号很弱的话就很难辨别。当信号强度开始增加时, 你会听到 FM 接收器开始变得“安静”, 这其实是真正的噪声的音量在减小, 之后你就能听到 9 600 波特的信号了。

你需要降低接收机的频率来减少多普勒效应的影响。如果你的无线电台有信号强度显示表的话, 把该数上显示的下降的平均强度作为改变频率的提示。由于 9 600 波特的带宽较宽, 向上传输时不需考虑多普勒效应。

如果使用的是外置分组 TNC, 你将会发现, 它在解码 9 600 波特信号时其 CON LED 会闪烁, 幸运的话, 你还能看到 APRS 图标甚至信息出现在计算机屏幕上。它们来自于处于 GO-32 电波覆盖内的有 APRS 设备的地面站。它们大多数都是固定不动的地面站, 但你也能看见汽车或卡车形式的图符, 信不信由你, 这些图标是 GO-32 听到的移动 APRS 站点, 你

使用的软件也许会允许点击这些图符来查看一些例如方向和速度等的详细信息。

如果想向 GO-32 发送自己的 APRS 数据包的话, 你的 TNC 可能不能在接收信号和静噪打开的同时进行信号发送。在频率过于拥挤的地面通信时 TNC 才这样做, 但在向 GO-32 传输信号时并不需要, 因为发射与接收是以不同的频率(事实上是不同的波段)进行的。最好进入 TNC 的主菜单, 找到一个叫做 FULLDUPE 的指令并将其打开, 这样才允许站点同时进行发射和接收, 就像通过线性转发器操作声频或连续波一样。想要了解更多有关 GO-32 和 APRS 的信息, 请登录 eng.usna.navy.mil/~bruninga/GO32-ops.html。

5.3.2.3 APRS 与国际空间站

就像表 5.7 显示的一样, 国际空间站提供能以单一频率(145.825MHz)进行发射和接收的数字中继转发功能。这是一个非常类似地面 APRS 的 1 200 波特的系统——把 APRS 数据包发送至数字中继器, 它将迅速以相同的频率再次对其进行传输。

与大多数业余无线电信分卫星相比, 国际空间站的发射机更加强大, 只需一个标准 FM 话音无线电收发信机就能听见它的信号。另一方面, 空间站的轨道相对较低, 即使是一次高仰角的经过也只能持续 10min。

ARISS APRS 数字中继器之所以受欢迎是因为它们在操作时不需要特殊设备(例如支持 9 600 波特数据包的无线电设备)。事实上, 在通过空间站进行操作时, 普通的 APRS 使用者只需将电台调至 145.825MHz, 并让 TNC 或软件路径说明中包括 ARISS 即可。从地球发送太空中只需 60s!

如果你曾经使用分组 TNC 通过 Gurwin-OSCAR 32 以全双工的方式进行过通信的话, 要确定此时要将 FULLDUPE 的参数设置成了关闭状态, 来把 TNC 还原到正常的操作状态。除了把 ARISS 加入到 TNC 或 APRS 软件的路径说明外, 还要确保发射的间隔为 1min。当然, 你可以指示 TNC 在更多的频率上发射, 但还是不必要的, 并且这样做只会造成更严重的频率拥堵。

当空间站上升到你所在的地平面上时, 关掉接收机的静噪并听数据包的声音。当听到该声音时, 把静噪开到能使噪声消失的程度即可。然后 TNC 就会对 APRS 数据包进行解码并发送你的数据包。

留意你的 APRS 软件, 几分钟后你就能在 APRS 地图上看到图标, 甚至还有一两条简短的信息, 见图 5.14。

由于多种原因, ARISS 的数字中继器有时不能转发。正如本章前面所讲, 工作人员可能会使用设备建立直接的语音通联或者激活不同的功能, 比如 FM 语音中继转发器。登录 www.amsat.org/amsat-new/satellites/status.php 的 AMSAT “卫星状态”网页可以查看 ARISS 的状态。

5.3.2.4 NAVY-OSCAR 44

NAVY-OSCAR 44(NO-44), 也称作 PCSAT-1, 是目前完全专用 APRS 的卫星。与 ARISS 一样, NO-44 只作为 1 200 波特的单一数字中继器进行操作。正如表 5.7 显示的一样, 该卫

星的发射和接收频率都是 145.827MHz。

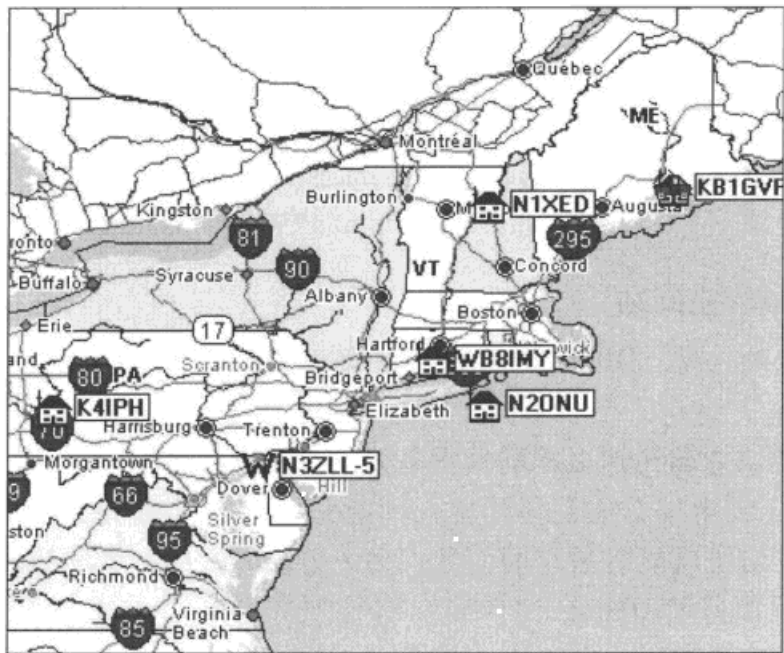


图 5.14 在国际空间站经过时在 UI-View 地图上显示的 APRS 图标

NO-44 工作在负的能源预算状态，这表明它在任何一条轨道上都在中午的时候开始工作，但要等到下一次阳光被地球遮挡的 45min 后才完全耗尽电量。它需要获取足够的光能来为数据包传输提供最大的传输功率。如果在电池电量供应不足的情况下进行传输，电压就会下降，并且 TNC 也会停止工作。

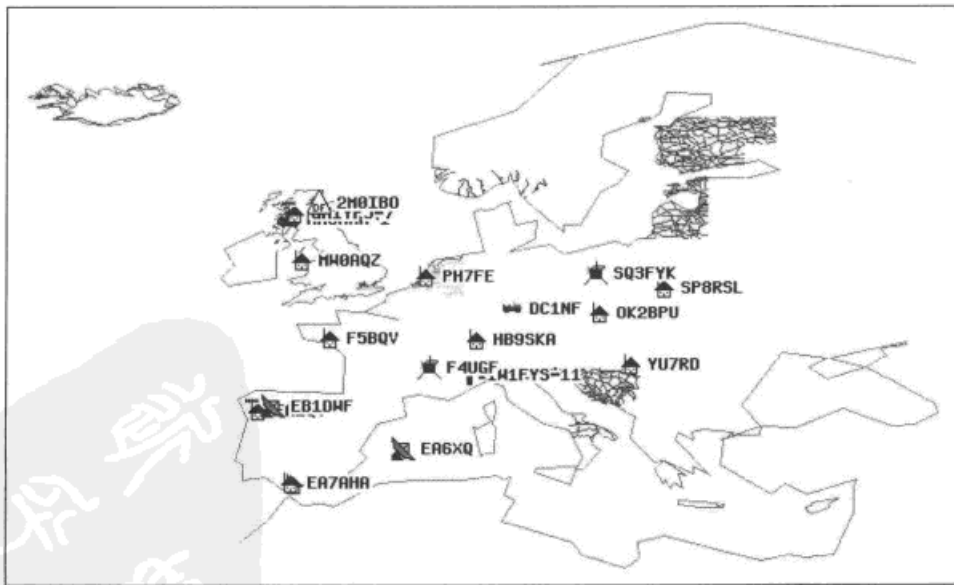


图 5.15 在 NO-44 经过欧洲时显示的 APRS 站点图标

如果你永远都不能确定卫星是否可用,这种情况就会增加操作的难度。如果有疑问的话,请登录 www.amsat.org/amsat-new/satellites/status.php 查看 AMSAT 的“卫星状态”网页。

5.3.3 使用 WiSP 共享电子邮件和文件

在互联网垄断电子邮件和文件交换市场以前,业余无线电爱好者们已使用近地轨道卫星来完成这项工作。在 20 世纪 90 年代初发射了很多所谓的存储转发系统的 Microsat。这种卫星会接收地面站上传的文件和信息,并且在它经过其他地方时允许这些信息被下载。

这里的问题是,地面站每天能与近地轨道卫星进行通信的次数非常少而且时间也很短,通常只有 15min 甚至更少。在操作者下载某一文件时让其垄断使用该卫星是不可行的。

这一问题的解决办法非常的巧妙: PACSAT 广播协议。你也许会认为这是为了对信息进行分配而不得不采取的办法。PACSAT 广播协议指示卫星在其经过时不间断地广播信息而不是一次只与一个地面站进行通信。一些信息是面向大众的,例如公告以及告诉你卫星的什么功能可用的指示性清单。另外一些是个别地面站要求的构成文件和电子邮件信息的数据。

当卫星经过时,你会在地面站接收到大量急速到来的连续信息,一些是你需要的,一些不是。在广播协议下没有任何隐私,卫星每次经过时你都要尽可能多地接收数据——尽管这些数据中可能包含给别人的电子邮件。

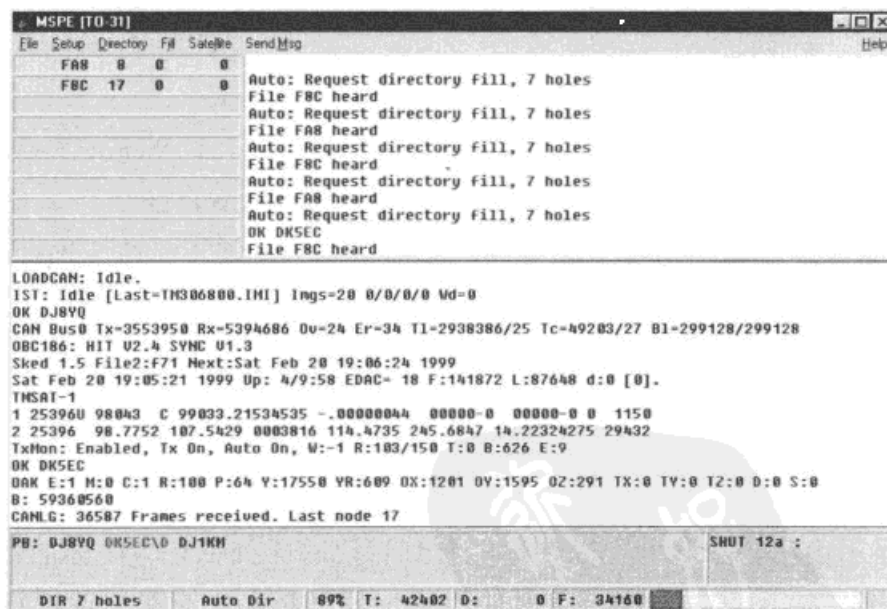


图 5.16 Chris Jackson/ZL2TPO/G7UPN 写的 WiSP, 是一个 Windows 集成程序, 它可以让地面站在操作支持 PACSAT 广播协议的卫星时完全自动化

能弄清这种混乱环境的地面站软件是 Windows Satellite Program, Windows 操作系统下的卫星数据通信软件, 也称为 WiSP(见图 5.16)。WiSP 是由 Chris Jackson/ZL2TPO/G7UPN 编写的, 是可以让地面站完全自动与所有的业余无线电分组数据卫星(包括 9 600 波特卫星)通信的一组软件。WiSP 包括用于下载文件的广播协议、上传文件的连接协议以及一些实用功能、卫星的跟踪与通联安排等。

下面是 WiSP 软件包的 8 个功能:

(1) GSC(地面站控制)。这个程序管理并安排整个地面站设备, 其特色功能是文件删除、过程记录以及系统设置。

(2) MSPE(MicroSat 协议引擎)。此程序提供用卫星时所需的全部上传和下载功能。

(3) View-Dir(查看目录)。此程序提供目录查看和信息查看/回复功能, 以及一些信息管理的功能。

(4) MsgMaker(信息生成器)。所有信息的生成和回复都通过这一程序进行。它在发送信息和二进制文件时在快速和自动化的前提下还能保持极大的灵活性。

(5) ProcMail(处理邮件)。该程序用于处理从卫星上下载下来的信息并将其保存到指定目录。

(6) MsgView(信息查看器)。用于查看所有从卫星上接收到的 ASC II 信息, 也可进行信息回复和删除。

(7) UpdKeps(更新开普勒轨道要素)。当从卫星上接收到新开普勒轨道要素时, 该程序会自动更新开普勒轨道要素数据库。

(8) WiSP-TLM(遥测数据解码器)。该程序与 MSPE 共同工作, 在卫星经过时进行实时显示遥测数据。

WiSP 可从 AMSAT-NA 进行购买(使用主流信用卡)。

本书没有详细描述 WiSP 的细节, 但幸运的是, 软件有一个详细的“帮助”文件来指导你该怎么做。WiSP 有很多功能, 你可以利用它将地面站完全自动化, 无论卫星何时经过, 完全自动化的地面站都能够上传或下载邮件和文件, 你甚至都不必待在地面站。或者, 你也可以完全手动操作 WiSP, 亲自发送请求和进行下载。

如果在卫星消失前你没有接收到全部的文件或信息, 不必担心, WiSP 会“记住”你仍需要的数据并在卫星下几次经过时要求“填满”。它会一直要求“填满”直到你所需的数据完全下载下来。

如果你想上传文件或发送请求, 广播协议会把你的请求排到其他还在等待解决的请求的后面。WiSP 会显示出这个“队列”以便你能看到自己的排列位置(用你的呼号表示)。当你的号最终排到队列的前面时, 卫星就会开始发送你要的数据, 卫星只能“注意”你一会儿, 然后它会迅速地再次把你排到队列的后面。

在编写本书时, 只有 9 600 波特的 Gurwin-OSCAR 32 和 Cute1.7+APD II 支持广播协议。

表 5.7 中显示, GO-32 在 145.890MHz 和 145.930MHz 的时候提供两个 2m 波段的上行信道, 其余的上行信道频率为 1 269.700MHz、1 269.800MHz 和 1 269.900MHz。但要注意所有的下载频率都统一为 435.475MHz。Cute1.7+APD II 的上行信道频率为 1 267.600MHz, 下行频率为 437.475MHz。

不论与哪颗卫星通信, 你都不只需要 WiSP 软件, 还需要一个 9 600 波特的业余无线电分组 TNC。只要支持 9 600 波特的发射和接收, 任何双波段 (2m/70cm) 的无线电收发信机都可以使用。正如我们前面所说的一样, 9 600 波特的数据信号听起来比白噪声响一点。当卫星出现在你所在地的地平线以上时, 确保 WiSP 安装的准确无误并且在与 TNC 通信。切记必须让 WiSP 使用正确的 GO-32 电子布告栏系统呼号: 4XTECH-12。Cute1.7+APD II 的呼号是 JQ1YTC。

当“噪声”使接收机变“安静”且信号强度增加时, 你应该要注意到 TNC 的 CON LED 会开始微微闪光。如果你拥有能请求最新目录的 WiSP, 它会自动发出这样的请求。你的无线电设备会进行简短的发射, 如果卫星听到的话, 你会看到一些类似“OK WB8IMY”的信息, 这表示卫星已经接受了你的请求。

即使是只使用全向天线的地面站, 在卫星的一次典型的经过中也能接收到 250KB 的信息。如果你的台站的天线旋转器上有定向天线, 很容易就能接收到 2 倍或 3 倍以上的信息。

5.3.4 遥测卫星

有些卫星只需要你去听。最近几年, 很多大学都研制和发射了一些作为科研之用的小卫星。其中一些卫星的遥测数据是以莫尔斯码的形式发送的, 但大多数还是以 1 200 波特的分组无线数据发送的。

你可以在表 5.7 中看到这些卫星, 比如多功能的“CubeSats”。如果在 www.amsat.org/amsat-new/satellite/status.php 上查看 AMSAT-NA 卫星状态网页的话, 你会发现更多与卫星有关的信息, 并且在大多数的时候还会发现可以下载免费遥测数据解码软件的链接。例如, 多伦多大学就在 www.t.u-tokyo.ac.jp/gs/en/application.aspx 上提供可以从他们的多个 CubeSat 上解码遥测数据的免费软件。

接收 1 200 波特的遥测数据需要 1 200 波特的分组无线 TNC 和 2m 或 70cm 的 FM 无线电收发信机 (或接收机)。方法与从国际空间站或 NO-44 上监测 APRS 数据的方法一样, 但它需要能读懂所有输入数据的特殊软件。

通过观测遥测数据, 你可以看懂卫星每天是如何变化的。你会看到温度的升降、电池电量的增减等。在许多情况下还能看到发射机的输出功率和卫星各分系统的配置。于 2008 年 4 月发射的 CubeSat-OSCAR 66 和 Compass-One CubeSat 甚至还包括它们的下行数据流的镜像。

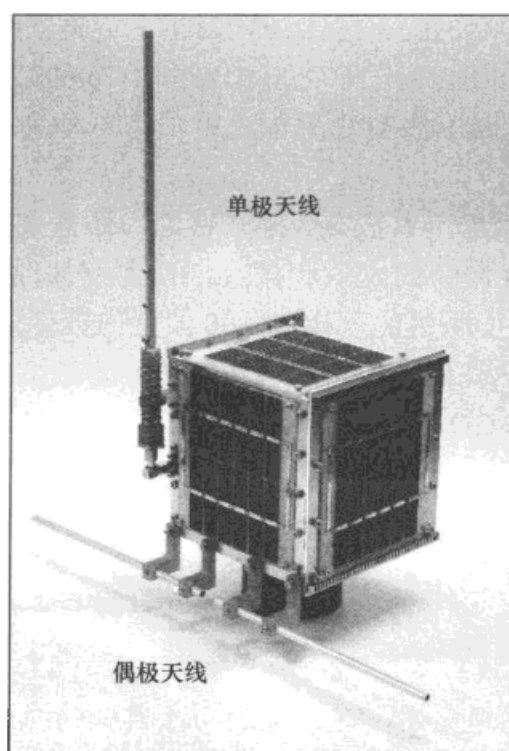


图 5.17 HITSAT 是一个近年来对微型化研究“CubeSats”的范例



业余卫星制作项目

陈荣标 (BG7IGG) 译

下述各制作项目源自 ARRL《业余无线电手册》、ARRL《天线手册》、《QST》杂志以及《QEX》杂志所刊登文章，这些项目不但富有知识性和趣味性，而且还能为您在制作过程中省下可观的花费哦！

W3KH 四臂螺旋天线

Eugene Ruperto (W3KH)

双波段手持式八木天线

Thomas Hart (AD1B)

一种用于 2m 波段的 EZ-Lindenblad 天线

Anthony Monteiro (AA2TX)

用于 Phase 3E 卫星的外观小巧螺旋馈源：系统仿真与测量

Paolo Antoniazzi (IW2ACD) 与 Marco Arecco (IK2WAQ)

一种卫星跟踪器接口电路

Mark Spencer (WA8SME)

一种用于偏馈碟型天线的螺旋馈源

选自 ARRL 《业余无线电手册》

一种不昂贵的小型天线方位角 - 仰角 (Az-El) 指向器

Lilburn Smith (W5KQJ)

用纸板箱天线与 OSCAR 40 通信

Anthony Monteiro (AA2TX)

一种用于 VHF/UHF 卫星通信的简易固定天线

L.B. Cebik (W4RNL)

工作于 435MHz 频段的轻便螺旋天线

选自 ARRL 《天线手册》



6.1 W3KH 四臂螺旋天线

Eugene Ruperto (W3KH)

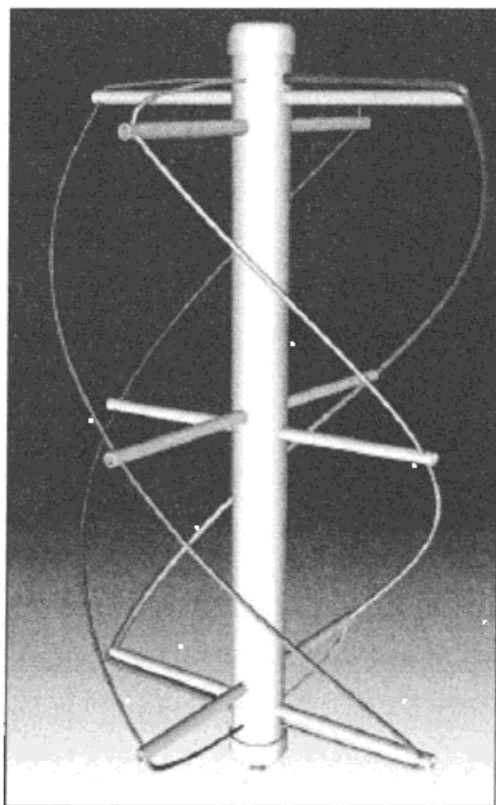


图 6.1 四臂螺旋天线

如果您已经有了一个覆盖性能只是“凑合能用”的全向 VHF 天线，那么这个双绞形外观的天线很可能正是更合适您。

我依然清晰记得，1957 年我的接收机传出那种低沉可怕的声音，信号嘈杂而且伴有衰落，但这正是我所寻觅的信号——它来自太空。我情不自禁地惊叹，人类居然已经将信号发送器放到了太空！并称之为人造地球卫星，用来展示空间竞赛的实力。

不经意间很多年过去了，我们已经拥有很多卫星，围绕着地球和其他天体的轨道上运行，执行着各种各样的任务，如今我们已对卫星习以为常了。

天上已经有几颗工作在低地球轨道（LEO）的 VHF 气象卫星，与同步轨道卫星（GOES）不同的是，LEO 卫星每次不同的位置变化，将会给使用固定接收天线的地面站带来问题：波阵面传播倾斜方向的不同引起信号衰落。本文所述天线正是解决此问题的一个办法。虽然该

天线主要是设计用于气象卫星接收，但它同样适用于任何极地轨道卫星。

如今，随着技术进步和小型半导体器件应用，使得实验者相对比较容易在合理的价位上，得到气象卫星接收机和计算机接口设备。因此，用最新的设备来更替我那些已经过时的气象卫星设备，只是需要点时间的事情。

6.1.1 过去

在 20 世纪 70 年代早期，我用一个带密封盖不透光的箱子，制作了一个圆桶型记录仪，这是个相当笨拙的东西，箱子和照相设备就占据了几乎 6 英尺 × 8 英尺的安装空间。紧接着记录仪的一张 3 英尺 × 4 英尺的桌子，放置有电子管接收机，频率变换器，卷轴式磁带记录仪（我们的数据存储媒质），一个 50 磅的监视示波器，用于调整螺旋天线旋转器的方位角 / 仰角控制器，以及包括驱动放大器和自制的解调器等杂七杂八许多部件。这个卫星地面站能够满足极地轨道卫星与同步轨道卫星的接收要求，它给我提供了大量的数据。后来，我这个气象卫星地面站，就演变成了像载人航天工程的任务控制一样复杂！我有太多这样的东西，不得不找了个单独的房间来存放它们。

6.1.2 当今

现在，我的整个气象卫星地面站只占用了我工作间的一个小角落，不足 1 平方英尺的地方，与我的 DSP 滤波器外形尺寸近似。我的 PC，即现在用来显示卫星气象照片的，也可作为各种用途使用，使用一个 A/B 切换器，就可以让计算机在打印机和气象卫星接口设备上相互切换。

所以，我现在所需要的，就是一个不需要调整的简单天线系统，要求不用旋转器，能够很好地满足覆盖范围的要求，从地平线上 20° 到垂直越过头顶都行。这个要求看起来很简单，但显然没有一个十分简单的方案。

6.1.3 背景

起初，我综合考虑后，用了一个 VHF 盘锥天线，它具有很好的低仰角捕获范围，但开始收到信号后几分钟内，会出现几次零点衰落，并在卫星几乎越过头顶之时再次出现这种零点。这种衰落零点在卫星飞向另一地平线时同样重复出现。就在这时，Dave Bodnar (N3ENM) 先生（他也令我重新对天线制作感兴趣），他制作了一种十字形反射（T-R）阵列，这种天线工作得不错，但也会出现几个天线辐射图零点引起的信号衰减。Dave 制作了两个以上的 T-R 天线，放在不同位置作为比较，但不幸的是，这种天线依然还是存在衰落与零点的特性。我

和另外一位实验者，也制作了这种 T-R 天线，并证实确实如此。我提议我们应该试试林登布拉德（Lindenblad）天线，这种天线被证实对于我们的需求来说，是比 T-R 或者盘锥天线好得多的天线，不过仍然会有零点与衰落的问题。经过数月的摸索，我将天线升高，并发现通过一个天线与另一位置较低的天线相互切换，可以获得无衰落的（气象）图像，但在切换过程中会丢失许多数据。这个办法还是个需要人为干预的操作，所以我继续寻求无衰落缺点的天线。

6.1.4 四臂螺旋天线

曾经有几本杂志刊登过这种最早由 Kilgus 博士^[1]开发的四臂螺旋天线（QHA）的制作，但这些文章读起来一篇比一篇难懂，但有一篇 Walt Maxwell（W2DU）写的评论还比较好^[2]，他在 RCA 公司任职工程师时，对该天线做了实际的评估与测试。

该天线的仿制，有部分问题是几何形状方面，QHA 天线比较难以描述或用照片来说清楚，有些文章的说法让我的困惑比给出的答案还多，并且在这些振子单元之间的连接，与以前发布的数据显得有些冲突。尽管如此，但那些已经制作成功的人，认为这就是用来接收低轨道卫星真正的单天线了，我对此表示认同。

6.1.5 设计考虑

我曾经对制作这个 QHA 天线有所忧虑，因为那些专家说对该天线的调整与测试需要用到专业的仪器设备。我并不否定这个说法，但我确实知道，通过按照一个成功的 QHA 天线尺寸，做比例变换，这种按图索骥的办法，是可以成功制作出另一个 QHA 天线的。这些作为我们天线设计参考的数据，刊登在一篇描述一对圆极化 S 波段通信卫星天线设计文章上，用于空军和太空飞船^[3]。以这个天线作为原型，我们制作了超过 6 个 QHA 天线，多数是工作在气象卫星频率，还有一些是用于极轨卫星 2m 波段和 70cm 波段的，都取得了很好的结果，不需要任何调整与调谐！我并不擅长于精细活，但通过下面介绍的一些通用计算，您可以用一些简易的工具就仿制出一个满意的天线，以实验结果为证。

对于超高频，制作中要求高精度，因为此时天线的尺寸很小。例如，空军所使用的 2.2GHz 天线，其直径是 0.92 英寸，长度只有 1.39 英寸！嵌套在这个螺旋天线里面的是一个尺寸更小的螺旋天线，只有 0.837 英寸的直径和 1.27 英寸的长度。在我看来，制作这样的一种尺寸，需要具有钟表匠般的技术！另一方面，一个工作在 137.5MHz 的 QHA 天线，长度 22.4 英寸，直径将近 15 英寸。较小的嵌套在里层的天线，尺寸为 20.5 英寸 × 13.5 英寸。对于 2m 波而言，天线的尺寸并不会太小。对于这种尺寸大小的天线，仿制起来并不困难，甚至对于像我这样将制作看成是挑战的人来说，也不困难（我用预先切好的材料，一个小时内就可以制作出一个 QHA 天线来哦）！

6.1.6 电气特性

一个旋扭半圈的半波长 QHA 天线，在理论上具有 5dBi 的增益，以及 115° 的半功率波束宽度，特征阻抗为 40Ω 。这种天线基本上包括：由 4 个半圈振子构成的螺旋天线，每一对振子单元成为双绞单元，这两对双绞单元之间相位正交馈电。有几种馈电的方式，但除了采用无限巴伦方式馈电外，其他的方式对我们而言都比较复杂。无限巴伦馈电方式，就是采用了一段同轴线作为 4 个中的一个振子。为了在两组双绞单元之间产生所需的 90° 相位，有两种办法都可以采用。一种办法是用两组相同尺寸的双绞单元，基本上也就是两对双扭的环，以垂直面中心轴排列，并旋转为相互之间 90° 角（如同打蛋器天线），然后用正交混合馈电方式。这个办法需要两根馈线，每对双绞单元连接一根。第二种是更加实用的办法，我估计是采用自相差系统，就是采用两个尺寸并不相同的环：尺寸较大的环，谐振点频率设计成稍微低于所需的工作频率（产生一个感性电抗分量），尺寸较小的环则谐振于比工作频率稍高（引入一个容性电抗分量），这样就导致电流在小环上相位超前，而在大环上相位滞后。对于大环而言，振子长度为 0.560λ ，小环的为 0.508λ 。根据 W2DU 的大量试验，为了得到最佳的圆极化特性，用于制作双绞单元的导线直径应该为 0.0088λ 。Walt 指出，在四臂螺旋模式下，每个单独双绞螺旋产生的场，在最佳相位下能合成得到单向的端射增益，此时两个双绞单元上的电流相位必须精确正交。这种 90° 相位关系，可以通过使对应的端接阻抗为 $R+jX$ 和 $R-jX$ 来得到，其中 $X=R$ ，这样就能保证对应螺旋单元相位为 -45° 和 $+45^\circ$ 。在这种相位关系中，关键的参数就是端接电抗 X ，其中螺旋单元的分布电感是主要的决定因素。这种精确要求的 $\pm 45^\circ$ 电流关系，可以确保获得合成真正的圆极化性能，并具有最大的前向辐射性能和最小的后瓣。如果不能采用最佳的 0.0088λ 作为振子（导线）直径，将会产生椭圆极化，而不是真正的圆极化，并且，按照 Walt 的计算，会下降十分之几分贝的最佳增益。在我的天线中，用了 #10 导线，换算为 137.5MHz 频率下的线径大约为 0.0012λ ，不算理想，但够用。

为了对 QHA 天线的形状有个正确的了解，可以形象地认为由两个同心圆柱体上绕着螺旋导线（参见图 6.2 ~ 图 6.5）。在二维空间上，圆柱体可以表示为以柱体高度和宽度描述的嵌套着的矩形，较大柱体（或矩形）的宽为 0.173λ ，较小柱体的宽为 0.156λ 。同样，较大柱体或矩形的长为 0.260λ ，较小的柱体或矩形的长为 0.238λ 。运用这些数据，您就可以设计出任何频率上工作的 QHA 天线。表 6.1 给出一些常用频率下代表性天线尺寸，按照这些参数就可以制作天线了。

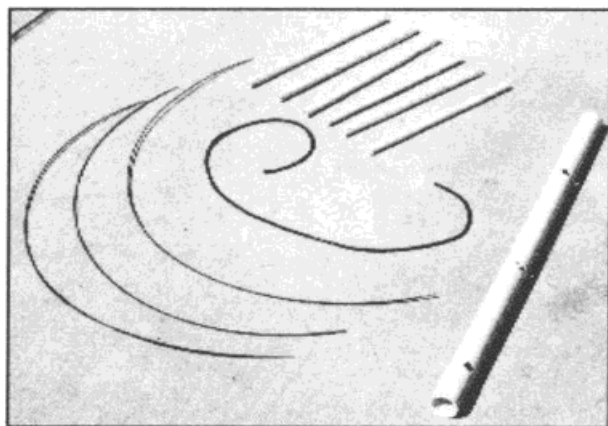


图 6.2 这种了不起的天线所需的只是一些简陋材料

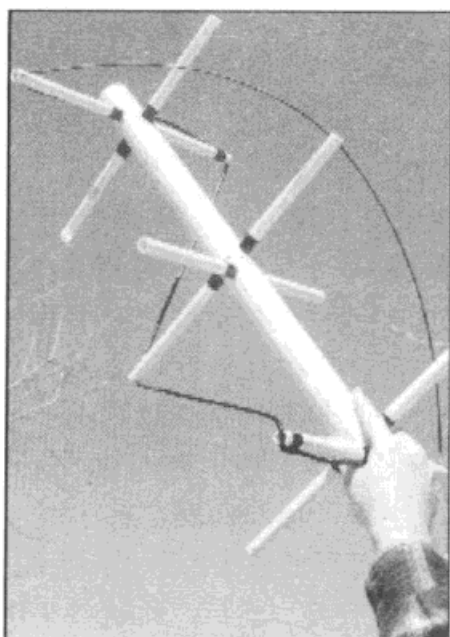


图 6.3 四臂螺旋天线四臂中的两臂构成一个单环

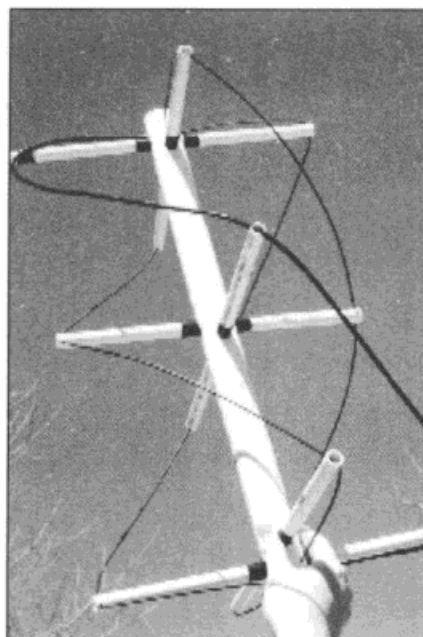


图 6.4 已经安装好四臂的 QHA 天线，支撑同轴线一臂的交叉 PVC 管末端是开槽的，其他支撑导线的交叉 PVC 管在末端钻孔

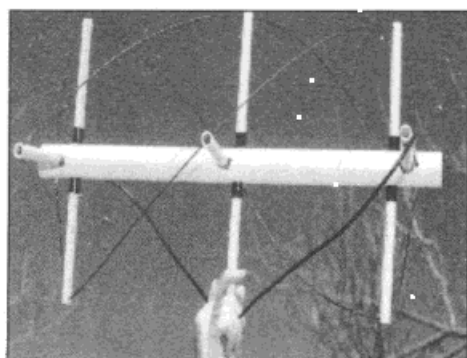


图 6.5 从另一角度看 QHA 天线

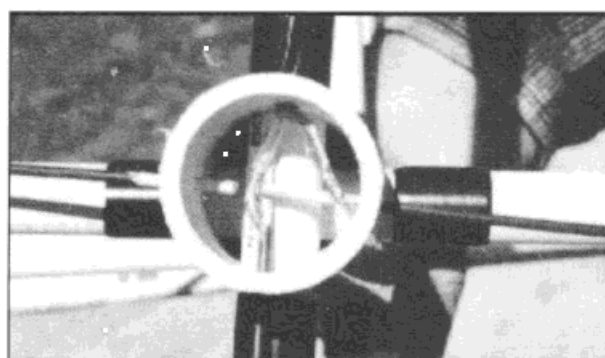


图 6.6 从顶部往下看 QHA 天线，里面已经焊接好并需加上 PVC 盖子

表 6.1

四臂螺旋天线尺寸

频率 (MHz)	波 长		小 环		大 环		
	λ (英寸)	臂尺寸 (0.508λ)	直径 (0.156λ)	长度 (0.238λ)	臂尺寸 (0.560λ)	直径 (0.173λ)	长度 (0.26λ)
137.5	85.9	43.64	13.4	20.44	48.10	14.86	22.33
146	80.9	41.09	12.6	19.25	45.30	14.0	21.03
436	27.09	13.76	4.22	6.44	15.17	4.68	7.04

6.1.7 物理结构

在起初尝试用夹板环绕和塑料桶骨架来固定螺旋线的办法失败之后，我发现了用简单的PVC管的办法，不仅从制作上最简单，而且抗风性能也最好。我用了一段25英寸长，编号40的2英寸直径PVC管，作为垂直支撑杆。支撑螺旋线那些十字架，则是用6段1/2英寸的PVC管：3根按照大矩形或柱体的宽度，3根按照小矩形或柱体的宽度。其中两个十字架是柱体顶部和底部所需的，这些十字架与垂直支撑杆垂直，并相互平行。第3个十字架放在前面所说的十字架中间位置，并与它们成90°角（译注：这里要特别注意，由于每个十字架的两交叉臂是不等长的，一臂用于大柱体，另一臂用于小柱体，所以有成90°角的说法）。对于小柱体尺寸也是重复一样的过程，用3根较短的十字臂，顶部和底部各1根，并与长臂成90°。在2英寸管上开的孔径为5/8英寸，以确保正好可以通过1/2英寸大小的十字臂。每个十字臂在末端钻孔，以配合作为振子的导线和同轴线的长度。然后，将这些十字架调整均等，并用PVC胶粘牢固定。对气象卫星天线而言，我是采用了#10包铜线作为3个螺旋臂，以及1段RG-8作为巴伦的，其实这也是第4臂（我在同轴线臂长度计算时不考虑速度系数）。对于UHF天线，我用了#10软皮铜导线和RG-58同轴线。铜导线用起来有点不方便，但它的形状可以做得很漂亮。尺寸更小的天线就可以不用十字架支撑了，因为导线本身就可以自支撑了。

为了减少相互间的连接的混乱，并明确每一臂的螺旋振子，我在每个环或者说柱体上标注了B（对于大环）和S（对于小环）；用字母T和B标明是顶部和底部。参见图6.7和图6.8。我将每个环用B1T和B1B，B2T和B2B，S1T和S1B，S2T和S2B分别标识，B2则还表明是同轴线长度，其他的就是采用导线的3个螺旋臂了。对于右手圆极化（RHCP）方式，我是按顶视方向逆时针绕螺旋的，这与一般轴向模螺旋天线的结构正好相反（对于LHCP，从顶部看下来就是顺时针方向绕）。顶部正确的连接方法请见图6.8。天线做好之后，看起来在顶部的同轴线（B2）中心导体有两个连接点，分别是B1T和S1T，一共3根导线连接在一个点上，S2T与B2T的外屏蔽层相连接。在天线的底部，S1B和S2B焊接在一起构成小环，B1B和B2B的外屏蔽层焊接一起。我在底部用一个SO-239连接器，中心与B2B中心导线焊接，连接器外层与B2B外屏蔽层相接。那么在底部与屏蔽层相接的连接点：一个是到B1B螺旋臂，另一个就是到连接器的外层金属。唯一一个连接点，是B2B的中心导线与SO-239连接器中心引脚的连接。

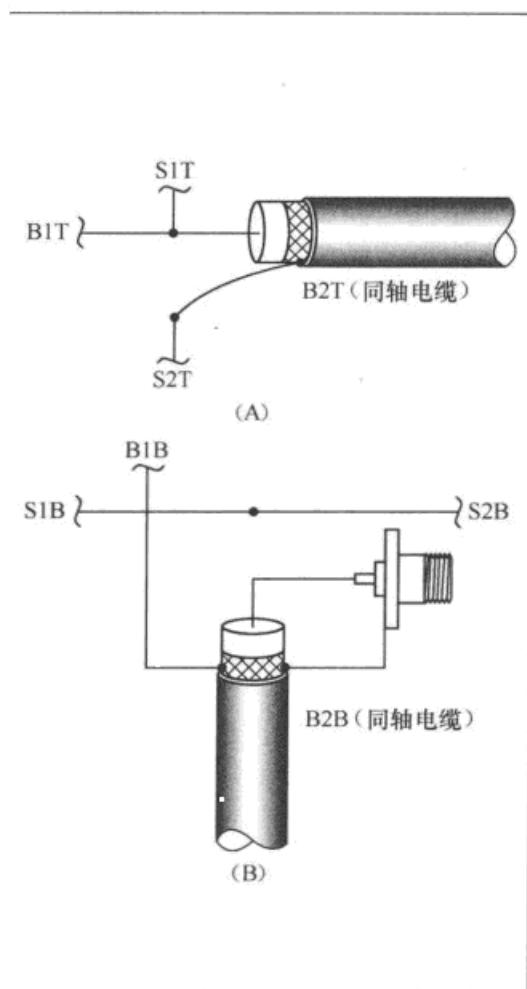
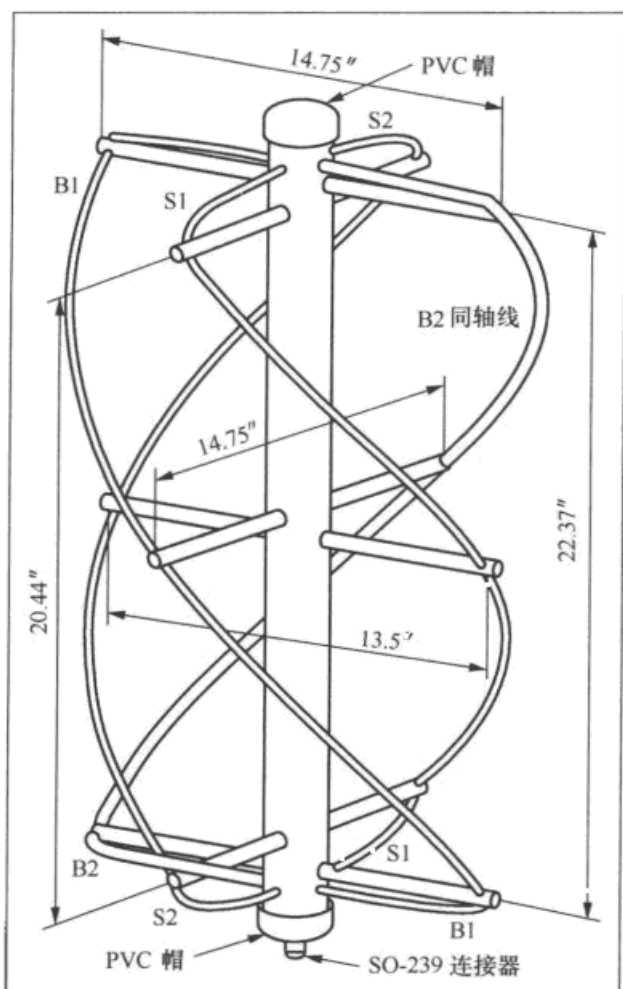


图 6.7 已经标注出各个臂的 QHA 天线结构图，详见文中解释 图 6.8 (A) 图给出天线顶部各个连接点，(B) 图给出天线底部各个连接点。这些标志点与图 6.7 一样，详见文中解释

6.1.8 绝缘材料性能

一个值得关注的问题是，绝缘用管子的介质品质问题。天线是一个互易器件，在发射和接收都会表现出相同的某个百分比损耗。尽管对于 $2\mu\text{V}$ 的小信号损失不会像 100W 发射信号那么明显表现出来（例如，由于介质损耗发热会导致 PVC 十字架融化。），但是信号的损耗与制作所采用的绝缘材料十分相关。作为一种检验办法，我是将管子放进微波炉并“烤验”它几分钟，结果发现白色 PVC 管和棕色 CPVC 管都没有明显发热，因此我认为它们是可以作为 137.5MHz 频率范围的绝缘材料的。

这个天线没有花费我太多费用，因为剩余的 PVC，管子和连接器都是手头现有的。所有新材料的总费用，包括购买一个合适的新连接器，一共也不会超过 8 美元。

6.1.9 使用效果

我使用了一段 70 英尺长的 RG-9 电缆，用来连接接收机和天线，天线安装在离地面 12 英尺高的位置，与以前所用的天线一样，我在工作间加了一个前置放大器。当在 NOAA-14 卫星预定出现时间的第一个 AOS(信号捕获)，我惊喜地发现首次接收到了气象卫星许多原来被衰落掉的信号，包括一些来自 Russian Meteors 的壮观图片！尽管设计上 3dB 波束宽度为 140° ，但实际上从头顶直到地平线上 10° 都能够获得数据（我的位置看到的地平线很受限，除了南面其他都是被小山包围的山谷）。我也曾经接收到近乎完整的西海岸到北墨西哥图像，在我的位置上最大仰角也只有 12° 的条件（对于 PACSAT 卫星，70cm 天线可以很好工作，尽管多普勒效应使得手动跟踪有些困难）。这个气象卫星天线原型的工作效果比原来预期的好，复制制作起来也并不需要做大的改动。因此，这种四臂螺旋天线成了最终的胜任者！并且请相信我，非常容易制作！

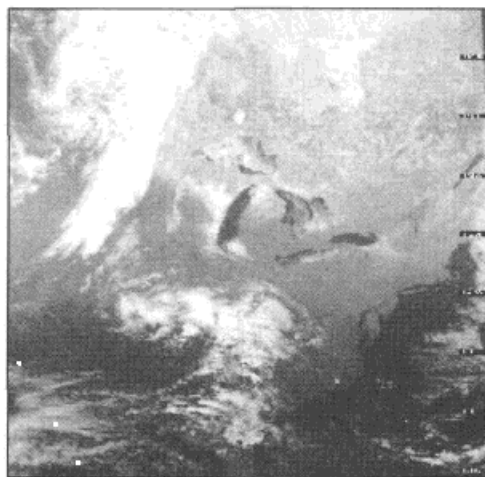


图 6.9 俗话说：“布丁味道好不好，亲口尝尝才知道！”对于气象卫星跟踪器，像图中这样清晰，无衰落，无噪点的图像，归功于这个臂 W3KH 四螺旋天线

致谢

感谢 Chris Van Lint 和 Tom Loebl(WA1VTA)，给我提供了这个制作所需的完整数据。尤其感谢 Walt Maxwell(W2DU)的审阅与技术评估，并分享给我业余卫星通信方面的技术经验。

附注：

^[1]C. C. Kilgus, “Resonant Quadrifilar Helix,” *IEEE, Transactions on Antennas and Propagation*, Vol AP-17, May 1969, pp 349 to 351.

^[2]M. Walter Maxwell, W2DU, “Reflections, Transmission Lines and Antennas,” (Newington: ARRL, 1990). [编注：该书已经绝版了]

^[3]Randolph W. Brickner Jr and Herbert H. Rickert, “An S-Band Resonant Quadrifilar Antenna for Satellite Communication,” RCA Corp, Astro-Electronics Division, Princeton, NJ 08540.

Eugene “Buck” Ruperto(W3KH)，在 1950 年首次获得 W3QYG 呼号许可执照，在 1957 年升级为最高级别。Buck 在美国航空公司作为一名无线电操作员，并最后在联邦航空管理局退休，他在那里作为数据系统专家，作为系统分析与技术撰稿人工作了 15 年。在退休之前，Buck 还担任过

数年的 ARTS III 系统（用于飞行器跟踪的自动雷达终端）自动控制器经理。Buck 喜欢飞行，持有商业飞行员执照，并且是飞机、航空器，滑翔器等级的认证飞行教练。他说，飞行最主要的兴趣是观察天气。Buck 的业余无线电兴趣包括 OSCAR 卫星，尤其是工作在 Molniya 轨道的 AO-10 和 13 卫星。他是个海岛与 DX 的猎好者，列入最高荣誉版上，并拥有 W6OWP 40wpm CW 的认证。Buck 也是 MENSA 的长期会员，您可以用 E-mail w3kh@pulsenet.com 联系他。

6.2 双波段手持式八木天线

Thomas Hart (AD1B)

那些受欢迎的手持式八木天线现在能同时工作在 VHF 和 UHF 双波段了！

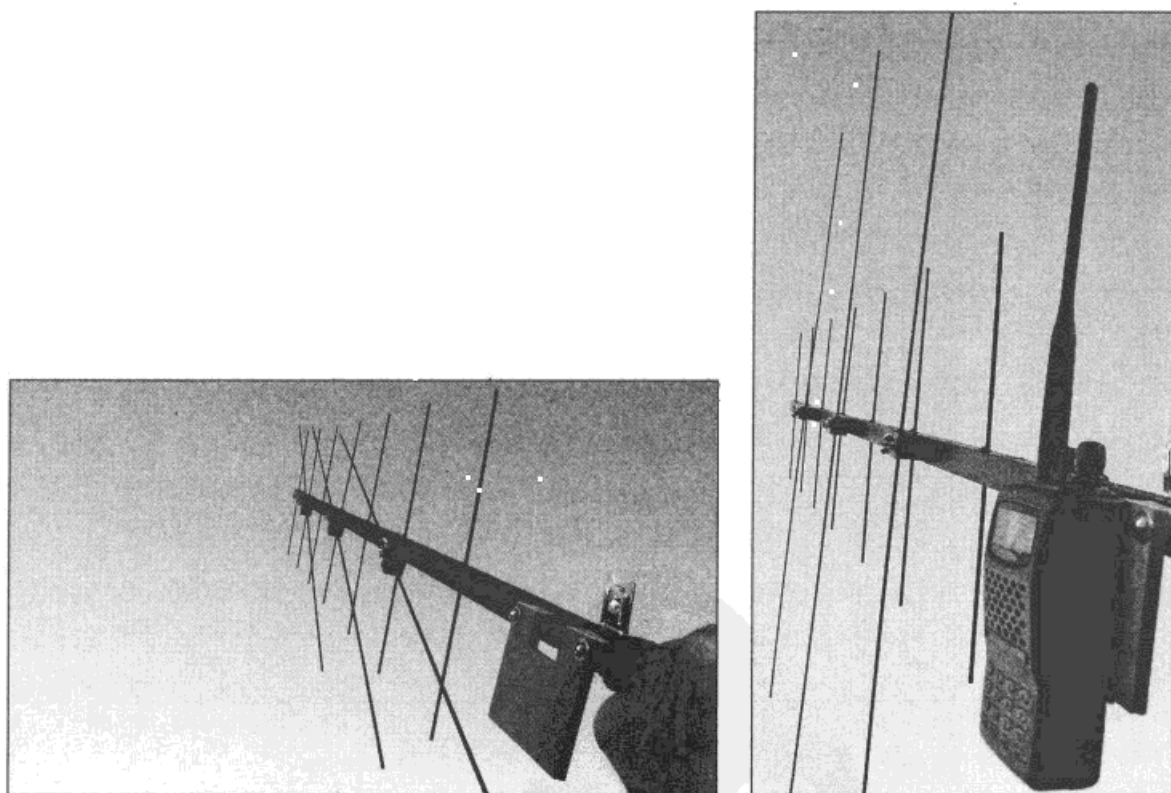


图 6.10 双波段手持八木天线，2m 波段单元可以折叠便于存放

最近，我开始用我的双频段 Yaesu FT-60 手持电台玩 SO-50 和 AO-51 卫星通联，其标配的软天线也能够用，但我决定研究一下手持式八木天线以改善性能。我的主要目的是制作一个简单的 2m 波和 70cm 波双频段八木天线，但不需要驱动单元，匹配网络以及馈线。简单说，

就是计划将我的 FT-60 直接固定到我原来已经有的 70cm 波段八木天线上^[1]。

用 Roy Lewallen 的 EZNEC 软件（见 www.eznec.com）做了数种方案的设计后，我确定了采用 70cm 波段 7 个引向单元，2m 波段 3 个引向单元的设计，我的 Yaesu FT-60 双频段手持机就直接作为激励单元了。图 6.10 和图 6.11 给出了这个方案。

6.2.1 制作

在最终确定下来的设计中，对性能与尺寸做了折中，两个波段的所有振子单元都交叉并平行排列，没有激励单元和反射单元，而是用 FT-60 和一个在天线横梁末端的自行车手把，分别作为激励和反射振子。其中 2m 波段振子可以旋转成与横梁平行，以便于收藏。在天线不使用时，末端的螺丝眼可用于悬挂天线。

通过模型计算表明， $\lambda/4$ 的单元间隔，对于两个波段都能工作得不错，这样采用 55 英寸的横梁长度就够了。手持对讲机用扣带可以牢靠固定在上面，用喇叭和话筒就可以方便地进行收发操作，进一步细节请看插图。

所有的振子都用 1/8 英寸直径的钢条制作，Ron Hege (K3PF) 在他的文章中提供了 2m 波段的所有振子单元尺寸，见表 6.2^[2]。而 70cm 波段单元的振子尺寸，则可以在 ARRL《天线手册》中得到，这里参见表 6.3，其他的各种尺寸如表 6.4 所示。

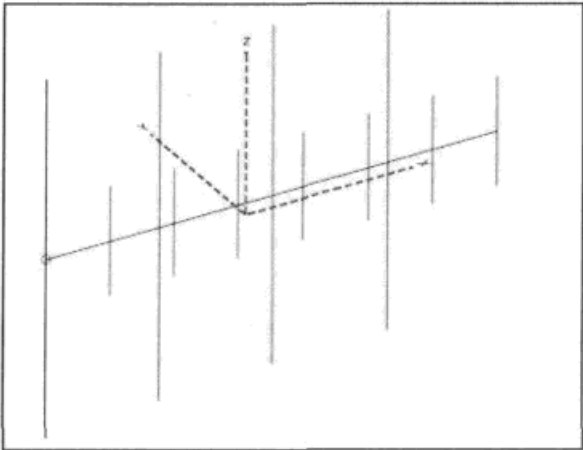


图 6.11 由 EZNEC 产生的天线图和振子单元位置。实际上用 Yaesu FT-60 取代图中左侧的半波馈电振子单元

表 6.2 2m 波段单元的长度与间隔 单位：英寸

引向单元	D1	D2	D3
长度	37.5	36.375	36.0
间隔振子	DE 至 D1	D1 至 D2	D2 至 D3
间隔距离	12	12	12
累计位置距离	12	24	36

表 6.3 70cm 波段单元的长度与间隔 单位：英寸

引向单元	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
长度	11.750	11.688	11.625	11.536	11.500	11.438	11.375
间隔振子	DE 至 D1	D1 至 D2	D2 至 D3	D3 至 D4	D4 至 D5	D5 至 D6	D6 至 D7
间隔距离	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78
累计位置距离	6.78	13.56	20.34	27.12	33.9	40.67	47.45

表 6.4

天线的其他装配数据

单位：英寸

横梁尺寸	0.75×0.75×55
把手长度	5
手持机托板尺寸	3.5×3.0×0.25 (WHD)
手持机托板开槽尺寸	1.125W×0.75H
托板垫块大小	0.375
2m 波振子的固定板大小	0.75×0.75×1.5

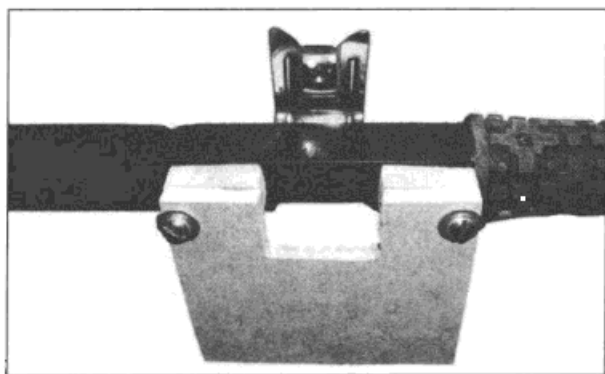


图 6.12 (手持机) 固定托板, 垫块与话筒托架

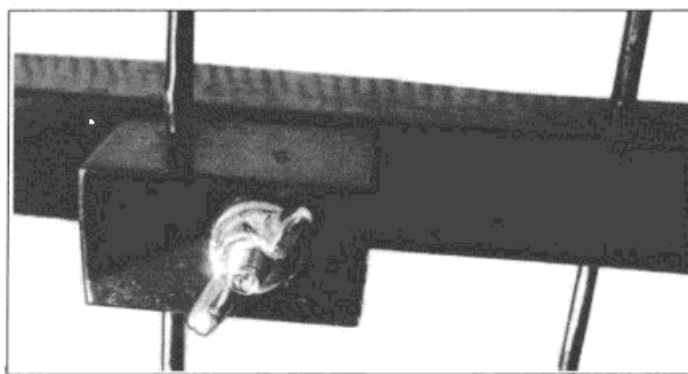


图 6.13 可手拧的蝶形螺母与螺栓, 便于 2m 波段振子单元旋转

用两片粘结在一起的 1/8 英寸厚玻纤板, 做成如图 6.12 那样的手持机托板。所有的振子单元都是用环氧胶来固定。依照长度尺寸裁好 10 个振子后, 在横梁上钻 7 个通孔 (给 70cm 波段), 再在 2m 波段振子固定板上, 也另外钻 3 个通孔。将所有振子都插入到对应的通孔位置, 在两侧滴上环氧胶, 通常点上几滴就足以固定好这些振子。

所有 2m 波段振子的固定板都需要开两个孔, 一个孔是用来穿入振子的, 另外一个孔则用可手拧的蝶形螺母和螺栓做固定, 便于储藏或运输时将 2m 波段振子旋转, 见图 6.13。最后再作两层黑色的涂漆层, 使天线看起来更加专业些。

6.2.2 测试结果

由于没有分析仪器, 测试过程主要用 EZNEC 作计算以及实际使用体验。EZNEC 计算得到 2m 波段前后比为 14dB, 70cm 波段为 5.5dB, 画出的方位角和仰角图见图 6.14 和图 6.15。

2m 波段的户外测试, 是与马萨诸塞州 Paxton 市的 146.97MHz 中继台进行通信, 根据我的麦哲伦 3D 地形图 GPS 软件显示, 该中继台在距离方位 251° 的 38.0 英里处。平时在我的

住处，用 FT-60 自带的螺旋软天线是无法上台的。现在使用这个双段的手持八木天线，我可以毫无困难地打开该中继台。将天线对准或偏离中继台方向一定角度，您可以在对讲机上看到与所预测相对应的信号强度变化。

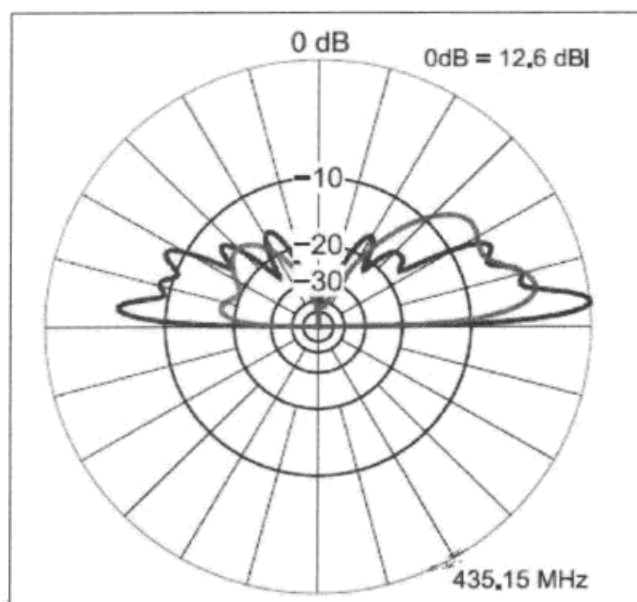


图 6.14 预测的 2m 波段（红线）和 70cm 波段（蓝线）八木天线仰角辐射图

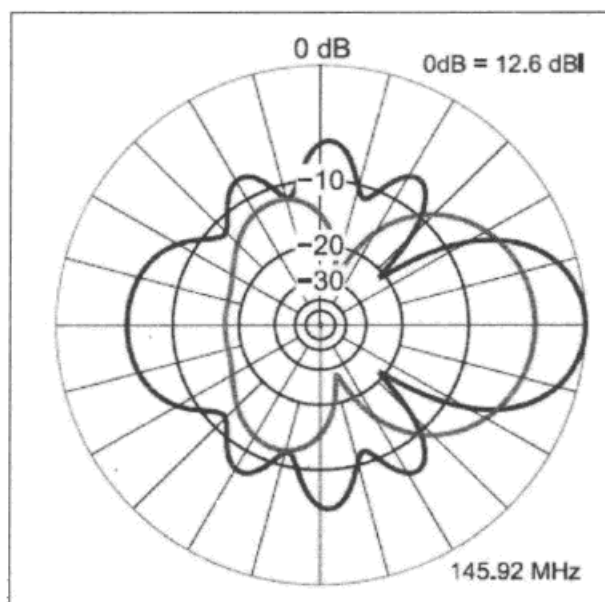


图 6.15 预测的 2m 波段（红线）和 70cm 波段（蓝线）八木天线方位角辐射图，取最大响应的仰角截面处

对于 70cm 波段而言，户外的测试包括对 AO-51 和 SO-50 卫星信号的接收，当天线指向、接近或对准卫星时，可以看到明显的信号强度增加。我的结论是两个波段的工作性能都与 EZNEC 预测的一致。

我制作的这个天线，主要是针对卫星通信设计的，不过这个主意同样可以用于便携式操作，猎狐活动或应急通信时使用。

附注：

^[1] T. Hart (AD1B), “The Handy Yagi (手持八木天线)” *QST*, 2007 年 11 月, pp 37-38.

^[2] R. Hege (K3PF), “A Five-Element, 2-Meter Yagi for \$20 一款 5 单元 2m 八木天线,” *QST*, 1990 年 7 月, pp 34-36.

^[3] R. D. Straw, Editor, *The ARRL 《天线手册》*, 21st Edition, p 18-45.

Tom Hart (AD1B) 在 1961 年开始短波广播收听，1968 年获得初级执照，呼号为 WN1JGG，活跃在 CW、SSB、RTTY、FM 以及数据包通信。Tom 获得 Tufts 大学的学士学位，以及 Northeastern 大学的硕士学位，虽然职业是会计师，但在 20m 波段上更可以说是孜孜不倦。您可以通过以下地址联系到 Tom: tom.hart@verizon.net.

所有照片均由作者拍摄。

6.3 一种用于 2m 波段的 EZ-Lindenblad 天线

Anthony Monteiro (AA2TX)

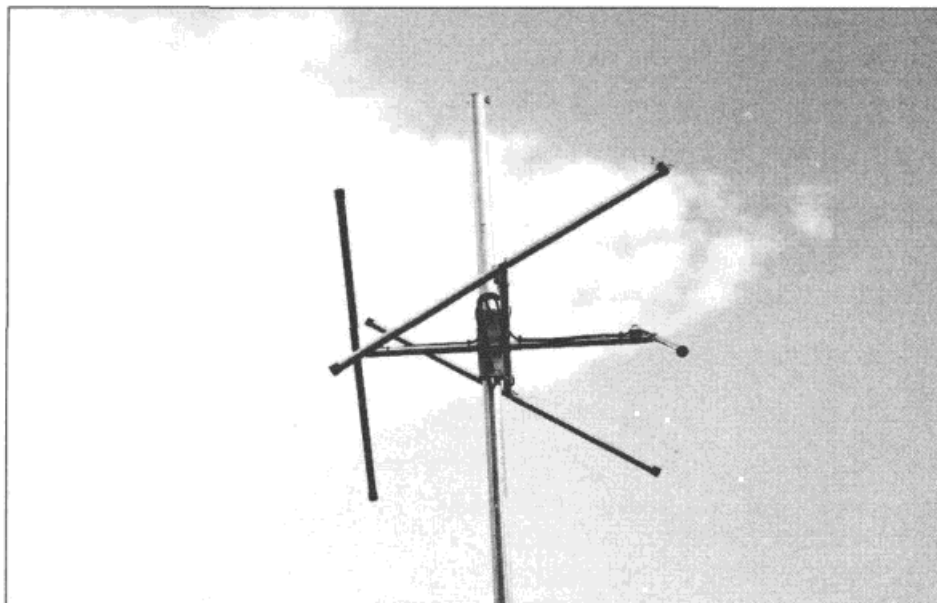


图 6.16 2m 波的 EZ-Lindenblad 天线

这个制作简单的天线可以很好地用于卫星或地面的通信，水平与垂直极化方式都可以工作。

Lindenblad(林登布兰德)是一种圆极化天线的命名，具有全向性的辐射图。由于在较低仰角范围具有较大的增益，用于低轨(LEO)业余卫星比较理想。天线所具有的全向特性，使得天线不用跟随指向卫星，因此也免除了复杂的方位/仰角跟踪系统，这也使得 Lindenblad 天线尤其适合便携使用或临时卫星通信。当然它同样也是一种不错的家用固定天线，因为它的圆极化特性能够兼容在 FM/ 中继台或 SSB/CW 操作时的不同线极化。

该类型天线是美国无线电公司(RCA)的 Nils Lindenblad 先生，大约在 1940 年所发明的^[1]。当时，他正为崭露头角的电视广播领域(TV)设计天线，他的想法是采用 4 个偶极子，等间距排列在直径为 $\lambda/3$ 的圆周面上，并且每个振子水平倾斜 30° 。所有偶极子馈入同相位的相等功率。这些等间隔和倾角的偶极子，就会在馈入信号后合成所需要的天线辐射图。不幸的是，第二次世界大战的爆发，使得 Lindenblad 电视天线的工作夭折了。

“二战”后，同在 RCA 公司工作的 George Brown 和 Oakley Woodward 先生，承担研究用于机场能降低地对空无线电链路衰减的解决方案^[2]，这种通信链路当时采用的是线极化天线，而飞机的机动性使得天线容易出现交叉极化的情况，这导致发生大的信号衰落。他们俩后来意识到，在机场使用圆极化天线可以减少甚至消除这种衰落，因此他们决定试用 Lindenblad 电视天线的方案。

Brown 和 Woodward 采用金属管作为偶极子单元来设计他们的天线，每个偶极子连接一

段同样用金属管做的短路平行传输线（即终端短路的短截线），作为巴伦变换器。再用一段同轴电缆接到每段短截线的一端，对每个偶极子进行馈电。这4根同轴馈电电缆汇合到一起，并联连接，提供一个四路同相的功率分配作用。电缆的连接点再连接到另外一段作为阻抗匹配的同轴电缆，以获得 50Ω 的良好匹配。不过 Brown 和 Woodward 的这个设计虽然巧妙而且很好用，可是对于大多数火腿（包括本文作者）来说，要仿制一个还是相当困难的。

导致设计和制作这种 Lindenblad 天线难度较大的主要原因是，需要实现一个四路同相的功率分配。既然我们通常都是用 50Ω 同轴电缆给天线馈电，我们就必须要进行将 50Ω 不平衡同轴，阻抗匹配到4个 75Ω 的平衡偶极子负载上。

以前的方法是，用平行传输线成对连接4个折合偶极振子，再用巴伦变换器，和一段特殊阻抗的匹配电缆，来得到与 50Ω 的良好匹配。这个匹配过程增加了复杂性和制作难度。

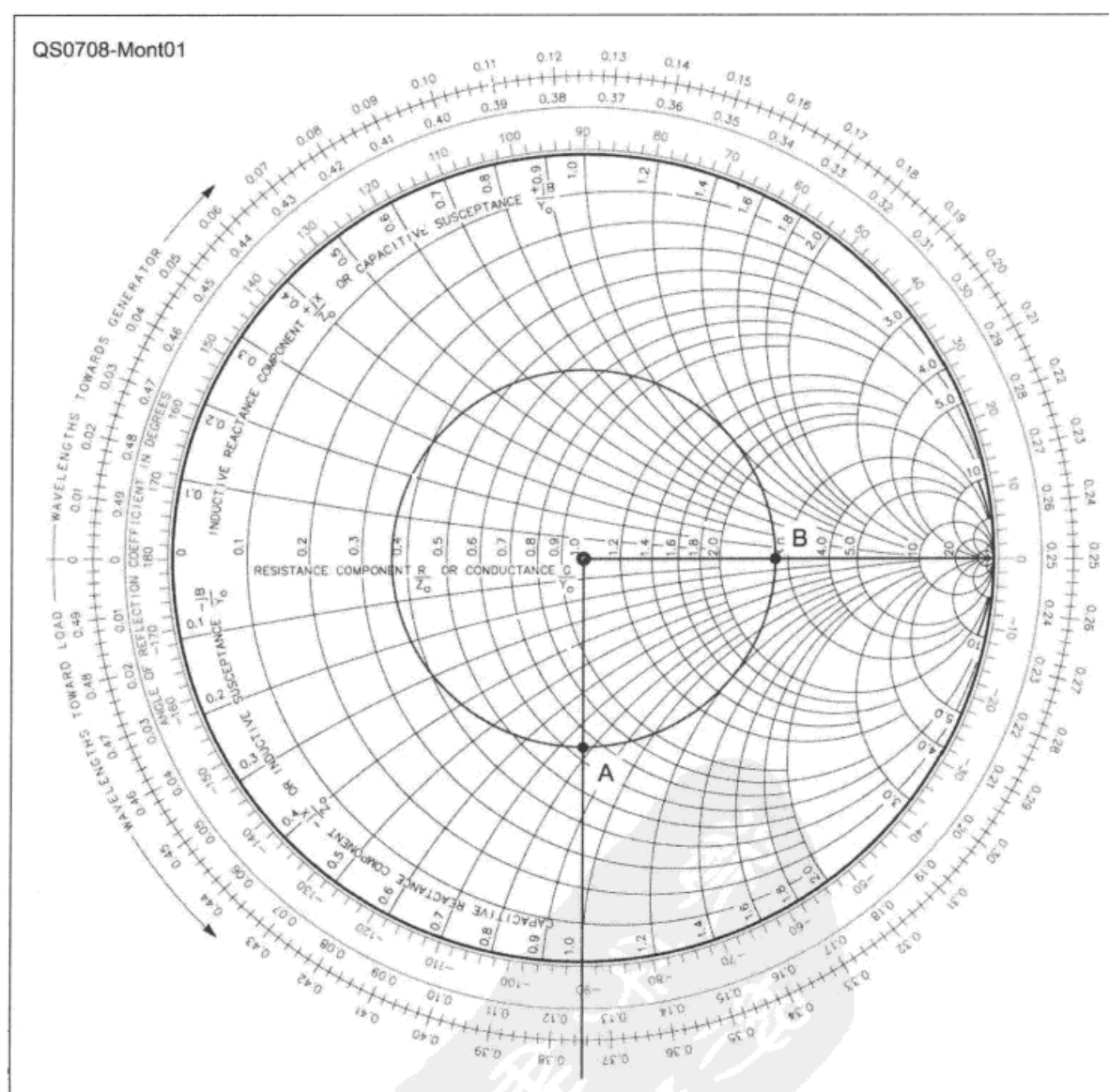


图 6.17 斯密斯圆图给出了沿着一段 75Ω 传输线到 200Ω 阻抗的匹配变换过程

表 6.5

准备材料 (除非特别说明, 以下材料数量均为 1)

铝管, 17 号 (Gauge), 3/4 英寸外径 6 英尺长, 3 根。可以从 Texas Towers 购买, www.texastowers.com

铝角料, 2 英寸 x 2 英寸 x 1/16 英寸, 8 英寸长

铝角料, 2 英寸 x 2 英寸 x 1/16 英寸, 2 英寸长, 用来安装连接器

螺丝, #8 x 1/2 英寸铝金属的, 数量 12

螺丝, #8 x 1/2 英寸 铝金属的或 3/16 英寸铝铆钉, 数量 12

PVC T 连接头, 1/2 英寸 x 1/2 英寸 x 1/2 英寸灰色聚乙烯水管, LASCO 配件公司的, Part# 1401-005 或类似。
可以从多数卖管材的五金店购买, 数量 4

塑料盖子 (可选), 黑色 3/4 英寸, 数量 8

用于 RG-8 电缆的 N 型连接器, 单孔, 法兰盘安装类型, 母型

电缆磁环, Fair-Rite part # 2643540002, 数量 4 (Mouser Electronics # 623-2643540002)

RG-59 聚乙烯发泡电缆, 10 英尺长

铜编织线, 4 英寸长木

接线环片, 无绝缘套的, 22-18 规格 (gauge), 8-10 号柱头, 数量 4

接线环片, 无绝缘套的, 12-10 规格 (gauge), 8-10 号柱头, 数量 4

热缩管, 用于 1/4 英寸电缆, 其他线扣, 胶布等根据需准备

Ox-Gard OX-100 油脂, 用于增强铝金属电气连接

6.3.1 EZ-Lindenblad 天线

EZ-Lindenblad 天线可以克服这些制作上的难题, EZ 方案中最关键的想法是, 去掉任何电气上的或机械上的难点, 只保留容易的部分。这就催生了一个主意: 4 个偶极子都只用电缆馈电, 而这些电缆只需要直接连接到连接器, 不需要阻抗匹配部件就可以了。这样就简单多了, 当然还需要满足能够良好工作这一前提! 既然不要额外的匹配部件, 那么如何得到与 50Ω 的良好匹配呢?

如果我们有办法使得 4 根馈线的每一根, 在连接器的地方看起来都是 200Ω 阻抗, 那么这 4 根并联在一起就是精确的 50Ω 了。我们只要用一段 $1/4$ 波长的 122Ω 电缆, 就可以做到这一点, 将每个 75Ω 的偶极子阻抗变换为 200Ω 。不过不巧的是, 要找到这种阻抗的电缆并不容易。

但是我们还是有办法用普通的 75Ω RG-59 电视馈线, 通过故意的阻抗失配来达成同样的目的。我们故意使电缆的驻波比 (SWR) 等于 $200/75$, 也就是 2.7:1, 通过选择适当的长度, 就可以让每根电缆在连接器的地方准确呈现 200Ω 。要使 SWR 等于 2.7:1 并不难, 只要将偶

极子单元尺寸稍微比谐振时的短一些就能达成，这个工作可以用 EZNEC 天线模型工具就能获得精确的偶极子尺寸。^[3]

平衡对称偶极子到不平衡同轴电缆之间的变换，可以采用廉价而且容易获得的磁环套在每根电缆上的方式来处理，它构成扼流式巴伦。唯一还需要确定的，就是所要求的馈线长度计算，这可以通过运用史密斯阻抗圆图来解决。

6.3.2 史密斯阻抗圆图

史密斯阻抗圆图是 1939 年贝尔实验室的 Phillip Smith 先生所发明的。^[4] Phillip 在高中时期，也是一位业余无线电爱好者，呼号为 1ANB。在 Tufts 学院毕业后，他就到贝尔实验室的无线电研究部工作。他职业中的一部分工作是很多关于阻抗的计算，在当时只能用手工操作很复杂的复数计算。当时 Smith 意识到应该可以采用图表的方式来帮助他减少计算工作，后来他所发明的这种图表，很快就被其他的无线电工程师采用，并成了标准的工程工具，时至今日还被广泛应用。史密斯圆图的相关技术信息和免费下载信息，可以到 ARRL 网站链接去获取。^[5]也可以参见本文图 6.17 所示的史密斯阻抗圆图。

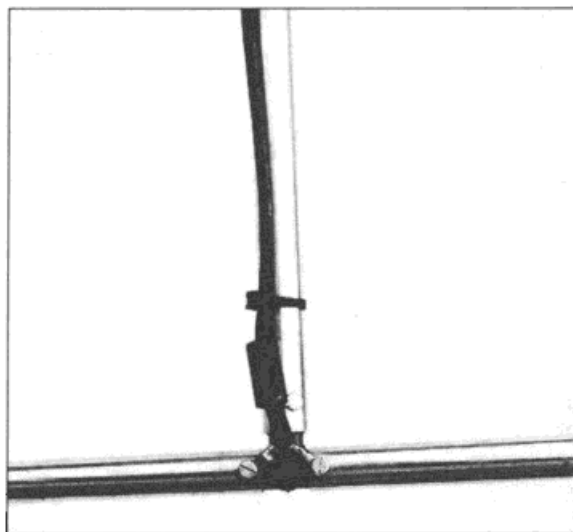


图 6.18 偶极子单元电气连接细节

运用史密斯圆图，我们就很容易确定用 75Ω 电缆转换为 200Ω 负载阻抗时所需要的长度。史密斯圆图在中心点是归一化为 1Ω 的，因此我们最终所得到的所有阻抗，都必须乘以电缆的特征阻抗 75Ω 。通过 EZNEC 的仿真，我们截短偶极子长度，使 SWR 等于 2.7:1。这时仿真结果表明，此时偶极子的阻抗为 $49-j55\Omega$ ，把它标注在圆图的 A 点。在连接器的地方所需要的 200Ω 阻抗，在圆图上标记为 B。在这两个阻抗点间画出 2.7:1 等 SWR 曲线，那么所需电缆的长度，就可以从沿着逆时针方向的刻度读出，也就是从 A 点到 B 点，沿着向源方向所走过的波长数。从阻抗圆图中，我们可以得到所需的电缆长度为 0.374 λ 。

这个 EZ-Lindenblad 天线，设计为中心工作频率 145.9MHz，以优化该卫星工作波段的性能。以 145.9MHz 来计算，那么波长长度就是 81 英寸，而且所用电缆的速度系数为 0.78，所以我们所需的真正馈线长度是 81 英寸 $\times$ 0.374 英寸 $\times$ 0.78 英寸 = 23.6 英寸。

现在，已经有几种做这个史密斯圆图计算工作的软件程序了，包括在 ARRL《天线手册》所提供的 TLW，以及 ARRL 早期提供的 MicroSmith 程序，都可以用来做相互验证。^[6]

6.3.3 制作

这种天线设计的样子高低不平，但备齐所有材料后，用手工制作起来并不难。所需材料参

见表 6.5。尽管要求不会太苛刻，但如果能用 17 号规格的铝管来制作，会更加容易，因为这该规格的管子内壁，正好比插入 T 型 PVC 连接头外壁小一点点。如果采用管壁更厚的铝管，则需要对 T 型 PVC 连接头进行打磨处理，以能够插入铝管内。

先制作用来安装 N 连接器以及十字交叉架的角型安装板。在角型安装板较短的边，开一个 5/8 英寸的孔，并在长边一侧用铆钉或螺钉固定好。已经固定好 N 连接器和电缆的完整角型安装板见图 6.19。

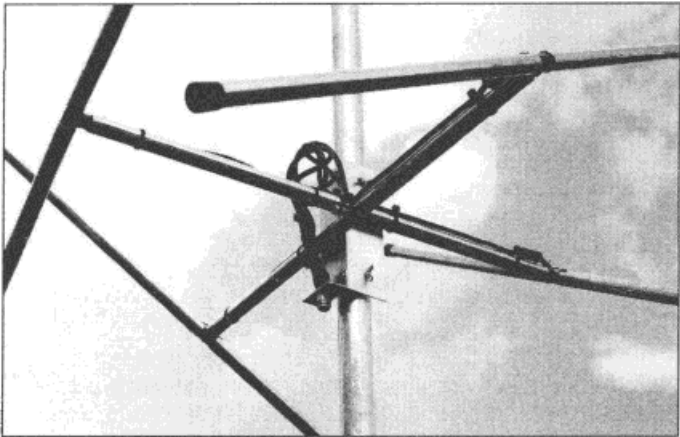


图 6.19 十字交叉架安装到支撑杆上的照片

表 6.6 铝管的长度		
说 明	数 量	长 度
偶极子单元	8	14 ¹¹ / ₁₆ 英寸
十字架横梁	2	23 英寸

接下来，按照表 6.6 的尺寸裁剪好用来做十字架和偶极子的铝管。在每根十字架管子的末端，开好螺钉孔，但暂时不要将螺钉拧上。将十字架用铆钉或螺钉固定到角板的长边，如图 6.19 所示，其中一根十字架横梁稍微在另一根上方。

两根十字架横梁都必须与角板垂直安装，以保证天线安装上之后正好水平。同时还要确保十字架以中心等长对称，每个十字架横梁的末端到中心点距离，均为 11¹/₂英寸。

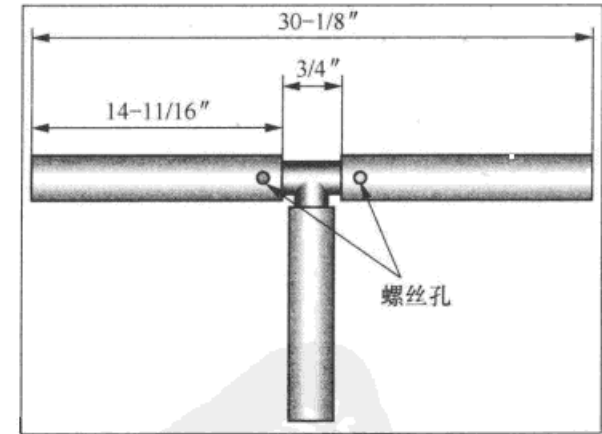


图 6.20 偶极子单元尺寸

接着制作偶极子单元，把 PVC 材料的 T 型连接头插入两根作为偶极子的铝管，有可能需要用小锤子轻轻敲打进去，如果太紧的话也有可能需要打磨一下 T 型连接头。整个偶极子的长度都必须非常准确，严格按照图 6.20 所示。

在每根偶极子铝管上先打好螺丝孔，但不要上螺丝，这些螺丝是要用来对偶极子中间做馈电连接用的，这些螺丝孔位距离（中间）末端 3/8 英寸。

偶极子单元的安装，需要一把小锤子，敲进每根十字架横梁末端的 PVC T 型连接头，尺寸见图 6.21。

接下来，临时将安装板固定到支撑杆，让十字架保持完全水平，这可以用量角器来测量。现在，就可以运用量角器，将（插入 T 型 PVC 接头后）偶极子往右手方向旋转 30° 角倾斜。透过原来在十字架横梁上已有的孔位，再钻一个小孔，用螺钉将此角度的偶极子单元固定好。为了美观些，可以在每个偶极子末端都套上 $3/4$ 英寸大小的黑色盖子。

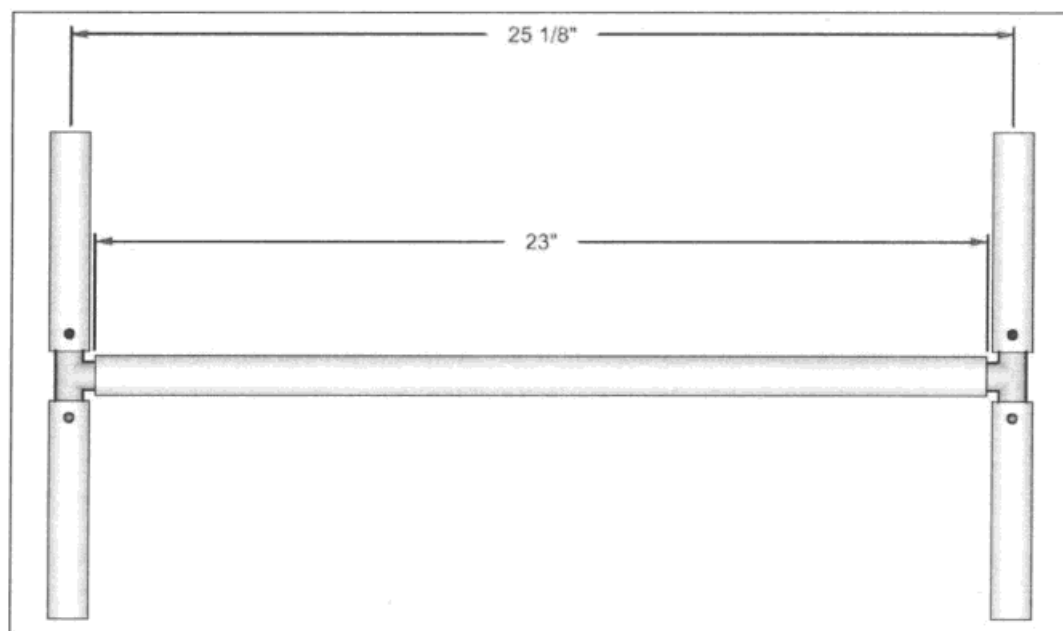


图 6.21 偶极子单元在十字架上的间隔尺寸

接下来呢，按照图 6.22 取 4 段 RG-59 电缆馈线，并剥好皮。与偶极子连接的那一头，将屏蔽网拧起来，成为接线。用一个小一点的接线垫圈接到电缆中心导体，再用一个大一点的接线垫圈，接到屏蔽网所拧成的接线。在电缆的另一头，不要拧散屏蔽网，只需要脱掉外层塑料皮。用 1 英寸的热缩管套进电缆并滑到偶极子的那一侧，接着再套入磁环并尽量靠近偶极子的一端（如滑到热缩管那边），可以在电缆外皮加点润滑油，使得套进去更顺利。

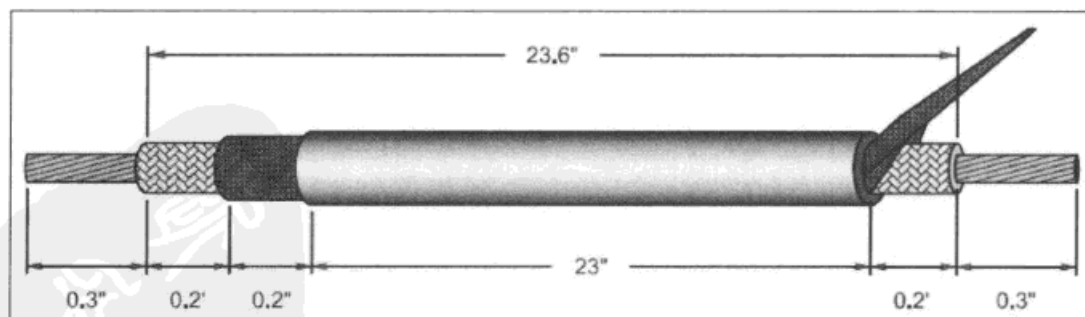


图 6.22 馈电电缆的剥线尺寸

将馈电接到偶极子上之前要做些准备工作，先用钢刷子清洁螺丝孔位，并涂上一些抗氧化的导电胶，以确保良好的电气接触。电缆的中心线接到位于上方的振子臂，屏蔽网是接到下方的一臂。连接时，用螺丝将接线垫圈与振子铝管锁一起，注意不要过度拧得太紧，以免铝管变形。

用一些抗氧化或防腐蚀的导电胶涂在 N 连接器周围固定孔，再找一段 4 英寸长度编织铜线，穿过 N 连接器的固定孔，作为接地连接。然后将 N 连接器锁紧到安装孔上并夹住编织铜线。用线扣或胶带，将 4 根电缆靠近连接器的一侧扎一起，适当调整各电缆，保证各自的接地屏蔽网连接一起，而且所有中心导线也伸出对齐，但不要将这些中心导线扭绞一起。细心地将这 4 根中心导线与 N 连接器中心连接柱推到一起，用焊锡焊牢靠。最后用电胶布把露出来的中心导线和连接器包扎好。

把刚才已经夹住在 N 连接器的编织铜线，裹住四根电缆裸露在外的屏蔽网，并牢牢焊接在一起。这个过程可能会比较烫，注意不要烫坏绝缘层。在冷却后，再用电胶布把所有裸露部分包扎起来，用线扣扎紧。这束电缆最后要用线扣固定到十字架横梁上。

使用安装板的办法或采用任何方便的方式，把天线固定到天线支撑杆上。如果要永久性固定安装使用，也可以在安装板上钻孔并用 U 型螺栓来固定。我的这个天线主要目的是便携使用，所以只是在安装板上钻了 2 个孔，用于装 #8 的不锈钢螺丝。这些螺丝可以穿过我的便携式天线支撑杆孔位，然后用手拧的碟形螺母就可以了。这个办法可以让我在一分钟内将天线装好或卸下来。图 6.23 是天线完成之后，参加 2006 年野外通联的照片，在天线杆上部的那个天线是工作在 70cm 波段的。

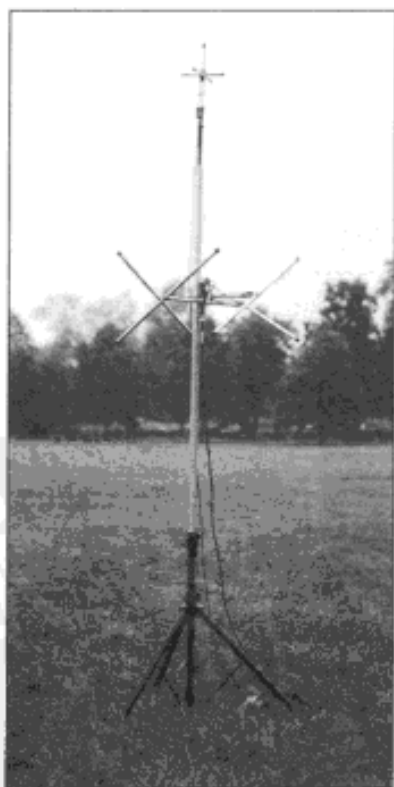


图 6.23 用作便携或野外使用的 EZ-Lindenblad 天线，顶上那个天线是工作在 70cm 波段的

6.3.4 驻波比

对于该天线的阻抗匹配到 50Ω 的测试，可以用 MFJ-259B SWR 分析仪，它可以数字方式读出测得的 SWR 值。分析仪频率的精确度用另外的频率计校验过，并用 Narda 精密 50Ω 负载校准了 1.0:1 驻波比。

用一段 6 英尺长的 Belden9913F7 低损耗电缆跳线，把天线与 SWR 分析仪连接起来，分析仪以 1MHz 间隔从 144 ~ 148MHz 进行测量。测量结果如图 6.24 所示，可见这个天线在整个 2m 波段工作频率范围内，都能得到非常好的匹配。

6.3.5 承受功率

这个天线对于目前所有的 VHF 收发信机输出功率来说都是安全的，曾经测试过 200W 的连续输入功率，时间为 $9\frac{1}{2}$ min，之后立即检查电缆和磁环，没有发现有明显的温度上升现象。

6.3.6 辐射图

用 EZNEC 预测出的天线辐射图参见图 6.25，这是仰角面的天线辐射图，天线安装在 6 英尺高度，如果架设得更高会在水平面上覆盖得更好。如图 6.25 所示，天线在低仰角比较好，在 5° 和 25° 有两个 -3dB 点，在 13° 角有最大 4.8dBic（相对于圆极化等向天线）增益，这对于 LEO 卫星来说非常合适。多数的这类卫星越过时都在这个范围内，并且卫星在这个时，可以提供最大距离的 DX 通联机会。

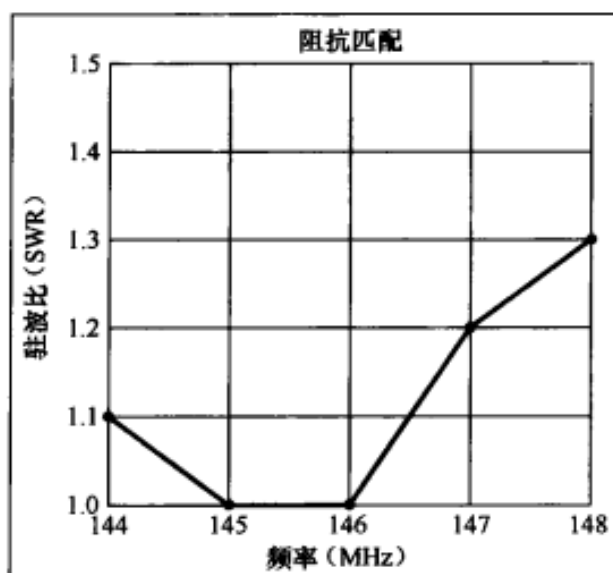


图 6.24 Lindenblad 天线在 50Ω 负载时的 SWR 曲线

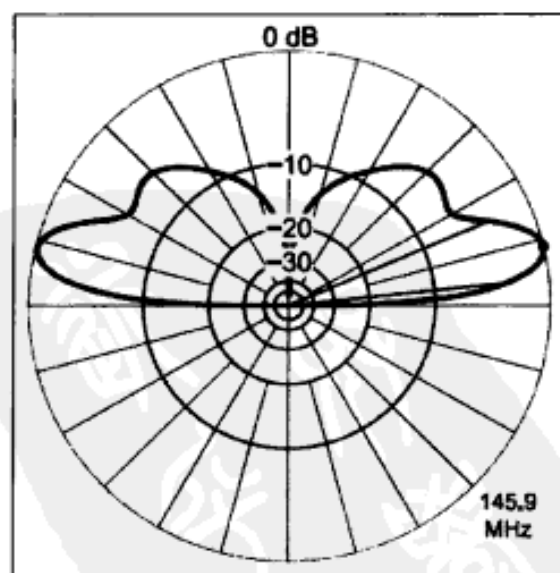


图 6.25 EZNEC 给出的 Lindenblad 天线辐射图

该天线是右手圆极化方式的，可以用于与任何 2m 波段的 LEO 卫星通信。圆极化的检测，可以测量水平与垂直的电场分量差。可以用一个安装在 100 英尺远的线极化天线，连接到 FT-817 电台，关闭 AGC 功能，电台的音频输出连接到一个带有 dB 刻度的 AC 电表。测试结果表明，分量差在 3dB 以内，这对于全向天线来说相当不错了，通常极化不同的天线，将有 30dB 的极化差。

6.3.7 实际通联

这个 EZ-Lindenblad 天线曾与 AO-07、FO-29、SO-50、AO-51、VO-52、NO-44、NO-60

和 NO-61 卫星，做过 SSB、FM 和数据方式的通信。如前面图 5 所示的那种便携安装方式，在北海岸无线电协会 NS1RA，2006 年野外通信作为卫星站效劳过。野外的通联对于任何便携式天线是个很好的检验，尤其在每年卫星通信最繁忙的那 48 个小时中，EZ-Lindenblad 天线经受住了这个考验。

该天线的早期版本在 2006 年 10 月份的 AMSAT Space Symposium Proceedings 发表过。

附注：

^[1]IG. Brown and O. Woodward Jr. *Circularly Polarized Omnidirectional Antenna*, RCA Review, Vol 8, no. 2, Jun 1947, pp 259-269.

^[2]See Note 1.

^[3]EZNEC+ V4 antenna analysis software by Roy W. Lewallen, W7EL, available from www.eznec.com.

^[4]F. Polkinghorn, "Phillip H. Smith, Electrical Engineer, an Oral History," IEEE History Center, Rutgers University, New Brunswick, NJ. Available at www.ieee.org.

^[5]Smith Chart information is available at www.arrl.org/tis/info/chart.html.

^[6]R. D. Straw, Editor, *The ARRL 《天线手册》*, 21st Edition.

Tony Monteiro, AA2TX 在 1973 年获得 WN2RBM 呼号，他在电子行业工作了 25 年，起初在贝尔实验室作为一名技术研究职员，之后担任过数家电信公司的工程总监。您可以通过以下邮箱联系到 Tony: aa2tx@amsat.org.

6.4 用于 Phase 3E 卫星的外观小巧螺旋馈源：系统仿真与测量

Paolo Antoniazzi (IW2ACD) 与 Marco Arecco (IK2WAQ)

本文两位作者针对 2.4GHz 频段的卫星上的抛物面天线螺旋馈电系统，做了建模、制作和性能的测量。

6.4.1 前言

应用螺旋天线与螺旋馈源碟型天线想法的诞生，很重要的驱动力来自革命性的新一代

卫星出现：Phase 3 系列卫星。在 2004 年初，Phase 3D 的电池不幸损坏，导致了这个命名为 AO-40 的卫星无法再正常工作。因此德国的业余无线电卫星组织 AMSAT DL 开始制造新的 Phase 3E (见图 6.26)，并预计在接下来的数年内发送上天^[1, 2, 3]。Phase 3E 宣称的目标是，为新来者提供一个高轨道卫星通信平台，提供如同那些以前工作在 AO-40 的 S 和 K 模式的通信。

在更高的频段上，未来的 P5A 火星站卫星，拟工作在 10.5GHz 的通信链路，也在仿真与测试之中，这些都意味着会有更多天线与模块工作于微波频段^[4]。从这个角度上考虑，并结合热衷于与新卫星通信的爱好者的需求，第一次用 AutoCAD 完成了整个天线系统（碟型反射面与螺旋馈源）的商用设计（见图 6.27），并用 NEC2 仿真和 NEC 综合，最后进行实际的测试。

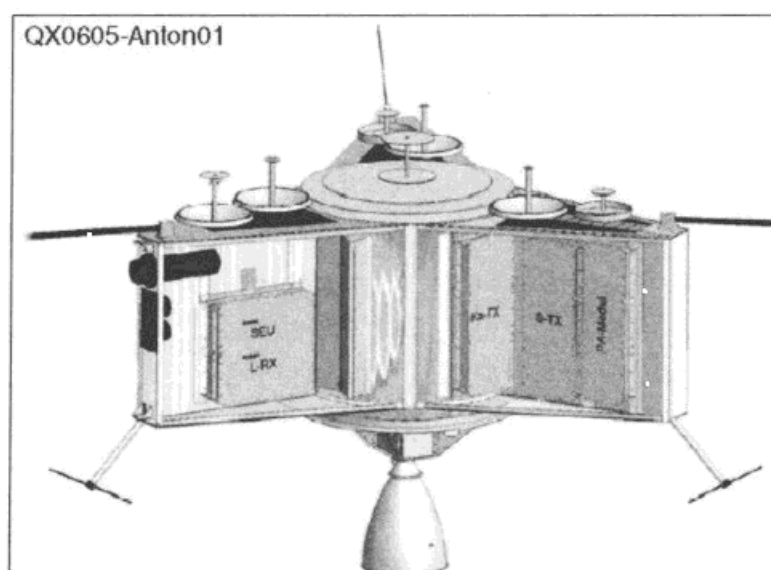


图 6.26 来自 AMSAT 新的卫星计划：Phase 3E

对于圆极化应用来说，轴向模方式工作的螺旋天线自然成为候选者，因为它本身的形状就具备了很好的极化性能，不再需要特别的馈电设计。螺旋天线的极化特性，自 Kraus 教授^[5, 6]早期研究以来，就有多个期刊研讨发表过这个题目。通常，倾斜角，是螺旋天线十分重要的参数，可以选择在 $12^\circ \sim 16^\circ$ 之间。这个倾斜角 α ，是指螺旋线切线与螺旋天线轴向垂直平面之间的夹角。

在以前，倾斜角较小的螺旋，对于圆极化波来说，已经被认为是无效的辐射振子。然而，当用 NEC-Win Pro 计算和彻底的实际测量后发现，相对于传统的长螺旋而言有更高的增益^[7]。因此提议设计了一个工作于 2.4GHz 波段的完整天线系统，包括一个非常短的螺旋馈源和一个 60cm 的碟型反射面。这个原型项目天线，应用统一分段技术（Uniform Segmentation Technique），仿真了螺旋馈源地网和碟型天线反射表面，避免仿真程序因螺旋圈导线几何形状中心之间靠得太近而带来的限制。

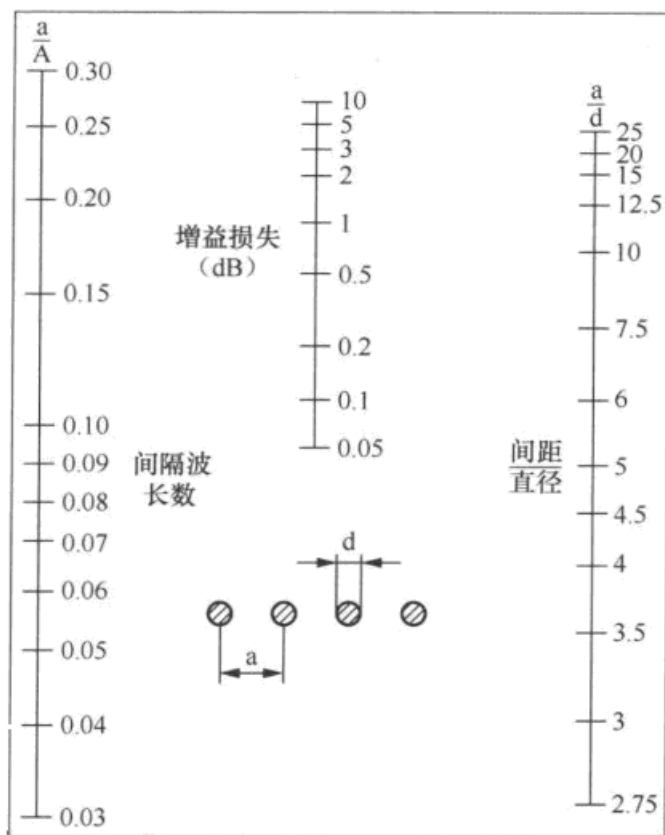
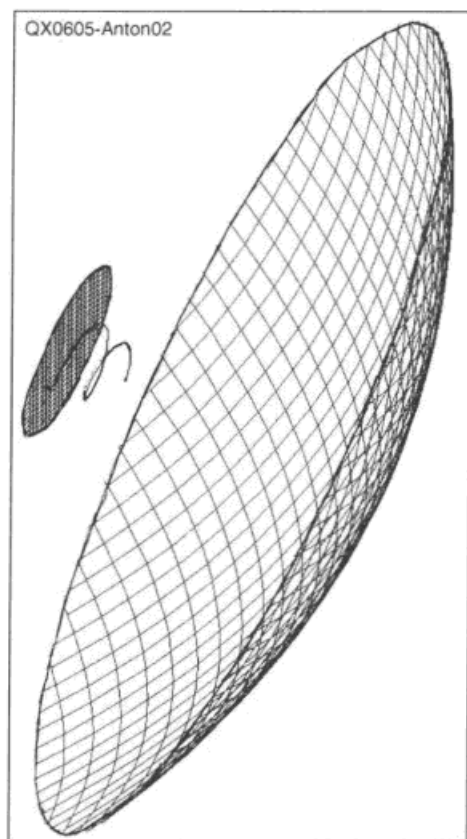


图 6.27 完整的碟型天线系统机械设计 (DXF 格式)

图 6.28 以网格尺寸为参数的栅格反射器增益损耗表

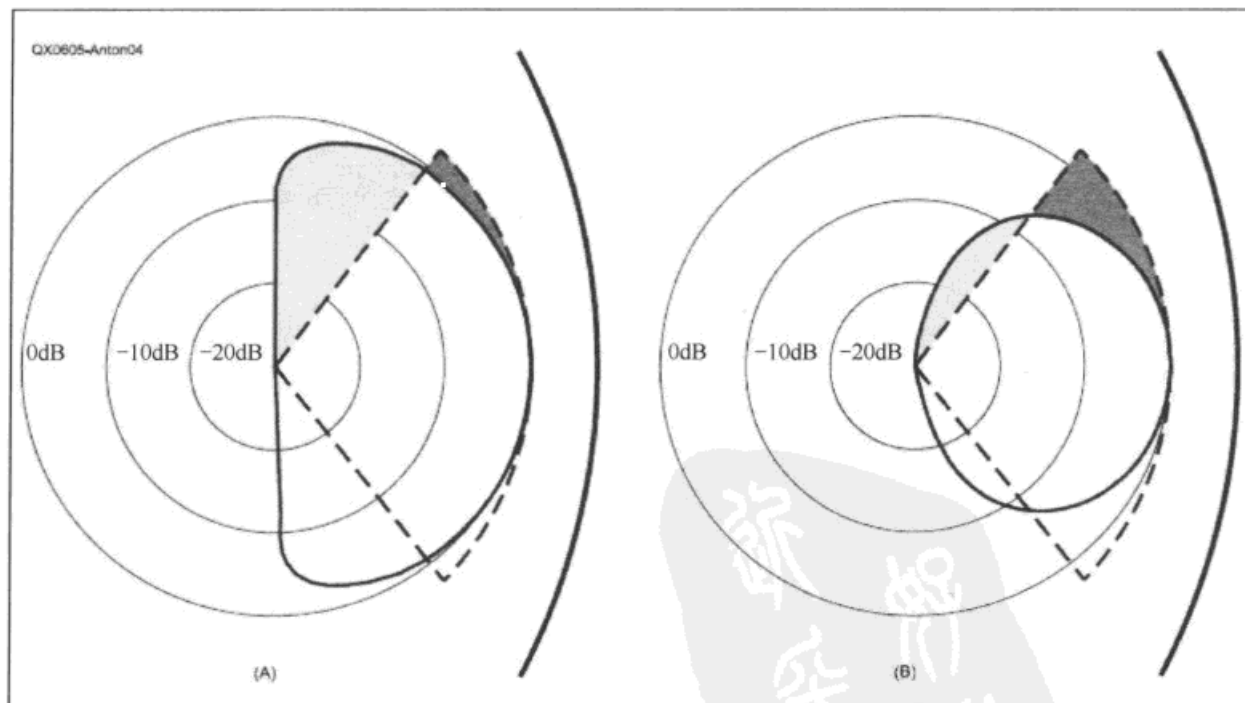


图 6.29 (A) 给出了碟型反射面照射与溢出损耗在 (锥度 taper=3dB) 情况, 与 (B) 给出了碟型反射面照射与溢出损耗在 (锥度 taper=10dB) 情况

6.4.2 碟型反射面

抛物面碟型天线可以在微波波段提供非常高的功率增益，在合适的工作频率上，这种天线的增益，经过合理正确的制作，仅仅取决于抛物反射面尺寸的大小和精度。碟面形状按照抛物曲线旋转：即抛物线沿着焦点与曲线中心点的连线旋转而成。之所以这里选择正馈的抛物面而不用偏馈方式，是考虑到焦点容易被找到，并且能够精确而简单地将馈源放置于焦点中心。

这里所考虑到的反射面物理尺寸，主要是碟面的直径 $D=600\text{mm}$ ，以及中心的深度 $c=94\text{mm}$ 。有了这两个数据，我们就可以计算出焦距 f 和 f/D 比（方便于对抛物面的表达），以及功率增益 G （单位 dBi，相对于等方向辐射）：

$$f = D/(16c) = 239.4\text{mm} \text{ 则 } f/D \approx 0.4$$
$$G = 10\log_{10}[(\pi^2 - D^2\eta^2)/\lambda^2]$$

其中 λ 是以 mm 为单位的波长

$$\eta = \text{天线效率} (<1)$$

后面的等式由天线的有效捕获面积倒推而来的。

这是以碟型天线指向一定距离外全向天线发射时的简化几何计算方式，它假定了该全向天线是一个向四周等向辐射的点源。

效率是指馈源连接点所接收到的功率，与到达该天线的实际所有功率之比。我们假设，考虑无耗天线的理想条件下（ $\eta=1$ ），这个天线的功率增益可以达到 $G_{\max}=23.6\text{dBi}$ ，而实际上的增益应该为 $G=20.6\text{dBi}$ ，那么天线的效率就下降至 50%（ $\eta=0.5$ ）。在对整个天线系统仿真结果评估后，对此会做更多的分析。

如前面序言所述，为避免 NEC-Win Synth 软件建模的误差问题，我们决定用 AutoCAD 绘图生成用于仿真软件的文件^[7]。下面方程式是经典的旋转抛物曲线表达式，在任何分析几何手册中都可以找到：

$$y = x^2/(4f) + z^2/(4f)$$

其中： x 、 y 和 z 是反射面空间以 mm 为单位的 3 个坐标值。

在这里，我们使用 NEC-Win Synth 软件有两个目的：将 .DXF 格式转换为 .NEC 格式，以及去除 AutoCAD 引入的可能分段误差。这个转换是必须要做的，因为 NEC-Win Synth 软件只接受 .NEC 格式文件。

为了在仿真精度与计算时间上取得折中（整个系统总的分段数将达到 2102），决定使用间隔 $a=20\text{mm}$ 的栅格反射面，栅格线径 $d=6\text{mm}$ ，这种配合以及辅助计算图表见图 6.28，可以用它计算出采用非实心发射面时的增益损失。在曲线中，这里需要输入的值是 $a/\lambda=0.16$ 以及 $a/d=3.33$ ，可以得到很低的增益损失：小于 0.05dB（在图 6.28 中没有画出）。

可以告诉你的是，Microsoft Excel 也是可以用在这里的，只是要得出 .NEC 格式文件，过程比较复杂，需要手工计算。首先要设计一个与 NEC-Win Pro 兼容格式的表格，但可以只

需算出一半的抛物曲线数据,然后将这个算出的数据文件,通过 Excel 转换为文本文件,再转换为 .NEC 格式文件。为了产生整个反射面的数据, NEC-Win Pro 可以做 90° 旋转和三次复制操作。在这个过程中,还有一个不便之处是, NEC-Win Synth 无法去除可能的分段误差,因为这个软件中不认得“GM”的指令格式。

6.4.3 外观小巧(不引人注意的)螺旋馈源

我们可以用一个射频源,放置在抛物线焦点上,作为这个 60cm 直径碟型天线的馈源,其波束宽度可以通过下式计算:

$$\theta = 2\arctan[D/2(f-c)] \approx 128^\circ$$

几乎所有的馈源提供给碟面边缘的能量,要都要小于中央区域^[9]。在边缘的能量差定义为“边缘锥度(edge taper)”。改变馈源的辐射形状,可以改变对碟面边缘的照射。不同的边缘锥度将会产生不同的照射度和溢出损失:较小的边缘锥度会导致较大的溢出损失;而较大的边缘锥度能减少溢出损失,但却以增加照射损耗为代价。为此,通常选取边缘或者说照射锥度大约为 10dB 时,可得到最大的天线效率。

仔细观察抛物面表面,我们可以发现在中心位置的焦距长度($f=239.4\text{mm}$)要比焦点到边缘的距离 d 短:

$$d = \sqrt{(D/2)^2 + (f-c)^2} = 333\text{mm}$$

因此,沿着边缘的电波将遵从从一个附加的“ ΔA ”衰减:

$$\Delta A = 20\log_{10}(d/f) = 2.9\text{dB}$$

这个计算式来自自由空间衰减方程,其中的变量频率以及增益都为常量(亦定义为倒平方律),因此在这个计算式没有出现。

考虑到刚才分析的附加衰减,最佳的照射锥度应该变成: 7.1dB(10dB-2.9dB)。每种微波部件构成的馈源,如偶极子、喇叭、波导、螺旋等,都能够在反射面上聚焦到已经计算好的所需波束宽度 θ 。考虑到我们之前仿真和制作这类天线的经验^[10, 11, 12],这里采用了螺旋作为馈源。在图 6.29 中,我们可以看到两种不同情况下(3dB 锥度与 10dB 锥度),溢出与照射损失情况。

一个典型的螺旋天线,其电流沿着长度的分布情况可以分为 3 个不同的区:

- (1) 馈电点附近,电流按指数衰减。
- (2) 开路末端附近,存在明显驻波。
- (3) 在螺旋线两端之间,具有相对均衡的电流分布与较小的 SWR(如同传输线上)。

有两种办法可以得到良好圆极化特性的螺旋:

- (1) 靠近开路末端的地方渐变螺旋圈,以减小来自末端的反射电流。
- (2) 只用第一个螺旋圈,因为此处为自馈电点到第一个最小点电流逐渐衰减(参见图 6.30)。

从这些考虑因素出发,我们最终这个小巧不引人瞩目的螺旋馈源,就选用了间距 $a = 0.16\lambda$ (在 2.4GHz 上是 20mm),两个锥状绕制的圆圈直径为 62/41mm,非常短(只有 1.7 圈,如图 6.31

的照片所示)。

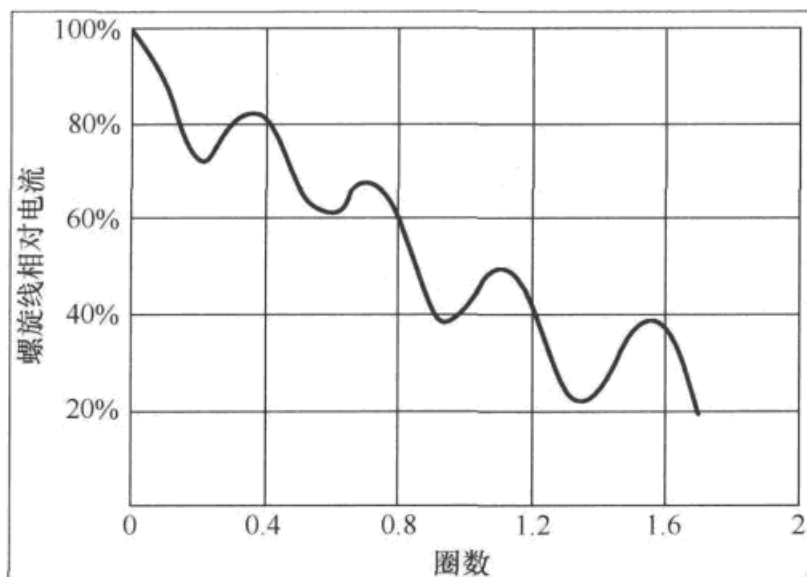


图 6.30 用 NEC-Win Pro 的电流仿真 (低高度螺旋天线)

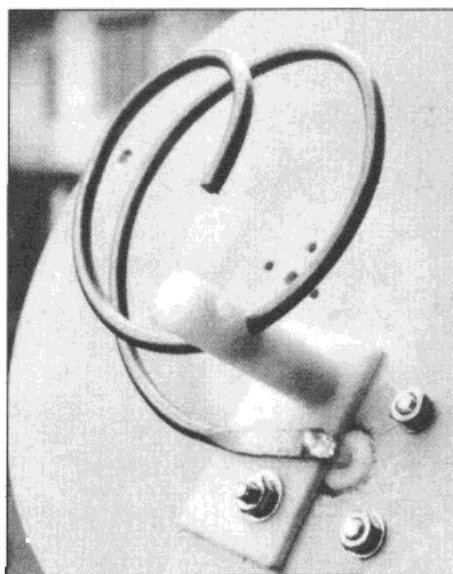


图 6.31 螺旋馈源的放大图

现在我们小结一下这个 60cm 碟型天线所用馈源的各个机械尺寸:

- (1) 螺旋圈数: 1.7(每圈分为 10 个段)(译注: 分段是为了仿真计算用)
- (2) 邻近两圈间距: 20mm
- (3) 起始圈直径: 62mm
- (4) 最后圈直径: 41mm
- (5) 螺旋线径: 3mm
- (6) 短截线: 长度 6mm, 线径 2mm。这里只是为了仿真目的用
- (7) 反射屏直径: 125mm, 线径 1mm

对刚才所描述的馈源做了 674 段的分段: 螺旋和短截线用了 18 段, 其余的 654 段用在反射屏上, 分段间距为 6.25mm。

用 NEC Win Pro 软件对该馈源进行仿真(参见备注 10 和表格 6.6), 得出工作在 2.4GHz 时的结果:

功率增益: $G = 9.6\text{dB}$

辐射角: -3dB 情况下 59° , -7.1dB 时为 91° , -10dB 时为 107° , -14dB 时为 146° , 在 -17dB 时为 146° 。

前后比: 16.6dB

在图 6.32 中, 给出了功率增益与角度 θ 和 φ 分别在垂直和平行于波传播方向时的关系。

从仿真结果中您可以看到, 我们这个 21dB 增益的碟面, 其照射损失却非常大, 不过对于前后比 F/B , 第二旁瓣以及溢出点有好处。

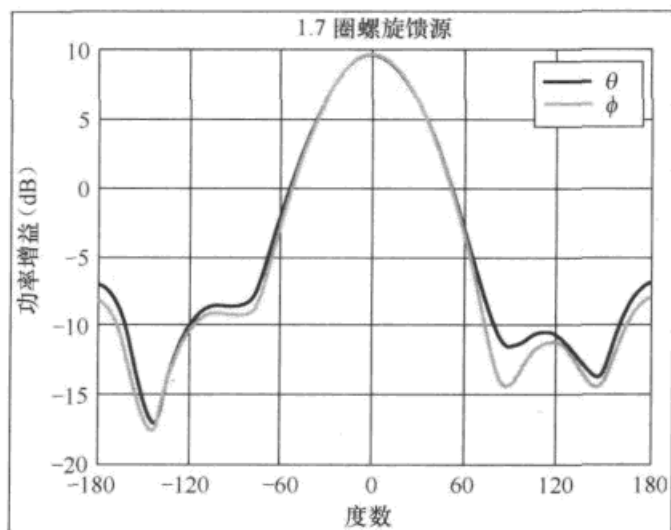


图 6.32 低高度馈源的仿真辐射图

表 6.7 各种小巧螺旋馈源的不同仿真结果（1.7 圈，间距 =20mm）

螺旋直径与形状 (mm)	反射器类型与尺寸 (mm)	增益 (dB) $f=2.2\text{GHz}$	增益 (dB) $f=2.4\text{GHz}$	增益 (dB) $f=2.6\text{GHz}$
67.5/45.0 圆锥状	正方形 125×125	9.49	9.64	8.80
62.0/41.0 圆锥状	正方形 125×125	9.35	9.73	9.84
62.0/41.0 圆锥状	圆形 (直径=124)	9.31	9.59	9.55
56.0 圆柱状	正方形 125×125	9.39	9.68	8.52
67.5/45.0 圆锥状	正方形 75×75	9.15	9.28	8.36
62.0/41.0 圆锥状	正方形 75×75	8.84	9.29	9.39
56.0 圆柱状	正方形 75×75	8.90	9.19	8.38

表 6.8 工作在 2.4GHz 的馈源位置与整个系统的仿真增益值 G 和前后比 F/B 馈源反射器

与抛物面表 面距离 (mm)	功率增益 (dB)	-3dB 辐射角 (度)	前后比 (dB)	备 注
220	20.33	16	32.24	高照射损失与很低的溢出损失
230	20.23	16	30.98	
240	20.19	15	30.34	
250	20.57	15	30.08	
260	21.25	16	28.6	
265	21.38	16	27.87	最好功率增益
270	21.35	16	27.45	
280	21.05	15	26.85	
290	20.90	16	26.30	

馈源反射器的直径 =125mm

6.4.4 完整系统

在仿真的阶段，我们对原文件做了些修改，以对天线性能进行优化尝试。首先是对馈源反射器的直径，我们将它从 125mm 减少到 100mm，目的是想降低它对反射面反射波束的遮挡影响，可以降低 36%。但发现这个修改对于功率增益（-0.05dB）以及前后比（-1dB）影响很小，因此我们又决定返回原来的反射器直径：125mm。

第二个修改是增加馈源地网与抛物面之间的距离，从 220 改变为 290mm。从功率增益来看，最佳距离为 265mm，这也是对于业余爱好者来说最在乎的参数（见表 6.7）。

在理论上，碟型天线接收信号时是这样工作的：远处发射源的电磁波平行入射，被抛物面反射到一个公共点上，即抛物线焦点。作为发射天线则相反的过程：位于焦点的点发射源产生电波，被反射成沿着抛物面轴线平行发出的波束。

理论与实际上的主要差异，与下列有关：

（1）焦点只是一个几何点，而实际馈源总比它要大。

（2）要找到缩短型圆锥状螺旋的准确电中心，并不容易。考虑到仿真结果，以及所计算得到的焦距，可以放置在总馈源长度 3/4 位置（即 34mm）。

经过上述的优化处理，最后得到工作在 2.4GHz 时的仿真结果如下：

功率增益：21.4dBi

波束宽度：-3dB 处为 16°

前后比：29.7dB

图 6.33 给出了功率增益图，以方位角 ϕ 和仰角 θ 作为参数。

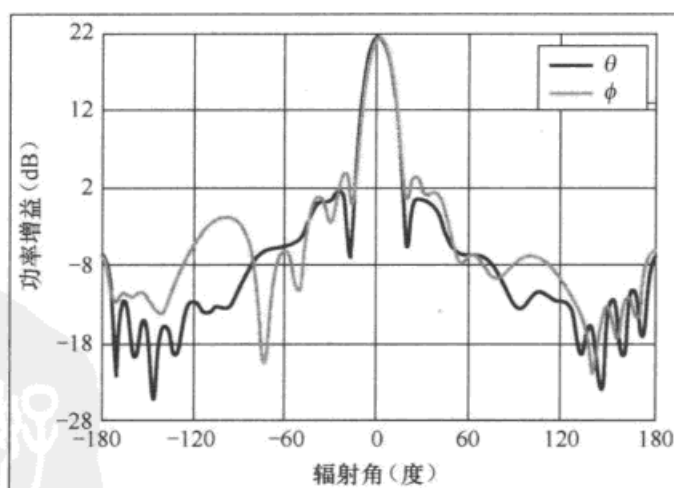


图 6.33 整个天线系统的仿真辐射图

现在我们就可以算出天线的效率 η 了，它也就是仿真得到的增益，与最大可用增益 $G_{\max}$ 的比值， $G_{\max}$ 通过天线捕获面积已经算出。

$$\eta = (10^{G/10})/[(\pi D/\lambda)^2] \approx 60\%$$

我们整个天线的效率损失（大约 2.2dB）可以参考碟型天线照射量（即表 6.7）。我们认为碟面是均匀照射的，因此损耗的增加，就是由于电磁波到达反射面周边与中心区的不同路径所导致的。至于溢出与旁瓣损耗则可以忽略不计。

6.4.5 碟型天线测量

整个天线系统如图 6.34 所示，以我们的经验，设计工作在不同频率和具有不同增益的螺旋馈源，并不是太难的事情，对于认真的实验者来说，比较难的是找到一种精确的测量办法。

在进行测量之前，非常有必要对测试的螺旋极化做一个定义，按照 IEEE 的标准定义，从馈电点一端往天线看进去，顺时针方向绕制的，就是右手圆极化（RHC）方式，如果按照逆时针方向绕制，则是左手圆极化（LHC）方式。弄清楚这点非常重要，因为当两个电台都使用螺旋天线，经过一段无反射路径后，两个天线都必须具有相同的极化方式。如果两个天线的极化方式相反，那么将会由于交叉极化而导致 20dB 到 30dB 的信号损耗。需要注意到是，整个碟型天线系统产生的圆极化与馈源本身的极化方式正好是相反的（因为电波经过了反射面的反射）！

为了进行比较全面的测试，我们使用一台 Mini-Circuits 公司 JTOS-3000 VCO 的信号发生器，频率范围从 2.2 ~ 2.7GHz，再接上型号为 MNA-6 的宽带放大器，也可以用 Keps 0535AN2。由于振荡器的输出电平相当高（+10dBm），为稳定起见（宽带放大器在负载并不精确为 50Ω 时往往容易发生振荡），可以加入衰减器。检测器用 Boonton 的 RF 毫伏表（型号 92B），在 2.4GHz 时灵敏度将下降 10dB（相对于最大的正常工作频率范围），当然更胜任的测量仪器可以使用经典的 HP431B 功率计。

为了减少测量误差，应该考虑发射与接收天线之间的合适距离。为了确定合适距离，你应该考虑选频 RF 电压表在测量信号电平刚好有 20 ~ 30dB 的动态范围。同时也要尽量使电波平坦到达接收天线。

第一个条件是很容易达成的，先测得接收功率，并计算自由空间电磁波损耗：

$$A = 32.4 + 20\log(f) + 20\log(d) G_t - G_r$$

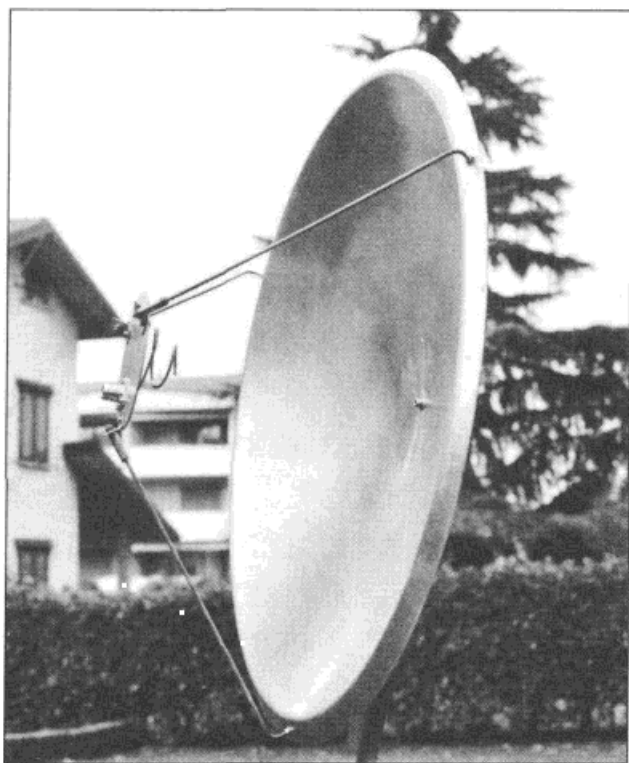


图 6.34 60cm 碟型天线全图

其中 A 是以分贝为单位的损耗, f 是以 MHz 为单位的频率, d 是以 km 为单位的距离, G_t 是发射天线 dBi 增益, G_r 是接收天线增益, 单位也是 dBi, 两者可以通过仿真得到。

也有一个简单易记的方式来计算自由空间损耗, 即按照两天线之间的波长数作为距离来考虑。由于当两个全向天线之间的距离 $d = \lambda$ 时, 自由空间损耗总是为 22dB, 这个实际距离在 2400MHz 时为 12.5cm, 那么每增加一倍距离, 其自由空间损耗就增加 6dB。这就是说, 自由空间损耗在 0.125m 的距离为 22dB, 在 0.25m 距离为 28dB, 在 0.5m 距离为 34dB, 依此类推。为了使得到达接收天线的电波尽量平坦均匀, 要求接收天线的捕获面积 (m^2) 为:

$$A_c = G_r \lambda^2 / 4\pi$$

该表达式在不考虑天线的热损耗时成立, 对我们的实验很有用。对于圆形捕获面积而言, 两个天线之间最小距离 (单位: m) 必须满足:

$$d > nD^2/\lambda$$

其中 D 为以米 (m) 为单位的碟型直径。

另外还要考虑最大可接受的相位误差问题。对于 22.5° 的相位误差来说, 通常可以接受的, 此时可选 $n = 2$; 如果相位误差要求只有 5° , 则需要取 $n=9$ 。^{[13][14]} 2.4GHz 频率的自由空间损耗可以参见图 6.35。我们所选择的测试位置 (在花园里) 对于我们这个项目的螺旋天线测量, 尤其合适 (在 2400MHz 时, $d = 4m = 32\lambda$)。

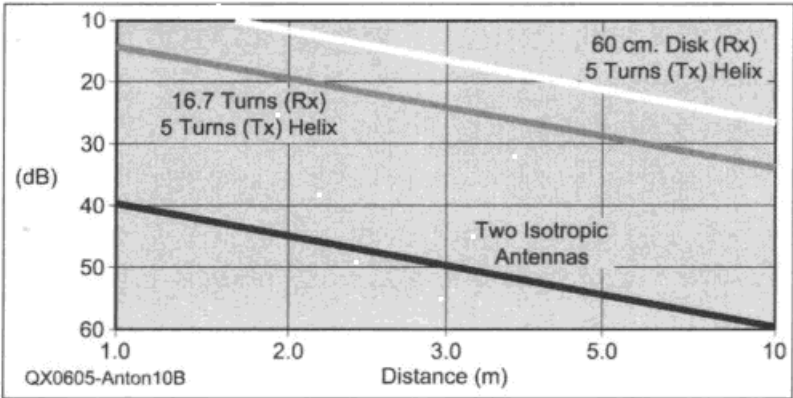


图 6.35 2.4GHz 的自由空间损耗

表 6.9 最后比较了仿真结果与我们实测数据。

表 6.9 60cm 直径碟型天线与标准的 16.7 圈螺旋天线的性能比较

天 线 类 型	仿 真 结 果			实 测 数 据	
	功率增益 (dBi)	辐射角度 (-3dB)	前后比 (dB)	辐射角度 (-3dB)	相对增益 (dB)
60cm 碟型天线	21.4	16	27.9	14	+7
16.7 圈螺旋天线	14.5	26	18.5	30	0

附注:

- [1] “P3-Express — An Intermediate Report,” *AMSAT-DL Journal*, Dec/Feb 2003/2004.
- [2] “AMSAT-Phase 3 EXPRESS,” *AMSAT-DL Journal*, Sep/Nov 2003.
- [3] “P3E News,” *AMSAT-DL Journal*, Mar/May 2004.
- [4] P. Antoniazzi and M. Arecco, “Chaparral Style 10 GHz Feed Simulation,” *DUBUS*, N.2/2005, pp 38 to 50.
- [5] John D. Kraus, The Helical Antenna, pp 265 to 339, *Antennas*, McGraw-Hill, 2nd Edition, 1988.
- [6] H. Nakano, Y. Samada and J. Yamauchi, “Axial Mode Helical Antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, pp 1143 to 1148.
- [7] www.nittany-scientific.com (NEC-Win Pro Rel 1.4 and NEC-Win Synth Rel 1.0).
- [8] *Microwave handbook*, Volume 1, RSGB, 1989, p 4.21
- [9] W1GHZ, *Microwave Antenna handbook Online*, www.w1ghz.org.
- [10] P. Antoniazzi and M. Arecco, “Simulating and Making Low Profile WiFi Antennae,” *Electronics World*, Dec 2004, pp 22 to 25.
- [11] P. Antoniazzi and M. Arecco, “Measuring 2.4 GHz Helix Antennas using Slotted Lines,” *Electronics World*, Jul 2003, pp 47 to 52.
- [12] P. Antoniazzi and M. Arecco, “Measuring 2.4 GHz Helix Antennas,” *QEX*, May/Jun 2004, pp 14 to 22.
- [13] P. Antoniazzi and M. Arecco, “Measuring Yagis,” *Electronics World*, Dec 1998, pp 1002 to 1006.
- [14] D. R. J. White, *Electromagnetic Interference and Compatibility*, Vol 2, D. White Consult, Inc, 1980, pp 2.11 to 2.13.

Paolo Antoniazzi 在 1961 年获得 IW2ACD 呼号许可, 并成为意大利业余无线电协会 (ARI) 会员。他曾在西门子、GTE、Sprague 以及 ST 微电子公司工作从事 RF 领域和通信营销方面的工作, 2003 年退休。Paolo 对仿真技术与测量尤其感兴趣 (并撰写文章), 包括窄带 LF, 2.4GHz 和最近的 10GHz 频段。将来最感兴趣的对是 P3E 和 P5A 卫星的空间通信。

Marco Arecco, 呼号 IK2WAQ, 在半导体制造领域方面有丰富的经验, 于 ST 微电子公司工作了 35 年, 在 2004 年初退休前的职位, 是非易失性存储器产品工程团队的主管。Marco 也是 ARI 成员, 他取得执照 12 年, 在业余无线电兴趣上包括 LF 操作, VHF, UHF 和微波天线的仿真与测量。

6.5 卫星跟踪器接口电路

Mark Spencer (WA8SME)

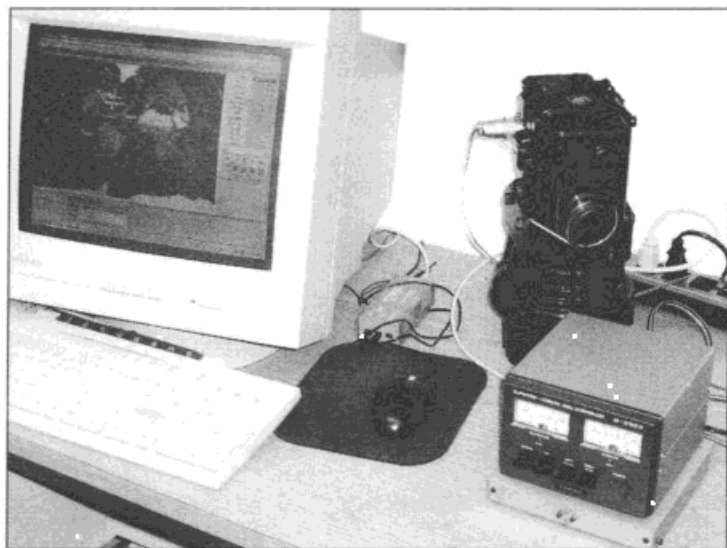


图 6.36 卫星跟踪器接口电路

您可以省下一叠可观的钞票，为 ARISS 和 OSCAR 卫星通联制作一个属于自己的天线旋转器计算机控制接口！

将太空（知识）引入教室，对于学生来说，是个不可思议而且充满强烈学习体验的事情！无线电技术知识与对太空的认知结合起来，是很有代表性的活动，并且所有学生能够实际参与和发生兴趣。这种代表性的活动可以从简单开始，在教室里用古老的电脑运行卫星预测软件，直到设立一个设备齐全的地面站，通过 ARISS 规程与国际空间站的宇航员进行对话通信^[7]。要计划和准备将太空知识引入教室，也并非容易的事情，它决定于所用等级的器材费用以及老师期望学生参与这个活动所投入的经费。

对于计划与 ARISS 联络的地面台站，其中一个必备条件就是要拥有一套天线系统，包括 OSCAR 类型圆极化定向天线，以及方位角 / 仰角旋转器控制系统。这是由于 ISS 的轨道特点所要求的，用人工手动方式来控制方位 / 仰角旋转系统是比较困难的，就算尽力而为，通联的成功概率也不高。因此，应用计算机控制的旋转系统是更加可取的（不仅仅用于 ISS 通信，对于与其他低轨道卫星通联也是一样的）。在业余无线电市场上，唯一一款方位 / 仰角旋转器系统是 Yaesu 的 G-5500，标价 600 美元，这是个昂贵的东西，而旋转器到计算机间的接口作为附件还要另加 500 美元！

在本文中，我将介绍一种简单的旋转器与计算机的接口，只需花费几分之一商品的价格。其实省下来的钱不仅仅可以用来添加台站所需的其他设备，更可以让制作者在这个过程中，

学到许多轨道运行原理和天线定位方法，并且对接口电路配套的软件也得到熟悉，学会如何将天线调整到最佳方向上。

这个项目专门设计与 Yaesu G-5500 旋转器系统及 PC 的接口，运行的是 NOVA 卫星跟踪软件。该项目并非唯一的选择，在 Web 上可以找到数种接口设计参考（本电路设计与软件是在 Gene Brigman(KC4SA) 和 Mark Hammond(N8MH) 所开发的类似系统基础上，通过改进而来)^[2]。不过在本项目中，没有 G-5500 控制板原来带有的天线位置指示器等不太实用的设计，而且编程的方式可以更加直观轻松，允许进行许多修改，更加符合个人的使用需要：之所以选用 NOVA 卫星跟踪软件包，是因为它具有许多强大的功能，不仅可以控制天线指向，而且图形界面也方便于老师教授轨道基本知识的功能（我就非常喜欢其中的地图图形，以及 3D 地球模型）。^[3]

6.5.1 NOVA 数据输出结构

在计算机屏幕显示卫星位置与天线指向的同时，NOVA 还通过 EASYCOM1 协议^[4]，从串口传送天线指向信息。旋转器参数与限位都可以在下拉的用户菜单上设定，这样就可以将旋转器配置调整到指定旋转器能力范围之内。本项目所制作的接口，其天线旋转器设置后应该如图 6.39 所示（设置好正确的 COM 口）。

6.5.2 G-5500 结构

采用 4 个触动按钮开关来控制 G-5500 的方位 / 仰角旋转器系统：向上、向下、顺时针和逆时针。在 G-5500 系统中，设有旋转电位器与方位角和仰角旋转器相连动，可以跟随天线的转动。这些旋转电位器在旋转器控制盒里面产生变化的电压，从 0° 时为 0V，到用户设定点最大值，比如在这个例子中，4.5V dc 表示方位角 450° 或仰角 180°。控制开关与天线位置电压，通过一个 8Pin 的外界控制插线连接到 G-5500 面板。要按照手册所给出的参数去设置您的旋转器，以保证最大方位角和仰角时，电压都是 4.5V dc。

6.5.3 接口功能

如图 6.37 给出的电路原理图，在接口中，有两种最基本的器件：称为 BASIC Stamp 的微处理器，和一个 12bit 的模拟到数字转换器（ADC）。接口通过 ADC 读取来自 G-5500 的位置电压值，并转换为 0 到 4096 之间的数字值。卫星位置信息是以度为单位，天线位置信息则是以数字字节表示，因此我们需要对它们进行转换，以便 BASIC Stamp 微处理器能够比较这两个值，并发出正确的命令转动旋转器。微处理器通过 ADC 读取从 G-5500 送来的天线位置信息，并使用自 NOVA 送来的天线位置要求信息，将角度转换为对应数位值，然后比较这些数值（这里假设与天线的数值做比较）。最后，微处理器判定出应该往哪个方向驱动旋

转器，向上或向下，向左或向右，即闭合对应的继电器，这些继电器是并接在 G-5500 面板里面的方向控制开关上的。这些继电器保持吸合，直到天线检测到达正确的位置（通过读取 ADC 数据）。NOVA 继续产生卫星下一位置数据，然后又监测下一个天线转动的命令。

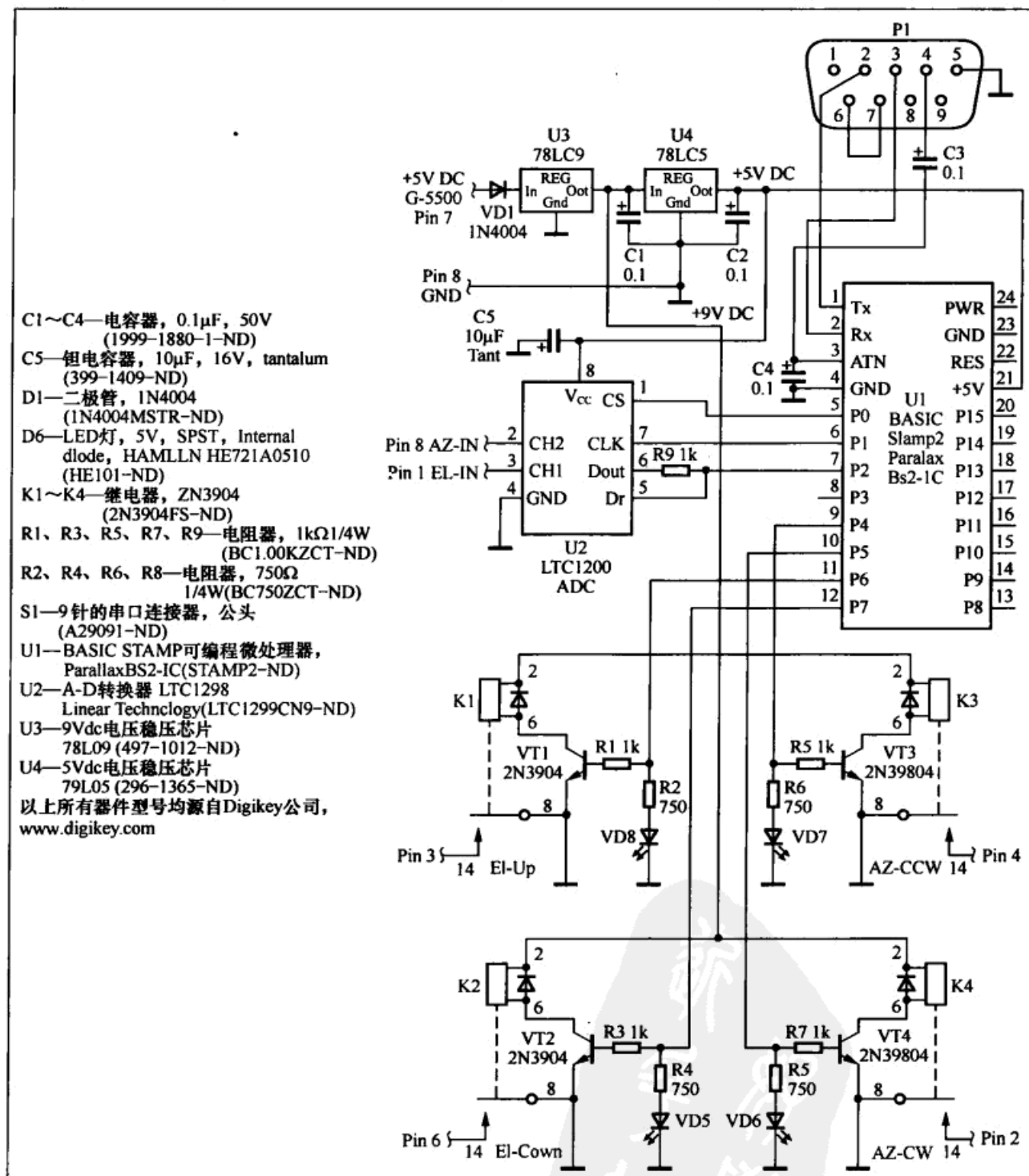


图 6.37 接口控制电路图与元器件列表。注意这里 BASIC Stamp 微处理器的应用。可以从作者那里得到控制程序，编程软件也在 WEB 上可免费获得

6.5.4 怎么让这个宝贝转起来

在我的教学生涯中，不知曾经多少次听到过这个问题。那么，您要更好理解由度数到标量数字数据的转换，就需要具备基本的运算技能，这就是玩这个宝贝所需要用到的！

在转换中，其中一个复杂因素就是，BASIC Stamp 只能做整型数据处理，这意味着即使对于简单的数学运算，计算中的分数部分会被截取掉，而运算所得的结果是个整数，这对于计算来说会带来不可接受的误差。我在后面将会介绍如何解决这个整型数据的局限。

为了将角度转换为数据，您要重新温习一下线性方程式的代数运算基础知识。ADC 的输出是线性的，并且遵从下面算法：

$$Y = mX + b$$

其中 m 是直线的斜率 $(Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1)$ ， b 是与 Y 轴的交点。

在这里，对应到卫星的角度位置以及数据字，那么 Y 就是转换后的数据字， X 就是角度为单位的位置。运行一个叫 ADC_Checkout.bs2 的小程序（可从作者得到），您可以确定好终点指向位置（ 0° 和 450° 或 180° ）的数据字，并确定其斜率，以及两个方程式在转换方位角度与仰角到数据字过程所需的 Y 交点值。

下面的计算例子中，采用了卫星跟踪器接口原型所采集的数据，您不需完全按照这些步骤去调整您自己的接口电路，这里只是提供给那些希望了解的人作为参考。

卫星跟踪器接口电路 ADC 数据

AZ 角度 AZ 数据字

X_1 0 Y_1 30

X_2 450 Y_2 3710

EL 角度 EL 数据字

X_1 0 Y_1 12

X_2 180 Y_2 3712

方位角：斜率 $m = \frac{3710 - 30}{450} = 8.18$ Y - 交点 $b = 30$

仰角：斜率 $m = \frac{3712 - 12}{180} = 20.56$ Y - 交点 $b = 12$

由于 BASIC Stamp 采用整数类型运算，假如我们将角度乘以这些斜率：8.18 或 20.56，分数部分将被截掉，从而产生误差。不过在 BASIC Stamp 微处理器中有一个数学运算可以解决这种情况，即 multiply middle 运算 ($*/$)，这个指令将对变量和（或）常量做乘法，并返回 32bit 运算结果中的 16bit，这就是一个值做乘法后得到一个整数和分数的结果，整数部分（0 ~ 255）就是乘积的高位字节，分数部分是乘积的低位字节（0 ~ 255，每 bit 表示 1/255）。因此这个 $*/$ 指令对于只有整数运算的 BASIC stamp 处理器来说，给了我们一个圆满

的解决办法。可以采用 16 进制符号来表示乘积，以便以知道高位字节（整数）和低位字节（分数）。您可以用微软 Windows 自带的计算器在科学模式下，将十进制数转换为十六进制的数据。

举个例子，为了将以角度表示的方位角值，转变为 ADC 等效数据字，我们需要对角度数据乘以线的斜率，再加上与 Y 的交点值：

$$Y = 8.18X + 30$$

8 = 十六进制的 08

$0.18 \times 256 = 46.08$ ，取整为 46 = 十六进制的 2e，那么该乘积以十六进制表示就是 \$082e。因此， $Y = \$082e \times X + 30$ 。写为反映该等式的代码行就是：`new_az=new_az×/$082e+30`。类似的，对于仰角的转换就是 \$148f（十进制的 20 在十六进制中是 14），写为代码行就是：`new_el=new_el×$148f+12`。

6.5.5 制作

这个卫星接口电路的布局 and 结构上并不要求严格，如图 6.38 所示，接口电路是用标准的万用板点对点连线搭建的。与串口的连线见电路原理图（图 6.37），计算机通过串口可以对 BASIC Stamp 进行编程，并访问 NOVA 的串口数据。我设置了 LED 灯方式来指示旋转的方向。这个接口电路的电源来自 G-5500，电压空载大约为 14V dc，但旋转器工作时，这个电压会明显降低，为了得到稳定的电压值，将来自 G-5500 的电压通过一个 9V dc 的稳压电路（用于继电器），再经过另一个 5V dc 稳压电路，给 BASIC Stamp 和 ADC 部分供电。

我建议这个接口电路的制作与测试分阶段来做，首先连接好线，并先测试电压稳压电路；接下来插入 BASIC Stamp 微处理器和连上串口。BASIC Stamp 可以用 Parallax 的 BASIC Stamp 编程器先写入程序，然后就可以通过编程器软件的功能来调测电路部分^[5]。

接下来，连上 ADC 与 G-5500 的位置电压接口。在您测试这部分电路之前，要确保您已经将旋转器的 180° 和 450° 位置设置为满刻度的 4.5V dc，如同在 G-5500 手册所说明的。然后运行 ADC_Checkout.bs2 程序来测试 ADC 部分。当您在整个行程转动旋转器时，注意观察 ADC 的值变化，对于 0°、180° 和 450° 时的值，应该接近与表中所列出的数据。如果是这样，那么您运行主程序的时候，就不需再做任何调整了。如果不是这样，但连线是正确的，那么您就要再做点数学计算工作并调整程序。最后，连接上继电器，进行最后与主程序（Sat_Tracker_Final.bs2）的配合测试，并下载到 BASIC Stamp 上运行。

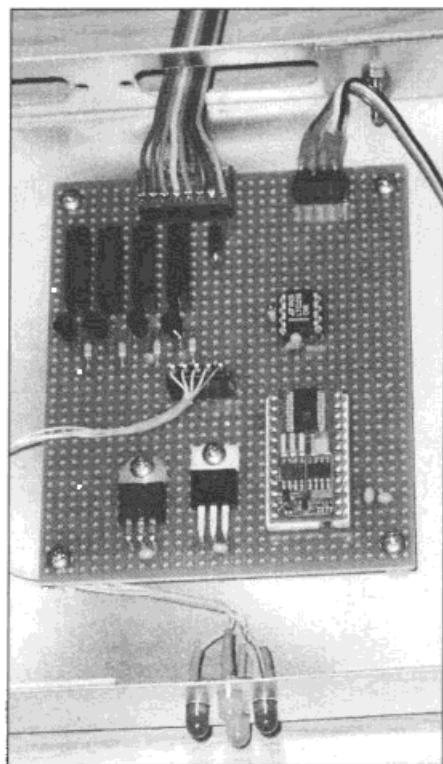


图 6.38 安装在盒子里的控制电路板。
控制电路由旋转器供电，LED 用于指示上、下、左、右的命令

6.5.6 软件部分

自己制作这个接口的真正好处，除了可以帮你显著节省费用外，更主要的是可以用软件控制这个接口。这个软件有不错的说明书，很容易按照指导操作。如果 ADC 的满刻度值与上面表中所列的值偏差很大，您可能就要调整转换算法中的常数值。同样，假如旋转器在运行过程中由于天线扭矩不合适而出现卡壳的现象，也要通过调整程序中的容差值来减轻。

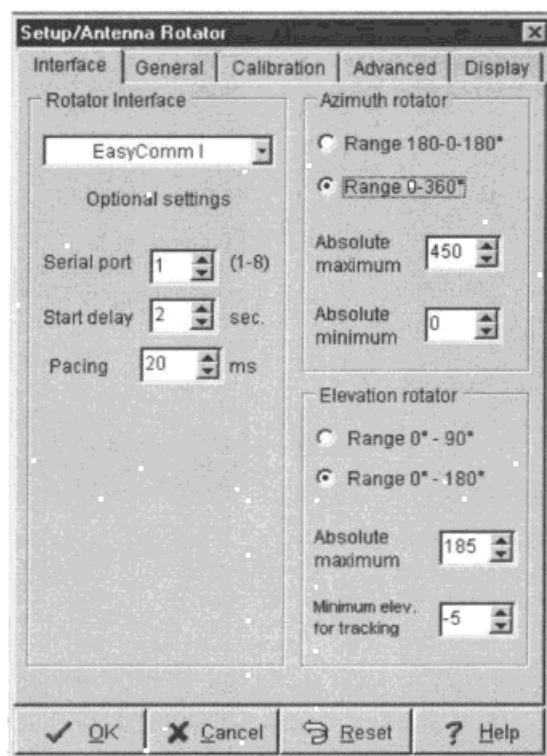


图 6.39 旋转器软件的设置界面

6.5.7 操作

将接口与 G-5500 以及计算机串口都连接好，运行 NOVA 软件，选择需要跟踪的卫星，设为自动跟踪模式，此时旋转器将转动到下一次卫星经过时的起始位置待命。当卫星进入跟踪范围，该跟踪器将立即响应，并不断更新旋转器位置，直到卫星整个经过完成，对 NOVA 的操作也就可以暂告一段了。这个卫星跟踪接口在使用上需要多加保养。图 6.39 给出了一个典型的配置界面。接口电路可以方便地安置在旋转器控制盒的附近，如图 6.40 所示。在图 6.41 中，年轻的 Sean Harlow (KB1LUZ) 正在操作气象卫星系统。

6.5.8 后记

为了使整个系统能够正常工作，您必须要对 G-5500 旋转器系统，NOVA 卫星跟踪软件以及 BASIC Stamp 的编程都比较了解。它们都与接口电路连结一起协同工作。因此这个制作项目不仅仅是连线和仿制一个电路，这只是简单的部分工作，更有趣的工作是，要学会如何使卫星天线跟踪系统的所有部分协同一起工作起来。



图 6.40 旋转器控制器叠放在接口控制器的上面

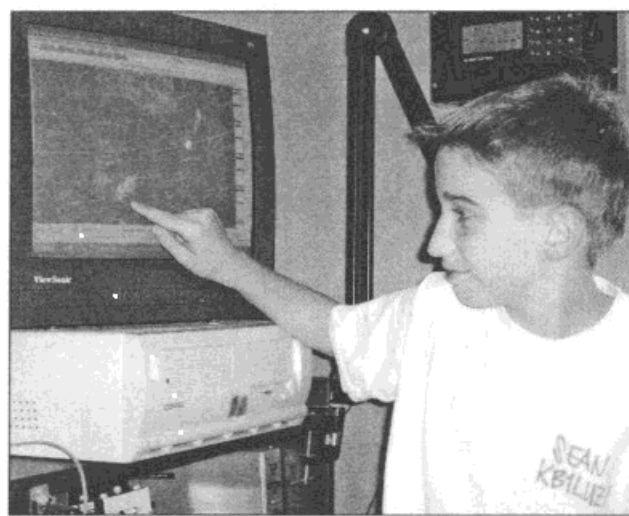


图 6.41 Sean Harlow (KB1LUZ) 发布消息说
德州正有几场雷暴

尽管这个项目主要针对 G-5500 和 NOVA 软件，但接口电路也容易为其他旋转器系统所用，仅仅只需要做点对接口软件修改的家庭作业而已。

附注：

^[1] 想知道更多关于国际空间站业余天线电项目的信息，请访问 www.arrl.org/ARISS/.

^[2] webpages.charter.net/mlhammond/ham/SAEBRTrack/.

^[3] www.nlsa.com/.

^[4] www.mustbeart.com/software/easycomm.txt.

^[5] www.arrl.org/notes/9857/ADC_Checkout.bsw and www.arrl.org/notes/9857/Sat_tracker_final.bs2.

Mark Spencer, WA8SME 在 1965 年获得执照，他同时拥有 G5EPV、DA1OY 和 HL9AW 的呼号。Mark 获得密西根大学的冶金工程学士学位，以及北科罗拉多大学的通信学硕士学位。他在长期驾驶 T-38、B-52、TR-1 和 U-2 飞机的职业飞行生涯之后，从美国空军退休，他曾是一位沙漠风暴战争中的

飞行老手。Mark 也曾在高中教授数学，计算机编程，自然科学与物理学，并曾经是初中和高中学校的管理人员，目前为 ARRL 教育与技术的协调人。您可以通过 mspencer@arrl.org 联系 Mark。

所有图片均为作者所拍。

6.6 一种偏馈碟型天线的螺旋馈源

图 6.42 中的照片，是这里将要介绍的，用手头剩余的 PrimeStar 偏馈碟面制作的天线，带有 7 圈螺旋馈源天线。当将馈源天线直接与前置放大器或下变频器系统连接，即使在卫星线性转发器下行链路的底噪往往成为噪声约束因素的情况下，该天线也可以非常好地接收 S 波段信号。这种优异的性能就如 W3PM 曾经用电子表格进行分析预测的那样，见图 6.43，以及经过实际的操作实践证明。实际使用的经验也表明，该天线能够接收到比太空噪声高出 5dB 的太阳噪声。不过千万别试图将该天线指向水平视线时去接收太阳噪声，因为此时在大城市中的地面噪声早就超过了 5dB。提供该天线的爱好者 N0NSV，他尝试加上第二个作为馈源的天线，这个努力得到了非常好结果的回报，他也给这个碟型天线起了个新的标号，印上“FABStar”。



图 6.42 偏馈碟型天线

这个碟型天线的反射面有点与众不同，是横向的椭圆形状，并且用一种特别的喇叭馈源照射这个单抛物面。当工作在 2401MHz 时，我们更喜欢采用比较传统的馈源。但如果将馈源放在中心区域，照射到碟面各边缘，则会照射不全，而采用将馈源放置在边缘再照射到中心，则容易照射溢出，到底采取哪种方式只能做一个选择决定。对于原来的应用，选择的是前者，运用 W1GHZ 的水球（water-bowl）测量法表明，这个碟面的焦点 $f=500.6\text{mm}$ ，所需馈源的 $f/D=0.79$ 。馈源的总照射角度，在垂直方向上为 69.8° ，喇叭馈源的 3dB 波束宽度为 40.3° 。该天线 50% 效率时，可以提供 21.9dBi 的增益。经过评估，采用一个 7 圈的螺旋天线作为馈源可以和该碟面刚好配合，获得这个性能，见图 6.44。

该螺旋天线的制作，基本上与 G3RUH 碟型抛物面天线的一样，螺旋的首 $\lambda/4$ 圈用于匹配部分，与反射器的距离，起始点为 2mm，在一圈中的某终点（译者注：指 $\lambda/4$ 长度处）间距为 8mm。这个设计的修改，还包括了杯状的反射器，它采用了一个 2mm 厚度的圆盘，裁剪成直径 $\phi 94\text{mm}$ (0.75λ)，并套上一个用薄铝片卷成的杯状圆筒，深度为 47mm。之所以采用杯状反射器，是为了增强对碟面馈射时的性能。

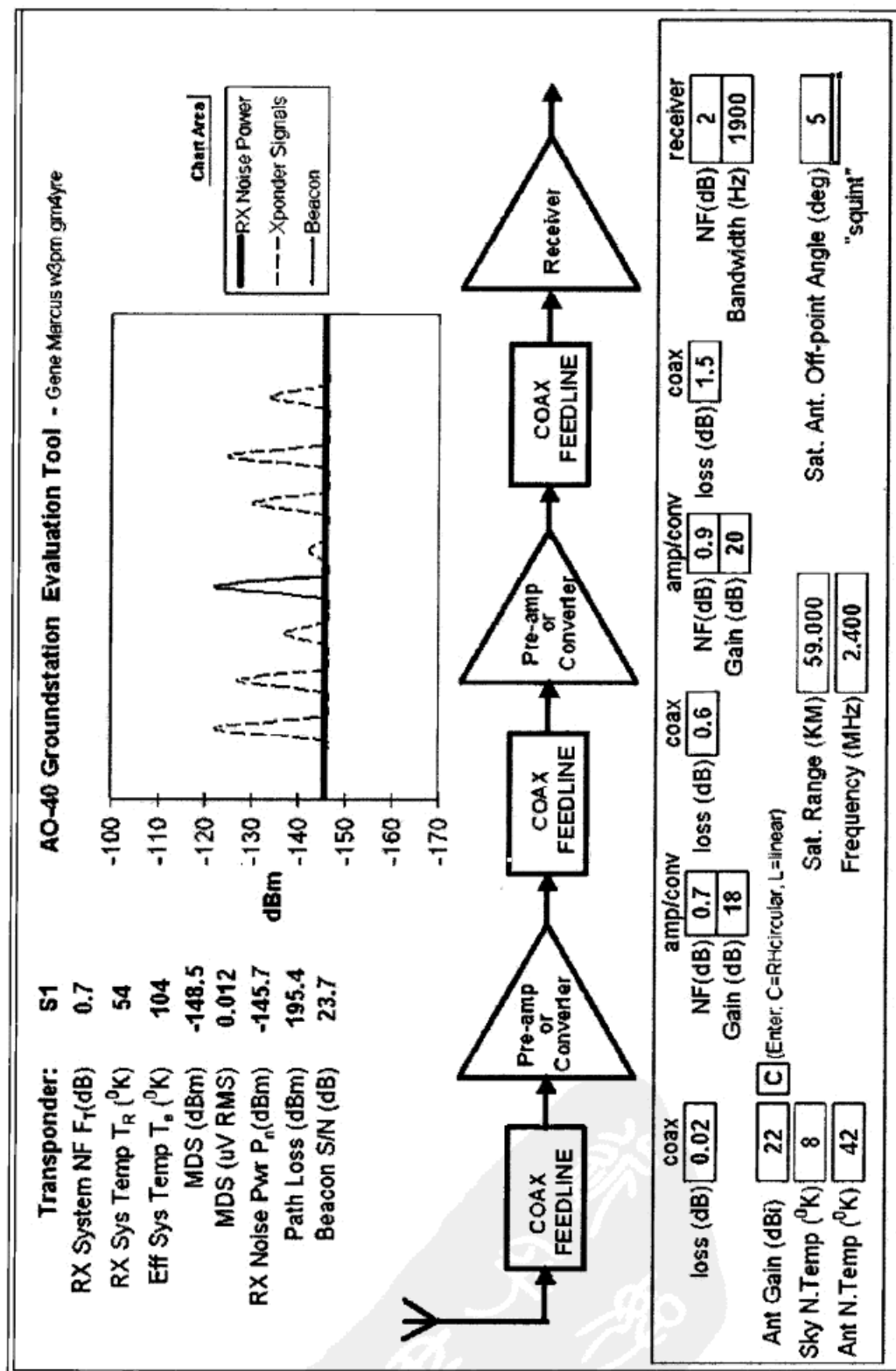


图 6.43 W3PM 用于评估地面站与 AO-40 卫星工作性能的电子表格界面

这个 7 圈的螺旋天线，关键的参数有：支撑杆，用 12.7mm 方管或 C 型槽管；振子单元，用直径 $\phi 1/8$ 英寸的铜线或铜管，放在直径 1.50 英寸的圆管或圆棒上密绕，最后形成 $\phi 40\text{mm}$ 的螺旋并拉开成螺旋角度 12.3° ，或者说间隔 28mm。这些尺寸可以算出螺旋单元的圆周长为 1.0λ 。

WD4FAB 在制作这个天线时，在他的 QTH 看到小鸟停在天线的情况后，觉得 James Miller 所用的对这个小圈数的螺旋单元的支撑还是不够。所以他选择了用 PTFE（“铁氟龙”——聚四氟乙烯）柱子，每 1/2 圈做一个支撑。这种相对密集的支撑柱子，也方便对螺旋单元直径与间隔的调整，使得天线整体很牢靠。要使用夹具对螺旋单元的支撑柱子和主梁进行钻孔，以保证孔的均匀统一。反射器的固定，则可以通过 3 个很小的铝角片，在主梁螺旋侧来处理。要将螺旋单元安装到碟面上，还需要改造一下碟型天线上接收器的安装主梁。

图 6.45 给出使用车床对它改造后的照片，NM2A 已经制作了其中一个这种天线，并且表明，没有必要使用车床也可以，他用角铝片制作了一个 Z 型的安装件，然后采用聚苯乙烯胶片，卷成间隔用的支撑柱。这里有个要点是，要使得碟面的焦点落在螺旋馈源天线的 1.5 圈位置，也就是在杯状反射器的杯口边缘位置。

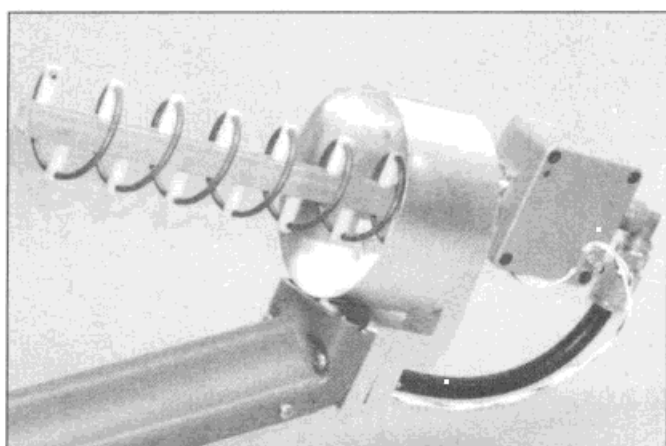


图 6.44 7 圈的 LHCP 螺旋天线
馈源与 DEM 前置放大器

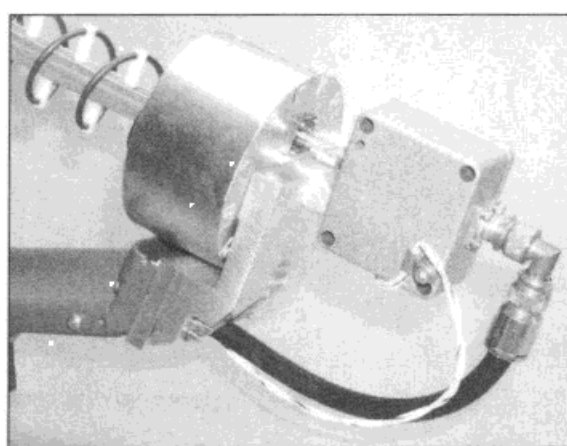


图 6.45 7 圈螺旋与前置放大器安装详照

W1GHZ 给出的焦点数据，从碟面的底边算起，为 500.6mm，从顶边算起，则为 744.4mm。用双线测量法可以确定出该焦点位置，这与 Wade 在他的著作给出的一样。安装这个馈源天线时，制作者必须注意的是，要从碟面的波束中心来瞄准馈源，而不是从几何中心，这与原来的微波喇叭天线的安装是一样的。按照上面提示的照射角信息，螺旋馈电天线应该从碟面几何中心向下倾斜 5.5° 照射。

从图 6.45 的照片中可以看到，DEM 公司的前置放大器是直接安装在馈电螺旋上的，这里采用 TNC 连接器耦合，之所以不采用 N 连接器，是因为它对于 S 波段螺旋显得太大了。在前置放大器侧或天线侧两者之一，应该采用一个带固定法兰盘的公连接器，以便放大器能

与天线直接连接耦合，而不再需要中间适配器。该照片也给出了如何将杯状反射器的周壁，铆接到反射底盘。外露的连接器应该做防雨水的处理，通常可以采用一些 Vinyl Mastic Pads (3M 2200) 或 Hand Moldable 塑料（用于同轴线密封的）来处理。由于在这种空间，使用粘合胶显得有些狭小，所以可以用一个 2L 的塑料软饮料瓶来作为防雨盖子，如图 6.46 所示。合适裁剪出瓶子顶部，以适合滑进螺旋杯状反射器，并用一个大号管夹夹紧。对于塑料瓶子的防晒保护也要考虑，裹上一层铝箔胶布即可。

要将这个碟型天线安装到您的仰角转动横梁上，可以有多种办法。制作者应该仔细考虑好碟面的安装位置，以减少风荷，并保持旋转器系统平衡。在所示的安装中，应该将碟面安装到靠近仰角转动横梁到中心位置，使其处于支撑座架之间，失衡的问题就并不会成为主要问题了。由于这些支撑座上已经有合适尺寸的铝板，可以在对碟面进行固定时，“覆盖”住部分铝板，以避免增加整个系统的风荷面积。带有托盘的安装支架，要夹紧到标准 2 寸管（实测为直径 2.38 英寸）支柱上，这个支架能够与碟面间相互旋动，但可以夹紧到 T 型管的一臂，见图 6.47。管子可以用车床进行车制，以适合 T 型管的上端，它的上端割为两半，以便夹住用作仰角转动横梁的 $1\frac{1}{2}$ 英寸管子，最后用螺栓穿过上面的孔锁紧夹住。

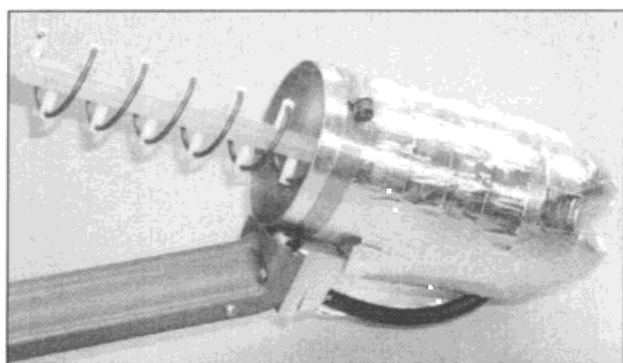


图 6.46 用一个 2L 大小的软饮料瓶，裹上铝箔胶带后作为前置放大器的防雨盖

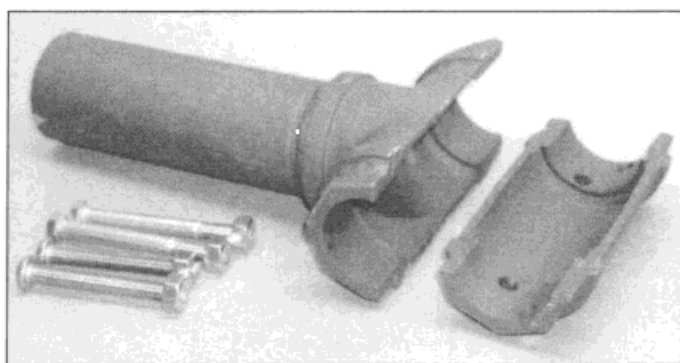


图 6.47 用于 FABStar 碟型天线的焊接式连接安装支架

6.7 一种不昂贵的小型天线方位角 - 仰角 (Az-El) 指向器

Lilburn Smith (W5KQJ)

只需花三分之一的钱，就能自制一个方位 / 仰角 (Az-El) 天线指向器，并且很方便控制天线指向。

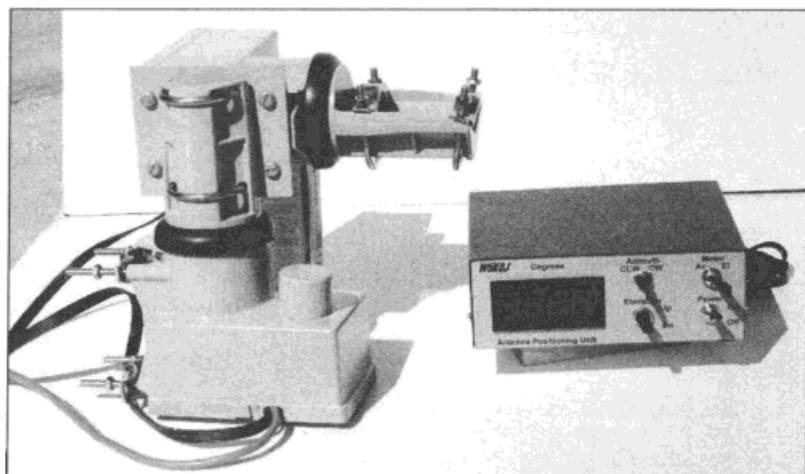


图 6.48 小型天线方位角—仰角 (Az-EI) 指向器

6.7.1 为何需要一个 Az-EI 指向器

对 UHF 和微波波段的兴趣，许多爱好者正处于热情高涨的时期，这可能归功于 AO-40 以及其他卫星的吸引，还有市场上这个频段能工作到 1296MHz 的商用器材增加的原因。另外，已有几个商家开始为业余无线电爱好者提供高至 10GHz 频率的变频器。在跳蚤市场也有些 10GHz 和 24GHz 的器件出现。更多技术派对业余爱好者正在实验更高频段。

在 430MHz 以上频段的一个好处就是定向天线可以小型化。尽管微波通联也未必一定要十分精确地安装高增益天线，但其中动手实践的乐趣却非常多。当您玩到 10GHz 以上频率，没有一个天线指示器的话，几乎不可能可靠地通联。

AO-40 卫星有两个发射机工作在 S 波段 (2.4GHz) 和 K 波段 (24GHz)，同时也是用了两个接收器：U (435MHz) 和 L (1260MHz) 波段。尽管 AO-40 卫星的轨道运动，在方位角和仰角变化上并不很快，但精确瞄准它是我们所追求的。如果我们加上一个小型的 Az-EI 天线旋转器来转动一个 UHF 或 L 波段发射天线，以及一个 S 波段或 K 波段接收天线，那在做卫星通联时是多么惬意的事情啊。而且，对于 LEO 卫星来说，Az-EI 指向器也是必不可少的。

6.7.2 为何要动手制作一个属于自己的旋转器

一个只有方位角转动，价格合适的天线旋转器并不难找。Cornell-Dubilier Electronics (CDE) 公司以及后来一些公司制作了数以千计的 AR 和 Ham 系列旋转器，结实而且可靠，在实际应用中，长时间外壳都不会进水。各种部件也是可以买到的，只不过比较昂贵。每次在火腿集会上都会看到少量的旋转器和控制盒。这种二手的旋转器和控制盒卖价大约在 100 美元，加上一套新的轴承和新的位置指向器，整个价格就在 150 美元左右了。对于仰角的旋转则是一个较难的事情了。尽管曾经有许多不错的旋转器，可以将天线转动杆穿过旋转器进行安放，但实际上

如今已经芳踪难觅，即便是要找个二手货也难。全新的 Az-EI 旋转器也不是说买不到，但价格昂贵，例如 Yaesu 的 5500，用起来是十分方便和耐用，但您需要掏出 700 美元！

以前的旋转器厂家慢慢地一个个停止生产了，将原来价格便宜的旋转器卖光后就出新款的产品。我在这里要和大家一起探讨的方案，不是采用新的产品，而是利用那些过去的旧旋转器来设计。RadioShack Archerotor 和 Channer Master Colorotor，两者事实上是同样的产品，这两个产品都不带有位置指示器。同时，这种旋转器也不能够将转动杆穿过中间作为仰角转动轴，尽管有多种方法可以解决旋转轴的问题，但无论如何都需要用到位置指示器。出售的这种旋转器，采用一个带有电动刻度转盘的控制盒，能与旋转器同步转动。转盘和旋转器以相同时间间隔转动，有时将天线或转盘旋转到机械停止点后，两者也能保持同步：先是顺时针转动，然后再逆时针转动，但误差积累到一定程度后需要重新调整一下同步。虽然作为电视天线旋转器时，这是可以容忍的，但用在我们业余无线电上，这样的位置指示方式就难以满足了，在需要快速指向对准某颗卫星或远方电台时，这样的指示系统就容易把我们搞晕。

在 RadioShack Archerotor 和 Channer Master Colorotor 最新的产品目录上，只有带遥控的旋转器了，与电视频道相对应的方位角数据被存储到微处理芯片上，然后通过红外线发送遥控数据到控制盒，显然这样的方式并不适合于卫星跟踪。

本文将讲述如何将天线安装到 Az-EI 组合旋转器，增加一个位置信息反馈电位器，以及一个简单的数字显示控制盒。尽管性能上不是十分完善，但如果所有部件即使用新的，制作的费用也只是 250 美元，如果能在跳蚤市场买到旧货，那整个成本可以低到 100 美元。这里所用的旋转器在火腿集会或跳蚤市场上很容易找到，因为它们没有位置电位器很难用于业余无线电。我买了两个新的这种旋转器，每个 20 美元。这里介绍的 Az-EI 位置指向系统可以胜任任何小型的卫星天线阵列，而价格也合理。

6.7.3 给旋转器加上位置反馈的改装办法

只有加上了位置反馈电位器后，这个旋转器对业余无线电来说才有用，缺了它就几乎或者说毫无用处了。Doug Braun (NA1DB) 设计出一种简单但绝对一流的方案，给旋转器加上一个具有 10 圈旋程的位置反馈传动装置，十分容易加上电位器，而只需要花费 16 美元。需要加上的两样东西只是齿轮和一个 10 圈旋程电位器，其中齿轮大约 7 美元，电位器大约 9 美元^[1]。

依照图 6.49 用 1/8 英寸厚度的铝板废料，裁剪一个安装电位器用的安装板。要注意两个定位孔十分精确。可以用商品齿轮件的前板来作为 1/8 英寸铝板，是个不错的选择，在火腿集会上毫不费力地得到，加工时用钢锯或竖锯裁好尺寸，并开好安装孔。将铝板的边缘挫得平滑方正，符合您的要求，然后用砂纸打磨去掉毛刺和旧痕迹。参见本文末尾处的金属处理小贴士。

通过控制盒将旋转器顺时针 (CW) 驱动到终点处，将原来旋转器上的所有外配转动杆安装件，包括那个 1/4-20 的转动杆固定螺栓卸下，都留起来今后他用。轻轻地拆开防水圈，旋转器是由三颗黑色的沉头六角螺栓固定在一起的，其中一个螺栓垫有纤维绝缘垫，不要移

去这个绝缘垫，仅仅将它轻轻弯起，以便能接触到第三颗螺栓。这些螺栓都被锁得非常紧，需要用 3/8 英寸套头的工具来开启它们。然后将传动机构部分都拆卸下来。

将 10 圈电位器顺时针 (CW) 旋转到头，并安装固定到安装板上，将齿轮装到电位器的杆上。接着将安装板，如图 6.50 所示放置到已有的固定孔，用一个 $1\frac{1}{2}$ 英寸 1/4-20 车制螺栓，加上螺母作为垫片，一起锁紧。稍微调节齿轮，使其能和原来的驱动齿轮配合。一旦齿轮之间能正确配合转动，就将安装螺母锁紧，直至花垫圈完全被压紧在板上，无法任何滑动为止，再回过头来看看齿轮是否还能转动自如。

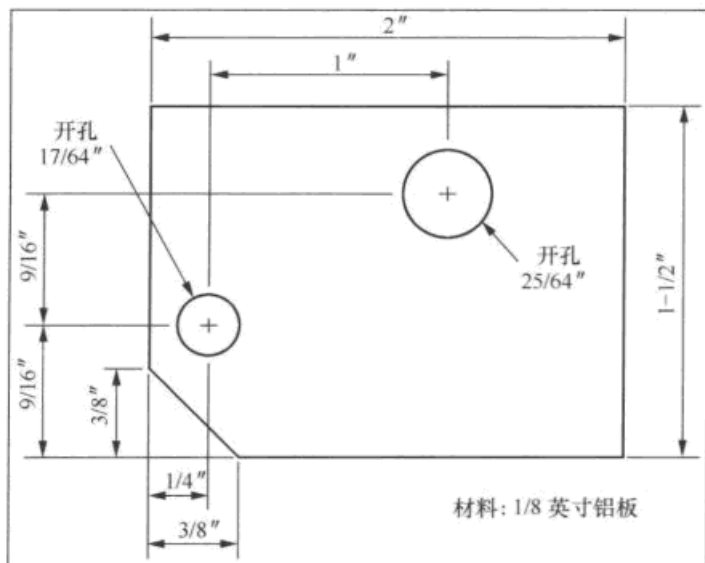


图 6.49 电位器安装板。电位器的安装孔位置对于齿轮传动来说要求很严格，必须精确地打孔，在打孔之前要在板上作好标记

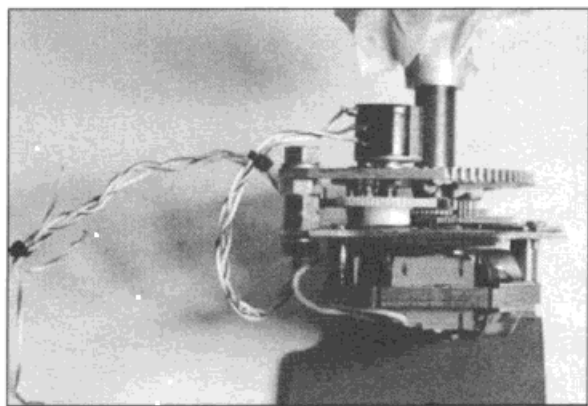


图 6.50 电位器的安装细节图。要确保齿轮间隔合适，电位器杆能自如转动，并且在旋转器转轴到达终止点位置之前，电位器杆应该还没有旋到头

给电位器焊接上连线，并将导线绞起来，沿着接线方向向下放置，避免转动部件被缠绕，用线扣将这些导线扎起来固定好。

现在把旋转器与控制盒连接起来，试着逆时针转动旋转器，观察电位器的传动齿轮是否灵活自如，最后将旋转器转动到终止点。当旋转器被转动到支架外时，有必要对旋转器的主轴做一些支撑。当到达电位器停止位置时，电位器的传动齿轮应该刚好套住电位器轴，而顺时针转动到驱动机构终止点时，电位器应该指示为零，所以在驱动机构从一端终止点，到达另一端终止点时，要确保这个 10 圈的电位器不会自己先碰到尽头。在把电位器的位置调整正确后，在电位器轴上滴一滴超能胶，但注意一定不要滴到电位器的衬套上，以免卡住转轴。

按照图 6.51 的办法，在旋转器的安装外壳铸件上开一个孔并清干净。要注意到铸件的壁是有点倾斜的。将整个铸件平放在平面上，对开孔位置与铸件边缘进行测量。这可以将角尺的直角靠在安装外壳的顶部平面上，以角尺的边缘为起始进行测量计算。不然的话，平面的倾斜将会使开孔的位置有少许的偏离，这可以借助多个三角形来纠正定位。假如开孔位置只是稍稍有一点点偏离，那么就要开大一些，使得它足以毫无阻碍地穿过电位器。这可以在标

记好空位之后，先用小号的钻头来钻孔，然后试着将齿轮装置安放到安装外壳，检查看看电位器的中心是否对准刚才所钻到小孔，如果偏离了，就要稍微移动一下。在对准之后，将小孔再钻宽或冲压到直径 $1\frac{1}{8}$ 英寸。假如您没有办法用钻或冲压的方式一次性扩大孔径，那就尽量用你有的最大号钻头先扩孔，然后再用圆锉刀将孔径扩到要求的 $1\frac{1}{8}$ 英寸。继续多检查几遍，以确保安装之后，电位器的中心刚好落在孔位上。另外还要注意清洁一下那些接线用焊接片。

将齿轮传动机构安装到外壳铸件上，检查电位器连线以及转动部件是否整洁，以确保不会妨碍到传动。重新将黑色螺栓装上并拧进去。要确保转轴不会与外壳铸件粘碰，如粘碰的话，在拧紧黑色螺栓之前要稍微调整一下位置。

用干净的环氧胶，给电位器粘上一个 1 英寸的 PVC 管盖子。检查旋转器的工作情况以及电位器接触电阻，当旋转器在两个终止点转动时，它应该在 $0 \sim 485\Omega$ 之间变化。如果电位器的电阻值在旋转器停止之前就停止了，那一定是什么地方出了问题，一定要在投入使用前纠正过来。

当一切都检查正常后，给整个旋转器上一层漆，加上 PVC 管盖子。如果 PVC 和环氧胶不涂上漆的话，在暴晒下很容易老化。再说，给旋转器喷漆后看起来也更专业些。

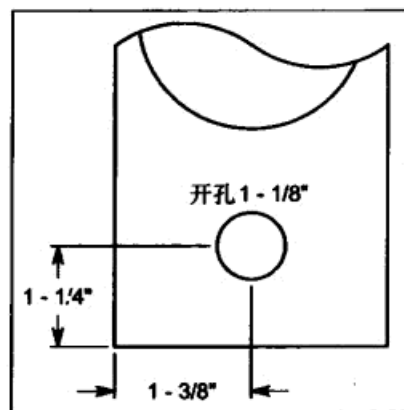


图 6.51 在旋转器的外壳开一个孔，以便透过电位器，这个孔的大小比较不易测量。可以先标记好位置后，先钻一个小孔，检查一下放置是否合适，然后再扩大为 $1\frac{1}{8}$ 英寸大小的孔径，再检查并清理干净。

最后用环氧胶把一个 1 英寸的 PVC 管盖子盖到电位器上，做喷涂处理

6.7.4 制作控制盒

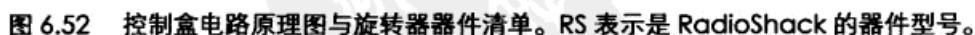
这个控制盒主要完成两个任务：

- (1) 给旋转器电机在正确转向上供电。
- (2) 将电位器的电阻值转换为角度显示。

尽管有少数旋转器采用的是直流电机，但目前几乎所有的产品都已经是采用分相的交流电机。一个可正反向转动的分相电机，通常有两个相同的绕组，一个绕组加上 30V ac，另一组则是加上一个 90° 移相的 30V ac 电压，结果就产生了启动和转动力矩的旋转场。如果要反转，只需要调换一下绕组所加上的电压即可。 90° 的移相可以在绕组线圈串接上一个较大容量的电容器即可获得。用一个 DPDT 中位关闭的开关即可控制电机的转动方向。

电位器触点上的电压值代表了旋转器的位置，假如加在这个电位器上的电压，在表示旋转器完全转动一圈时为 3.60V，那么用一个电压表正好可以直接对应用度数来读出角度，由于接地线从旋转器到控制盒之间的连接，会存在一定的电阻，所以在零度的地方将会有很小的误差。这个误差在简化版本电路中，也只是最多一度的误差。不过如果不能容忍这个零位置的误差，也可以有几种解决办法，将在后面介绍。

整个控制盒的电路原理图见图 6.52。



第6章 业余卫星制作项目 179

整个控制电路采用了一个 RadioShack 公司的外壳, 大约是 3 英寸高、8 英寸宽、6 英寸深, 这种外壳是由薄钢制成的, 比较难加工, 但外观非常好看。前面板用双层的 1/16 英寸厚的铝板, 使在拨动开关时, 盒子更结实牢固。不过也不一定要加上这个双层铝板, 只是它有个优点就是可以先开好孔, 避免直接在昂贵的钢外壳打错孔。

变压器, 线扣和电机电容器, 都是从原来的控制盒拆下的, 开关以及其他的部件可以购买新的。这种开关有较大的拨杆, 使得切换操作比较容易, 不过这个拨杆是塑料的, 可能寿命上没有金属拨杆的长久。

当所有的孔都钻好, 并清除干净后, 按照图 6.54 那样作上标记, 标签纸可以从办公用品店买到, 是一种聚酯薄膜标签材料。用喷墨或激光打印机将标记打印上去, 一定要使标记的位置正好准确落在孔位, 并且不要弄皱和有气泡。用锋利的小刀刻去孔位部分的薄膜。先安装上前面板和后面板部件, 因为变压器装上去就不大好弄了。在变压器上的接线排焊片将会承载其他大部分的电气元件, 参见图 6.55。电压稳压电路也是通过一个小的金属角片, 固定在变压器上的。

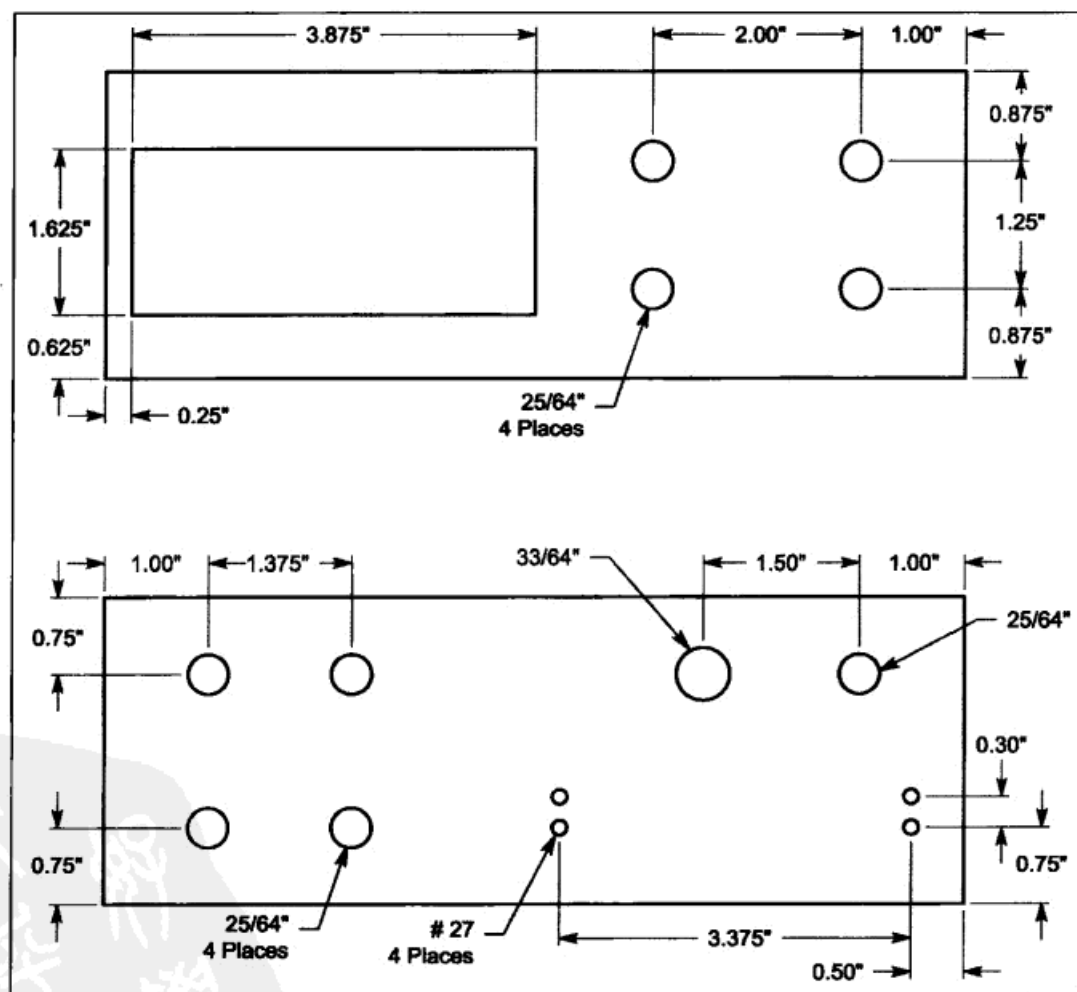


图 6.53 控制盒前后面板的钻孔模板

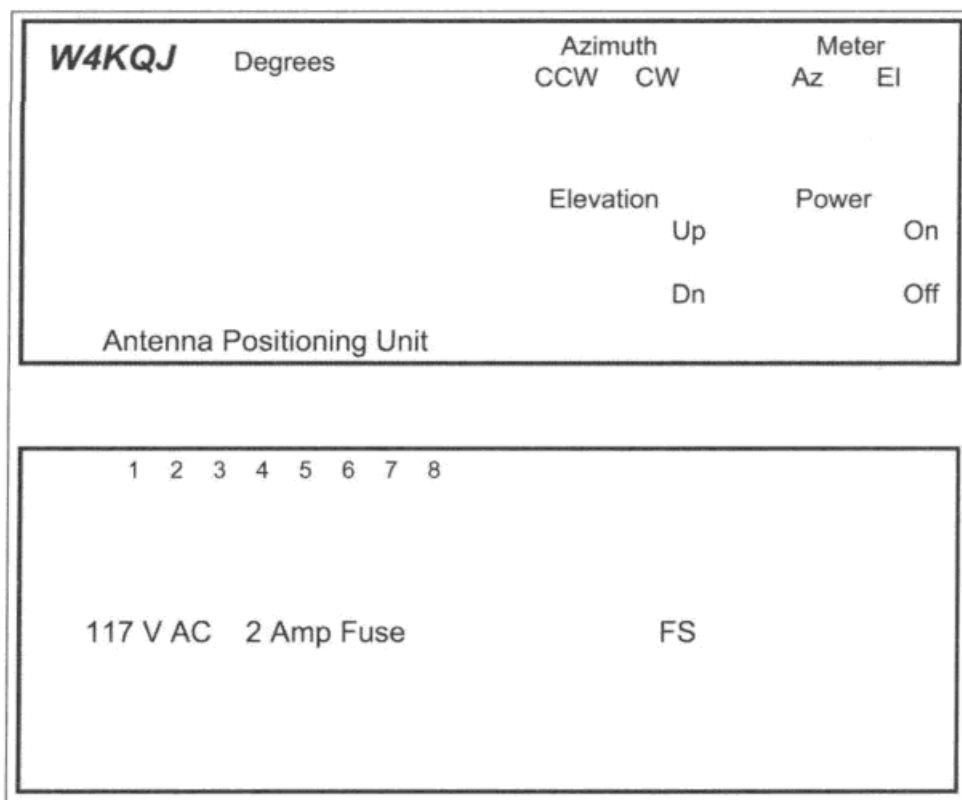


图 6.54 控制盒上的印制图案。可以先打印在干净的纸片上然后再转印到盒子

在一切都装上之后，用 #22 AWG 或更粗的导线，来连接控制盒子。可以将这些引线编成电缆的样子，使得看起来尽量整洁，然后打结将这扎线固定好。这里的原型制作采用的是剩余下来的军用多色高温导线。

6.7.5 旋转器的安装与连线

如图 6.56 所示，采用一片 1/8 英寸厚铝板制作的小适配板，就可以直接将仰角旋转器安装到方位角旋转器上面。制作这种适配板并打磨好，喷上漆。

将仰角旋转器上面的天线撑杆固定螺栓以及一对紧固件，都拆下来。将适配板用 1/4-20 规格的 1/2 英寸长螺栓固定到旋转器上。在螺栓头要垫上梅花垫圈，用力拧紧压住这些垫圈。

将方位角旋转器的 U 型螺栓锯短 1/2 英寸，把撑杆托架先推到一旁，把仰角旋转器用刚才锯短的 U 型螺栓，锁到方位角旋转器的转动轴上。先把四个螺母都套上，然后再用力锁紧

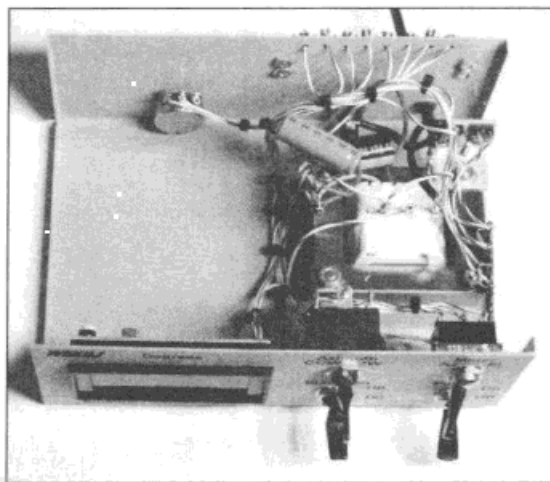


图 6.55 控制盒里面部件的安装。这些部件都直接安装在变压器上的接线排上，并与变压器安装螺钉固定一起。两颗螺钉直接固定变压器的对角，另外两个对角的螺钉则是固定好接线固定带

底下的螺母，并牢牢压住套在上面的梅花垫圈，最后锁紧上面的螺母。在适配板与旋转器转轴之间可能会有很小的缝，这是因为转轴有点轻微渐变的缘故。注意不要把这些螺母拧得过紧，以免适配板变形。

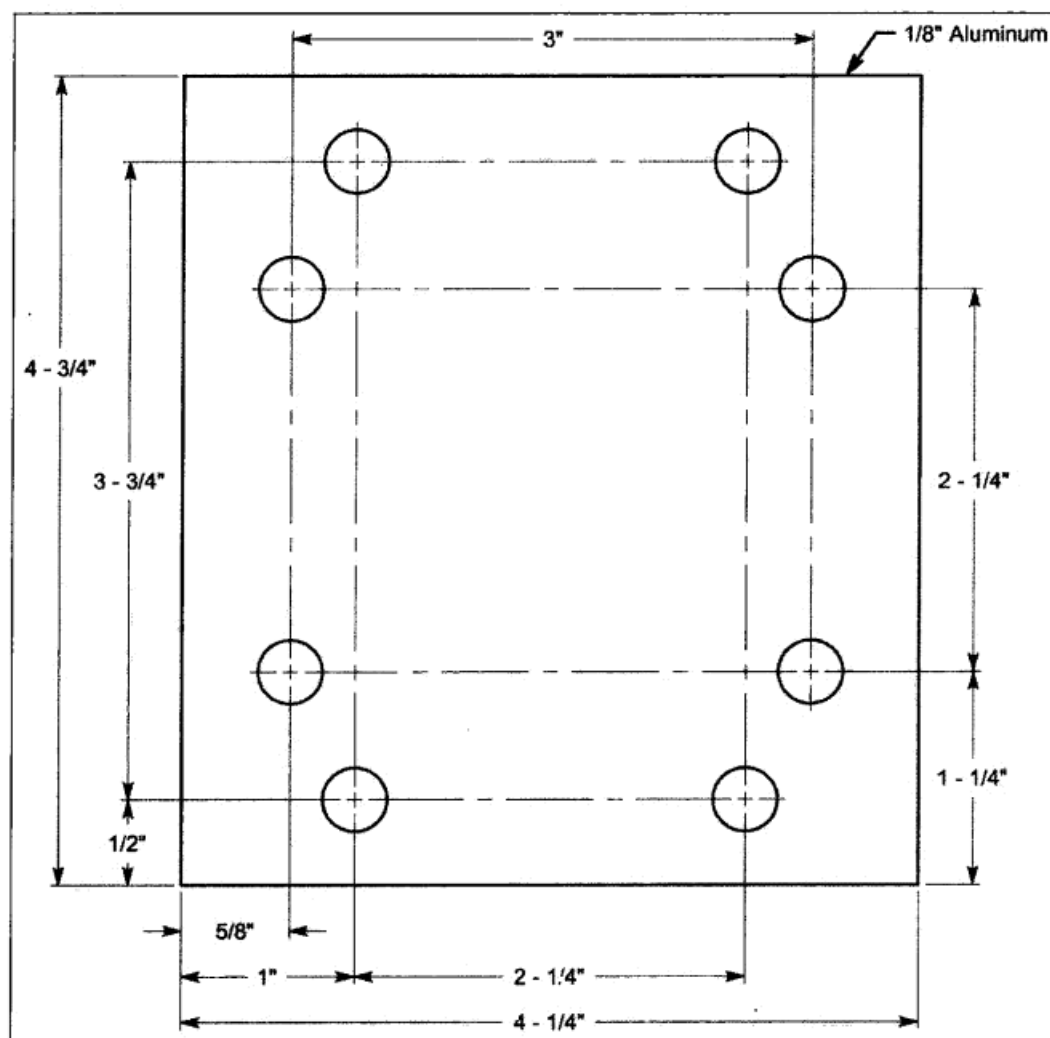


图 6.56 将方位角旋转器和仰角旋转器连接起来的适配板尺寸

用一根 5 芯线的 30 英寸长度线缆，从仰角旋转器引下来到方位角旋转器，线缆的两头 1/4 英寸处用线扣扎住。其中一根导线是银色的，其余的都是铜色的，在银色导线以及后面顺序排列的两根导线上，接上红色的皱纹接线圈，最后的两根导线，则接上红色的接线头。将银色的导线连接到仰角旋转器的接线柱 3 号，紧接着的两根导线按顺序对应接到接线柱 2 号和 1 号。将外侧的导线尽量与银色导线分开，往电位器顶部的接线那边靠，同样将剩下的将要引到电位器触点接线端的导线也分开一些。从电位器底部的接线端用导线连接到旋转器的接线柱 3 号。从仰角旋转器通过护套垫圈引出 5 芯电缆，并引入方位角旋转器中，连接到 8 螺丝位的接线排。把 5 根芯线都接上红色皱纹接线圈，将它们按照图 6.57 所示连接到接线排的对应该接线螺丝位上。将从方位角旋转器引来的各导线，再连接到剩余的螺丝位。需要记

住的是，由于上面的旋转器将会转动 360° ，所以需要给电缆留出一定的扭转长度。

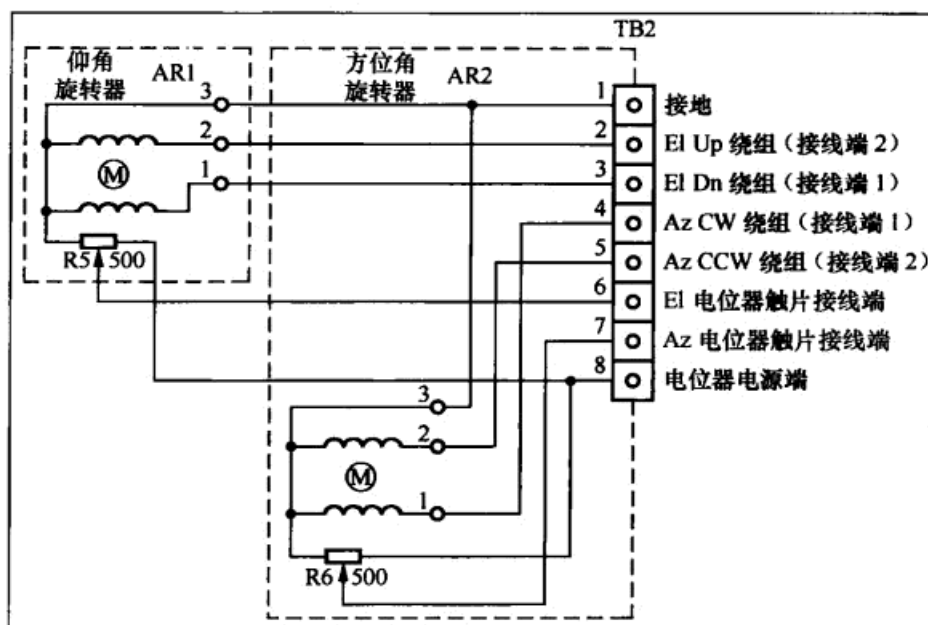


图 6.57 旋转器接线排。仰角旋转器是用 5 线的电缆，连接到方位角旋转器的接线排。
两个复合后的连接线再用 8 线的线缆引到控制盒去。参见图 6.52 的部件清单

将整个旋转器用标准的 8 芯线旋转器电缆连接到控制盒，这种旋转器电缆有两根导线比其他的要粗。在 CDE 公司的旋转器上，这两根导线是用于接地以及制动。在本制作项目中，一个是用来接地，另一根是用来传电位器的电压。将这两根较粗的导线其中一根接到接线排队 Pin 1，不用区分颜色，另一根接到 Pin 8。其他剩下的导线都按照色标顺序分别接到 Pin 2 至 Pin 7。顺着槽口放置好线缆，重新盖上槽盖。原来的线扎再用于这条线缆可能太短，所以干脆不用了，用 RTV 密封剂将线缆进出口密封好就可以了。

把这根从 Az-EI 旋转器引出的 8 芯线缆，连接到控制盒。注意在控制盒连接导线时也要按照同样的色标顺序。

在将天线安装到铁塔或天线撑杆之前，要对整个系统做个全面的测试。

将方位角旋转器顺时针转动到终止点，此时就不能再继续加电了，而是调整 FS 电位器 (R3)，使显示为 360° 。然后再反过来逆时针转到终止点，检查是否为零度点。如果零度度数太高，请参见下面“麻烦的零点误差”叙述。现在，将方位角旋转器转到 180° ，注意到此时旋转器安装壳上标的箭头，将与转轴对齐。这些箭头标记，在整个旋转器放置到铁塔或天线撑杆后，用指南针将方位轴设置为指向南方。同样的办法，对仰角轴也进行校准。

6.7.6 天线的安装与配置

如果所用的天线阵列体积比较小、重量轻，仰角天线杆可以直接装到仰角转动轴上，如

图 6.58 所示。这个天线全部都安装在一侧，假如风荷产生对旋转器的反推力，由于没有制动，位置电位器还是能够连续正确地跟踪指示，但角度会重新变化。

如果要使用尺寸较大的天线，这天线在安装上可以如图 6.59 所示，固定在两侧。制作一根图 6.60 所示的天线转动杆，用两个 1 英寸的镀锌 T 型接头，带有 3 英寸长度螺纹套。把天线支杆套入其中一个 T 型接头，并用 1/4 英寸车制螺栓固定。注意不要使用 1 英寸大小的螺纹镀锌钢管作为天线支杆，因为重量太重。显然，仰角天线支杆在两端旋转角度时将会碰到结构，但是由于仰角在覆盖范围上不会太大，已经足够。要尽量使整个安装部件轻便，而且平衡。要将整个系统都刷上保护漆，镀锌管的螺纹部分很容易生锈的。

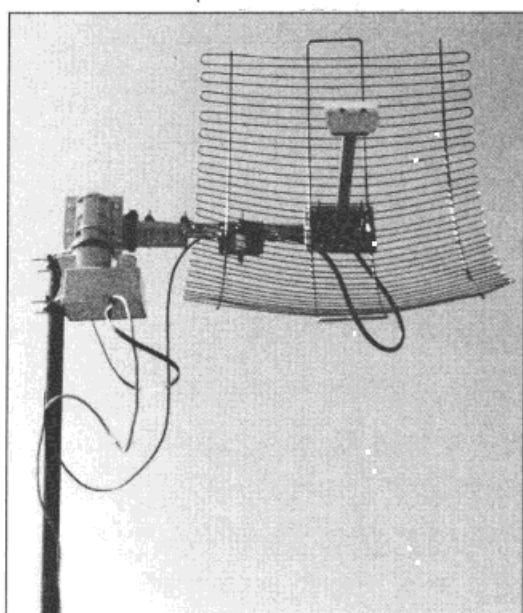


图 6.58 只安装在一侧的单天线照片。
这个旋转器非常适用于用来接收
AO-40 卫星的 S 波段天线

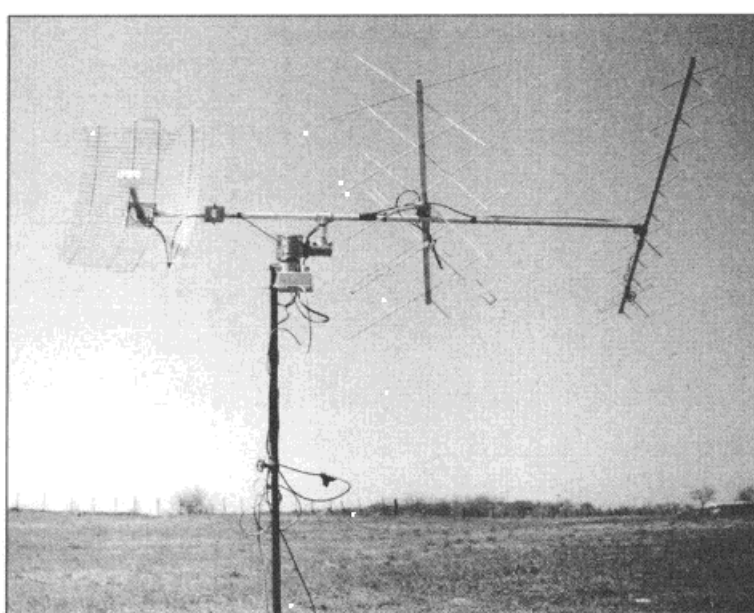


图 6.59 平衡安装的天线支杆。较重的天线阵列应该平衡安装在旋转器两侧，以均衡负载。由于仰角天线支杆不能直接穿过旋转器，所以采用了一对 T 型接管来处理

将所有天线都安装上后，将方位旋转器调整到向南方，此时指示器读数应该为 180° 。检查 0° 和 360° 位置的设置，如果有必要的话，可以通过调节 FS 电位器校准它们。最后设置仰角使指示器度数在 0° 和 90° 两个准确位置上。

6.7.7 麻烦的零误差

前面说到在零位置有一个小误差，这是由于从旋转器到控制盒接地线电阻，实际上是与电位器端相串联引起的。这个误差最多只有 1° 左右，因为这段串入导线的电阻比较小。然而，如果觉得这个误差不能容忍，也有两个可能的解决办法可以参考。最容易的办法就是在表头

与地之间也串入一个非常小的电阻，如图 6.52 的虚线所示，电阻值大约在 0.25Ω 。可以用多个 1Ω 电阻器并联，直到在零位置时读数为 0 为止。或者用一段 #30AWG 电阻线在 $1/2W$ 大小电阻上并绕成一个小阻值电阻器。这个串入的电阻一定要比较小而且能保持对电压表的稳定补偿，该电阻起到正反馈的作用，如果阻值过大，有可能会引起表头振荡而永远都无法回零。

另一个更好的方案，是在位置电位器一边用一个电桥电路，把调零电位器放到另一端，不过这个方案成本稍高。该电桥在零位置时平衡。为了实现这个调零电路，IC 芯片的 PIN30 脚过孔要钻开，以便将引线穿过去连接到该脚，在印制板上钻这个孔时要特别小心。调零电路的原理图如图 6.61 所示。不过我建议不用去理会这个小误差^[3]。

6.7.8 可能的改进

现在每个人都希望用计算机来控制设备，不过对于 AO-40 而言，采用计算机来控制也并非必须。这颗卫星的运动轨迹非常缓慢，有时直接用手握着跟踪就足够了。但是对于极地轨道卫星而言，采用计算机控制会非常方便。要给这种系统加入计算机控制，可以采用任何他人介绍过的流行接口电路来实现。不过要增加任何哪怕是最简单的接口都会增加项目的成本。有个最简单最省钱的接口电路，就是 Manfred Krohmer (XQ2FOD) 设计的 Fordtrack 电路，AMSAT-CE 有出售，它的 PCB 板在 FAR Circuits 也有销售^[3]。

这个 Fodtrack 驱动电路，有几种最新的跟踪程序可以选用，包括 AMSAT-NA 销售的软件^[4]。

Fodtrack 电路板有 4 个开路集电极输出端，代表旋转器每个转动方向，只需要增加 4 个小型的 SPST 继电器就可以驱动旋转器了。继电器的触点与对应开关触点引脚相并联即可。两个位置电位器的输出，将作为 Fodtrack 的输入，而不需更多的电路了。

如果增加这个电路，只需将这个印制板电路安装在盒子底部电压表后面的地方即可。

这个接口电路的可人之处，就是表头显示可以一直连续指示，计算机对角度的显示也可以和表头的角度显示做比较，确保天线确实指向您所需要的方向。

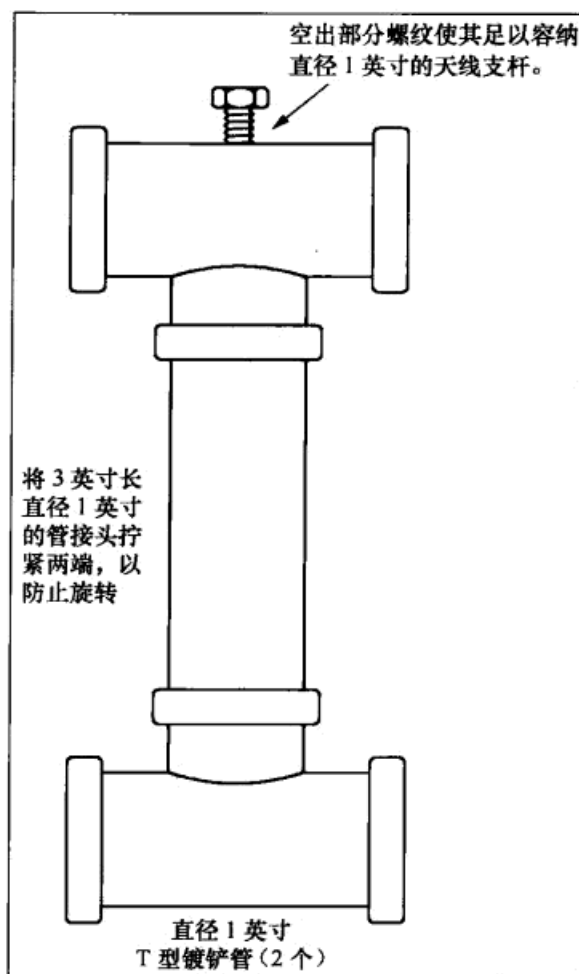


图 6.60 T 型连接管的细节。用两个 T 型接头和一段 3 英寸长度套接管，使天线支杆平衡从而均衡负荷。上面的 T 型接头用一个车制螺栓来锁定天线支杆

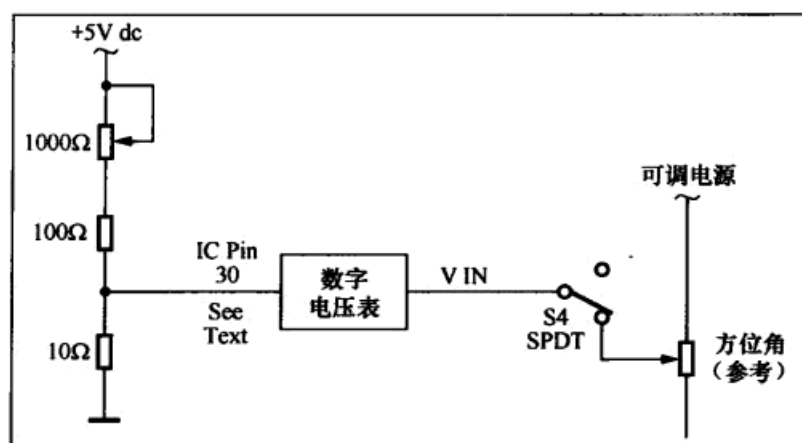


图 6.61 控制盒零点误差调整电路。如果无法容忍这个小的零误差存在，可以按此法改动电路，参见文中所述

附注：

^[1] 这项目使用的齿轮来自于 Small Parts 公司，13980 NW 58th Ct, MiamiLakes, FL 33014-0650; www.smallparts.com. Part no. GD-4860. 包括运费和加工费每个 6.85 美元。

^[2] C+C 电压表来自于 Small Parts 公司，Circuit Specialists, 220 S Country Club Dr #2, Mesa, AZ 85210; www.web-tronics.com. Part no. PM 1029B. 包括运费和加工费每个 15.95 美元。

^[3] Fodtrack 印制电路板由 FAR Circuits 提供，18N640Field Ct, Dundee, IL 60118-9268; www.farcircuits.net. 包括运费和加工费每个 4.50 美元。

^[4] AMSAT-NA 和 AMSAT-CE 在网上免费分享 Fodtrack Software. 分享包中包括接口板的搭建指导。更多信息参见 Jesse Morris 关于接口的讨论，W4MVB, in The AMSATJournal, 2002 年 3、4 月。

Lilburn R.Smith (W5KQJ) 在 1956 年第一次获得操作许可，他持有 Extra Class 的执照，在德州技术大学获得 BSEE 学位。他曾在微波，VHF 和激光领域上从事设计工作，并拥有一个美国专利。他曾任 Central States VHF Society 和北德州微波协会的主席，可以通过如下方式联系到他 E-mail: W5KQJ@arrl.net.

小贴士：金属板加工

铝金属板的加工比较容易，但一些小贴士可以让您的工作看起来更加专业。用角尺或利器在铝板上划出所需的外廓线。如果您没有金属专用剪刀，就尽量用锯子来切割金属板，因为手动剪刀容易使边缘弯曲。没有金属剪刀那最好是用装有切割刀片的圆盘锯子，实在没有，找个锯齿比较犀利的弓形锯子也行。

找两三块有 1 英尺长左右的 1/4 英寸 X 1 英寸铝板，就可以作为不错的夹具。将要加工的金属片，如制作三文治一样的方式，用老虎台把它夹在两块铝板夹具中，裁剪线要露出来。这些夹具使得金属片刚度增强，加工起来更加容易。锯完后先不需要松开老虎台，继续用细号锉刀修整边缘，然后放平在工作台上，用打磨机或砂纸将边缘打磨平滑。加工的过程要细心保证 90° 角，如果最后把边缘弄歪了，那就是要彻底重来。

当加工的金属片已经准确打磨到所需的轮廓线，用角尺和尖锐的划笔，标出打孔的位置，并轻轻地在孔中心位置冲一个位点，先钻一个小的引导孔。这种小的引导孔可以保证开孔时更加准确。如有可能，最好放在桌面采用小型钻床和夹具进行加工，如有必要，在被加工金属片和夹具之间用些零碎材料垫平。在加工铜片时，任何时候都一定要夹牢，即便只是钻个小孔的情况，否则一不小心这些铜片将变成伤害您的利器！

为了清理毛刺和最后完成工作，要用细号砂纸将铝片边缘打磨一遍，可以用常规的 120 号木砂纸。对于光洁表面的打磨则可以用 400 号水磨金属砂纸。如果您没有电动磨砂机，也可以用一块小的磨砂石，但千万不要试图用大一点的钻头来清除孔边毛刺。反复打磨所加工的金属片表面，直到没有任何毛刺，就大功告成了。

6.8 用纸板箱天线与 OSCAR 40 通信

Anthony Monteiro (AA2TX)

编者按：AMSAT-OSCAR40 卫星如今已经不再工作了，但这些天线的设计仍然对于其他卫星十分有用。

您是否有兴趣与 AMSAT-OSCAR40 卫星做通联，但又担心需要弄一套又贵又复杂的专用天线系统呢？比方抛物面碟型天线、轴向模螺旋天线，或是圆极化的八木天线阵等。其实都可以不要！

最近的 ARRL 大会上，在 AMSAT 展位会听到潜在的 OSCAR 40 新操作者一些抱怨，几乎都是反映说，要进行这种通信，就必须用庞大而先进的天线。OK，未来的卫星爱好者们，请不要失望，天无绝人之路，如果你刚好住在杂货铺附近，那你应该幸运了！这里要介绍的天线都是基本上用硬纸箱的纸皮和铝箔纸制作的，而且又便宜又容易做，也不需要什么调试，不需要测试设备，甚至连电烙铁您都可以扔一边去。尽管是用厚纸板制作的，但工作起来却丝毫不是纸老虎，OSCAR 40 的操作老手们使用起来可是与传统的天线没什么两样。

OSCAR 40 以前叫做 Phase 3D，装备有多个发射机、接收机和转发器，不仅如此，其

U/S 模式线性转发器工作得非常棒，支持最常规的工作模式。为了与它通信，您就需要一支 S 波段（2.4GHz）的下行链路天线，和一支 UHF（435MHz）上行链路天线。

6.8.1 下行链路天线

OSCAR 40 是高椭圆轨道的卫星，在远地点，最大距离超过 60000km。为了抄收到远端的信号，需要一个高增益，低噪声的天线。为了收集到足够的信号以克服下变频器前端噪声，18 ~ 20dB 的天线增益是不可或缺的。天线要求辐射图形干净集中，旁瓣少，前后比优秀。否则的话，它就很容易拾取到暖热地球的热噪声，诸如同样功能工作在 S 波段的无绳电话和无线网络等干扰信号。

抛物面碟型天线是用来接收 OSCAR 40 最常用的天线，可以提供所需的高增益以及干净的辐射图，但架设很需要技巧并且它对表面光洁度非常敏感。

幸运的是，还有一种同样可以提供所需增益和辐射图，但在结构精确度上要求不高的天线，这就是锥形喇叭天线。如图 6.62 所示。这种锥形喇叭看起来很像个扩音器，如果有您曾拿一个这种扩音器靠近耳朵，您就会感觉到传入的声音会顿时增强很多。这是因为喇叭的形状能收集到比耳朵多得多的声音能量。锥形喇叭天线的工作原理和它类似，它收集足够的微波信号能量，并汇聚到一个装在喇叭后端称为探针的小天线上。探针再将信号馈送到您的下变频器上。

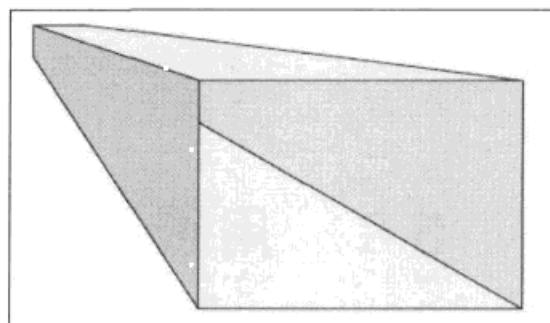


图 6.62 用于下行链路接收的锥形喇叭天线

这个 OSCAR 40 下行链路天线设计增益大约在 20dBi 左右，与普通的 2 英尺大小增益 19 ~ 21dBi 的碟型天线相当。即便在卫星的远地点，它也能提供足够的信号强度。完整的技术特性请参见表 6.10。在动手制作这些天线之前，您最好先熟知表格所列的特性与安装件细节，以便理解整个制作过程。

表 6.10 下行链路天线

性能规格	
工作频率	2.4GHz (S 波段)
回波损耗	>23dB@2.4GHz (SWR <1.2:1)
增益	20dBi
极化方式	垂直极化
仰角波束宽度	±9° (-3dB)
方位角波束宽度	±8° (-3dB)

材料清单

2 个运货用纸板箱, 16 英寸 $\times$ 22 英寸 $\times$ 22 英寸, 1/8 英寸厚。

一卷 18 英寸宽度的铝箔纸

一卷 2 英寸宽度透明胶带纸

5/8 $\times$ 24 螺母

1 $\frac{5}{8}$ 英寸长实心的 #14AWG 裸铜线

6.8.2 下行链路天线的制作

如前面所说的, 这个天线在物理结构上就是由纸板构成的。寻找这种便宜的运输用纸板箱最容易的地方就是街边的杂货店, 您跟他们要的话往往就免费送给您了。尺寸较大的标准纸板箱大约为 16 英寸 $\times$ 22 英寸 $\times$ 22 英寸, 厚度 1/8 英寸。这种大小正是我们所需要的, 不过尺寸上并不会太苛刻。制作这种天线需要两个这样的纸板箱, 一个裁剪作为喇叭天线构成板, 覆盖有铝箔纸, 另一个纸箱用来支撑这个喇叭结构。另外还需要一些在邮递时作为打包用的包装胶带纸, 在这个项目中用来固定任何需要粘结的东西。

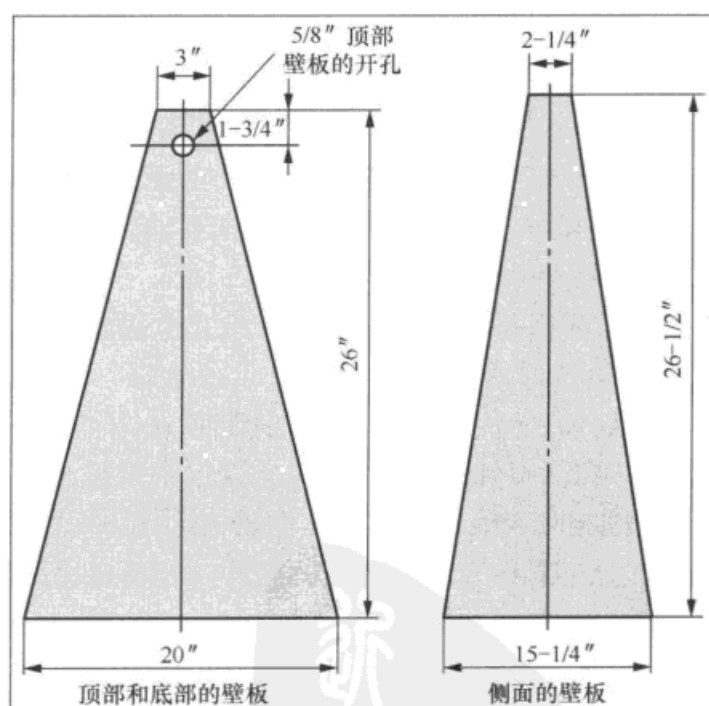


图 6.63 下行链路喇叭天线纸板的尺寸

为了尽量减少连接器和焊接点, 直接将下变频器用一个 5/8 $\times$ 24 的螺母固定到喇叭天线上, 螺母应该刚好与变频器上 N 型母连接器螺纹吻合, 该螺母将底盘, 同轴连接器 (N 或 UHF 型) 以及圆形连接器上其他部件, 通过单孔就固定住了。不过假如您的杂物箱里刚好没有这种尺寸的螺母, 您可以到销售同轴连接器的店铺里就可以买到个新的, 大约 50 美分。

所需的材料其实就只有一段实心的直 #14 AWG 裸铜线，用来制作同轴耦合探针，直接插入下变频器 N 型母连接器的中心脚。您裁剪这根探针长度是要尽量仔细，使长度准确为 1 ½ 英寸长。因为 #14 直径的铜线其实与 N 型公连接器的中心脚大小一样，所以插入下变频器连接器时应该刚好，不会破坏连接器。完整的材料清单请见表 6.9。

在每块喇叭构成板的其中一面都铺上铝箔纸，要把每块纸板的边缘也铺好，并沿着纸板边缘卷回一些，使铝箔纸能固定住。注意不要用胶布来粘住边缘的铝箔纸，因为每块板拼接在一起时边缘要能导电。

由于喇叭侧边的纸板宽度只有 15 ¼ 英寸，所以一片 18 英寸宽度的铝箔纸就能够完全覆盖这个纸板。上下的两款纸板比较宽，因此需要稍为改变方式，一片铝箔纸横着铺在前面 20 英寸宽度边缘，另一块就可以铺满所剩的纸板面积。在铝箔纸交接处留出 1 英寸相互重合，但不需要用胶带纸来粘。在上面那块纸板 5/8 英寸开孔处，细心地将铝箔纸切开并折进去，这里也不要再用胶带纸，以确保铝箔纸与连接器的良好接触。

将四面的纸板制作好之后，就需要用胶带纸将它们拼在一起了。最简单的办法就是将 4 块纸板平摆在一个平面上，铝箔纸朝下，将长边拼排一起，注意拼的时候，两个侧面纸板是要与顶板和底板间隔开来排列的。排列后看起来就像一个展开的平面喇叭，长边缘都是 27 英寸的长度，纸板的尺寸自然会配合好。3 个已经挨着排列的长边用胶带纸粘好，各边之间留有一个大约一个纸板厚度（±1/8 英寸）的空隙，可以用一小片纸板来间隔它们，然后再背面胶带粘住，注意不是在铝箔纸一面，这样就把这些纸板粘一起了。这点非常重要，因为长边之间折起来时，需要留有一个纸板的厚度，这样才能使得整个喇叭装好后，具有良好的导电接触。

当用胶布将各块纸板粘一起时，拎起来和折起来都要非常细心，保证铝箔纸是在喇叭的里面。构成锥状体后，将剩下的一长边也用胶带粘起来。在构成锥状体的时候，可能边缘会轻微挤压，使得铺在边缘的铝箔纸也交叠一起，相互电接触良好。第四个边缘粘好后，将喇叭拿起来，对着光线，检查看看边缘之间是否存在缝隙。也许会有很少的一些缝隙，不过这个设计可以容忍 1/4 到 1/2 英寸直线长度的缝隙存在，不会有影响。较大的缝隙可以小心地用胶带来粘牢。如果万一有比较大的缝隙，就用铝箔纸和胶带纸在里侧修补好。

剩余的纸板箱将用来支撑喇叭天线，既作为支撑结构也作为保护，如图 6.64 所示。喇叭的开口位于支撑纸板箱的中间，喇叭的顶板和底板在开口处都是相距 15 ½ 英寸，并且与纸板箱 16 英寸宽度开口相符合。

喇叭的深度从前至后，大约为 25 英寸深，放在纸板箱里面的话就太长了，因此可以在纸板箱的底部挖一个洞，使得喇叭的后部分能穿过支撑纸板箱的底部。所挖的洞一定要在纸板箱底部的正中央，洞的大小约为 5 英寸宽，3 ¾ 英寸高，不过实际制作中你还要调整洞的大小以适合喇叭尾部刚好穿过。

调整喇叭的前面部分，使得与纸板箱开口面平齐，用胶带纸将上下边缘与开口面板粘牢，各边接缝的地方可能都会有些缝隙，最后把喇叭的尾部与纸板箱背面的洞也用胶带纸粘牢。

现在就可以安装下变频器了，从剩余下的纸板裁剪出 4 块 2 英寸 × 2 英寸大小的小纸板，

每块小纸板开一个 $5/8$ 英寸大小的孔，将它们叠起来作为安装下变频器的垫片，套到下变频器的 N 型连接器上。接下来，找一段 $1\frac{1}{8}$ 英寸的 #14 AWG 导线，轻轻地插入到 N 连接器中心孔里，使之不会随意再晃动，这时伸出来的部分，长度应该为 $1\frac{1}{4}$ 英寸，作为天线探针，注意千万别把这段导线弄弯曲了！

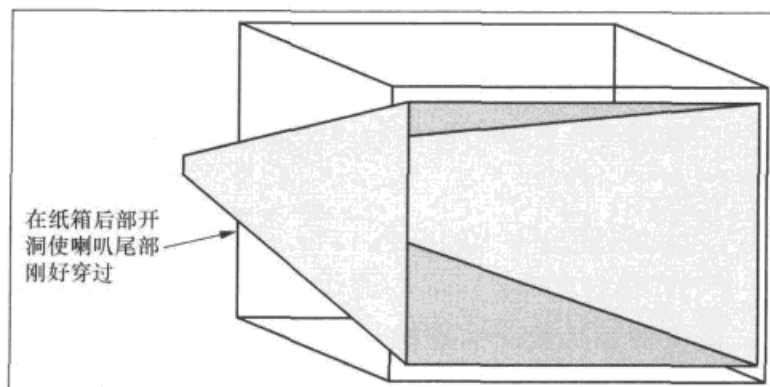


图 6.64 这个完成后的下行链路天线图，说明了怎么将喇叭放到支撑纸板箱

将 N 连接器塞入喇叭天线后部的顶面 $5/8$ 英寸的孔时，要特别小心不要把孔周边的铝箔纸弄皱了，然后用 $5/8 \times 24$ 的螺母将整个下变频器锁紧，压住套在上面的纸板垫片。N 型连接器的顶部应该刚刚好在螺母锁紧时露出少许，纸板垫片的弹性可以将下变频器固定在孔上。注意连接器不要伸进喇叭体里面太长。

下变频器在安装进孔内时，还是有相当可移动的空间，这时要调整使天线探针与喇叭的后壁平行的位置，再用胶带纸将整个下变频器粘牢。最后，用一片铝箔纸覆盖住喇叭的后部，用胶带纸把它粘平整。至此，要祝贺你了，整个下行链路天线就完工了！图 6.65 给出了整个锥形喇叭的正视图，图 6.66 为侧视图。

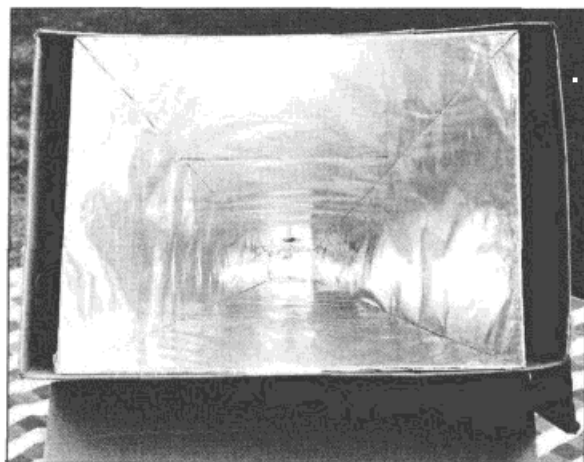


图 6.65 下行链路用锥形喇叭天线的正视图，可以看到如何安装到支撑纸板箱，注意到喇叭后部的同轴天线探针



图 6.66 下行链路用椎体喇叭天线的侧视图，给出了仰角控制的支撑办法，以及如何将下变频器固定到喇叭上。

下变频器还用胶带纸往前拉，使得导线探针能与喇叭的后壁平面平行

6.8.3 下行链路的操作

测试下行链路天线最简单的办法，就是加上下变频器的电源，将天线对准卫星并调谐到它的信标频率。为了对准天线方向，您需要清楚 AO-40 的位置信息，可以有多种卫星跟踪软件来完成这个工作，有些软件是免费的，可以在 AMSAT 的网站 www.amsat.org 找到，这里有关于卫星和轨道的许多信息，是个很好的信息资源网站。另一有用的网站是针对 AO-40 的，在 ao40.homestead.com/。

该天线在水平与垂直面的波束宽度大约都是 17° ，所以指向上不会太苛刻。可以用指南针来设置方位角，不过需要对指南针所在地区做磁偏角矫正，因为地球的磁北和真北是不一样的。

对于仰角的控制，可以像照片给出的那样，找一些剩余的纸板将纸板箱外部垫起来的办法，也可以用一些重物来调节。设置仰角的时候，可以借助量角器，在首次寻找卫星信标的时候，需要多尝试几次，但很快就会找到经验规律的。卫星的信标信号是很容易听到的，即便是在卫星位于远地点时信号也会很强。

寻找到信标后，您就可以稍微搜索周边频率，看看有没有 CW 和 SSB 信号。您可以通过监听卫星上的通联信号，就很容易获得如何操作 AO-40 通信的感觉了。

用这个新的天线，另外一个您可以尝试的是，对信标中的卫星遥控信号进行解码。简便的方法是可以使用 `ao40rcy` 软件（免费，可在 www.qsl.net/ae4jy/ao40rcv.htm/ 下载）。这个软件使用 PC 声卡来解码，可以将解码后的信息在 PC 显示屏显示出来。这个纸板箱下行链路天线应该有不俗的表现。

6.8.4 上行链路天线

对卫星信号的监听是相当愉快的事情，不过一旦您听了几次上瘾后就会想着自己也要通联了！要在 UHF 上行链路接入到 AO-40，需要 $100 \sim 500\text{W}$ 的有效辐射功率，这与所用的工作模式（CW 或 SSB）以及卫星的距离有关。需要知道的是，这个卫星在远地点的距离超过 60000km 。由于一般的 UHF 收发信机只有 $10 \sim 50\text{W}$ 的输出功率，所以对于上行链路天线需要有相当的天线增益要求。

多数的 OSCAR 40 操作者都用八木天线以得到增益，然而八木天线比纸板难做些。相反，我们将采用偶极子馈电的角反射天线，最基本的角反射天线参见图 6.67。

角反射天线制作简单而且对机械容差比较大，其增益大小几乎为尺寸的函数，需要更高增益时，只需把尺寸做得更大就是了！这就意味着您可以从一个小的尺寸而且简单的角反射天线开始，制作到您需要更高性能时加大尺寸。基于这种想法，这里将介绍两种：简单版本和尺寸较大的高性能版本。

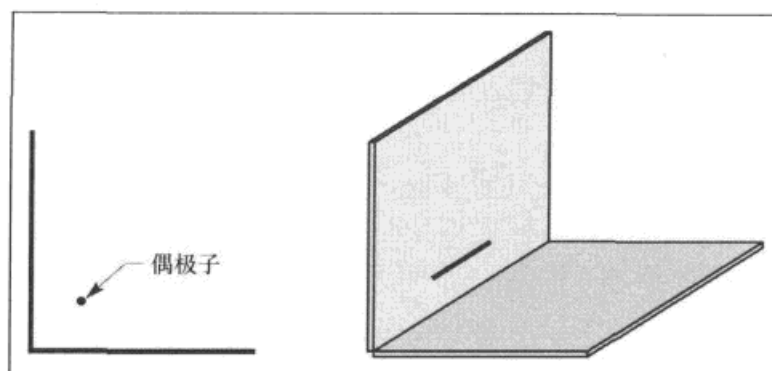


图 6.67 用于作为上行链路天线的角反射天线，采用偶极子馈电

简单版本只需要一个纸板箱制成，增益大约为 9dBi。当馈入 50W 功率时，可以提供不错的 SSB 上行信号到 30000km 外的 OSCAR 40 卫星，以及良好的 CW 信号到达最远点。所以这是一个很好的 OSCAR 40 入门通联，因为这个天线十分容易制作。

高性能版本则可以提供 14dBi 的增益，相当于 8 单元的优化八木天线性能，对于 CW 和 SSB 都能提供至远地点出色的信号。在结构形式上与简单版本相同，只是尺寸更大，所以制作时稍微多花些时间，需要两到三个纸板箱的材料。这种上行链路天线两种版本的完整技术性能参见表 6.11。

表 6.11

上行链路天线性能与材料

简单版本天线指标	高性能版本天线指标
工作频率：425 ~ 465MHz	工作频率：425 ~ 465MHz
SWR：<1.5:1	SWR：<1.5:1
反射器尺寸：22 英寸 x 22 英寸 x 16 英寸	反射器尺寸：27 英寸 x 27 英寸 x 38 英寸
增益：9dBi	增益：14dBi
极化方式：水平	极化方式：水平
垂直波束宽度：±13° (-1dB)，±23° (-3dB)	垂直波束宽度：±8° (-1dB)，±13° (-3dB)
水平波束宽度：±26° (1dB)，±43° (3dB)	水平波束宽度：±13° (1dB)，±24° (3dB)
材料清单	
(数量 1 ~ 3 个) 纸板箱，16 英寸 x 22 英寸 x 22 英寸大小，纸板厚度 1/8 英寸	
18 英寸宽的铝箔纸一卷	
2 英寸宽的透明胶带纸一卷	
12 英寸长度直径 3/4 英寸铝管一根	
(数量 2 个) #8 英寸 x 1/2 英寸的金属螺钉	
(数量 3 个) 1/2 英寸大小的黑色 PVC 连接管	
5 英尺长的 EG-58 或 RG-8X 带连接器的电缆，留出 1/2 英寸长度接线	

6.8.5 上行链路天线的制作

如同前面制作下行链路天线一样，您可以在杂货店里找到足够的纸板箱，大小 16 英寸 × 22 英寸 × 22 英寸，厚度 1/8 英寸，不过大小其实不用太严格。

两个版本的偶极子馈源都是一样的，用一段 3/4 英寸的铝管和草坪洒水系统用的黑色 PVC 连接管来制作。这种连接管作为偶极子的中心绝缘棒，还有两段接在偶极子两个末端，用于支撑到反射器上。偶极子在安装到反射器后，其阻抗将为 50Ω ，不需要额外的巴伦或匹配网络。

用一小段带有连接器的 RG-58 或 RG-8X 同轴电缆，连接偶极子和发射机。多数的发射机都是采用 N 型连接器，可以采用一段预先制作好的转换电缆，只需要剪一边来用就可以了。电缆的长度至少得 5 英尺。制作偶极子馈源的材料请见表 6.10。

制作偶极子馈源时，用专用剪刀或锯子截取两段铝管，各 $5\frac{1}{16}$ 英寸长。将这两段铝管插入一段 PVC 连接管中，中间留出 1/4 英寸的间隔，如图 6.68 所示。有可能需要用磨具或锉刀或砂纸对连接绝缘管做一些打磨工作，使铝管能够刚好顺利地插入。注意 1/4 英寸的间隔距离必须要准确，测量时要仔细。

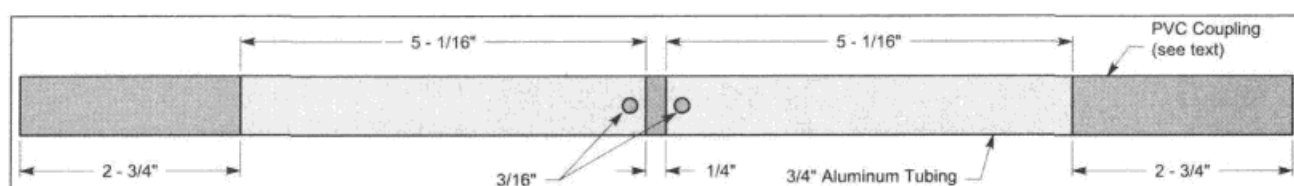


图 6.68 角反射器的偶极子馈源尺寸

将铝管插入连接管并相隔 1/4 英寸时，在两个相互靠近的一端 1/8 英寸的地方，各开一个直径 3/16 英寸的孔，放入 #8 金属螺钉，并拧进去，但最后要回退两圈。把电缆的中心导线缠在其中一个螺钉上，屏蔽线缠在另一螺钉上，然后再拧紧。要注意保证不会短路。铝管的其他两头都插入一段连接绝缘管，伸出大约 $2\frac{3}{4}$ 英寸长，并用胶带纸粘好。制作反射器时就可以用了。

6.8.6 简单的角反射器

简单版本的天线只用一个纸板箱来制作，箱子的底面和较窄的一面都应该大约为 16 英寸宽和 22 英寸长，用铝箔纸将这两个面都覆盖，并用胶带纸粘好。

为了安装偶极子，需要在箱子的每一侧开一个 5/8 英寸大小的孔，距离底面 7 英寸，距离铝箔纸覆盖的一面也是 7 英寸的位置，见图 6.69。在角反射器中心开一个孔，以穿过电缆。将偶极子馈源的连接绝缘管，穿过纸箱两侧的孔，并用胶带纸固定好，这就把馈源装上了。再将电缆连接器和电缆也穿过角反射器中心的孔，同样用胶带纸固定好，这就全部完工了！您制作好后的天线看起来应该和这里的图 6.70 一样。

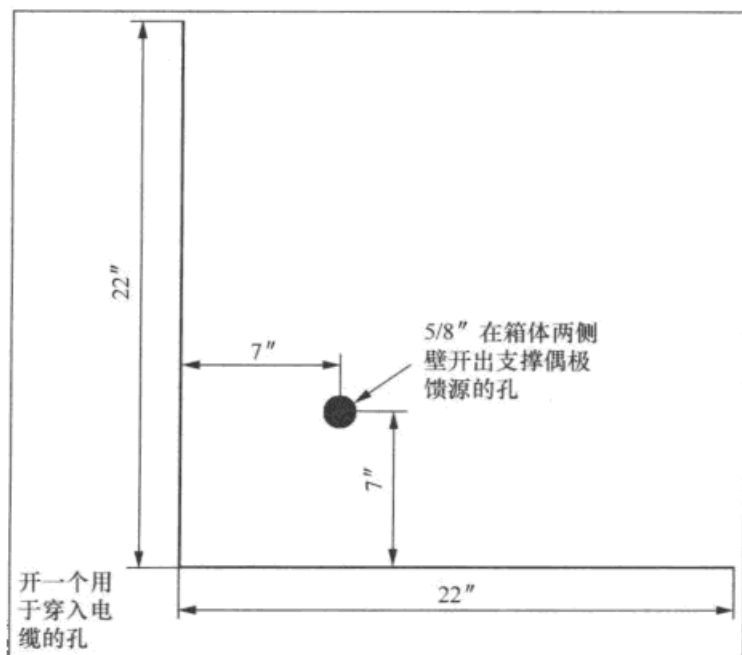


图 6.69 简单版本上行链路角反射器天线尺寸

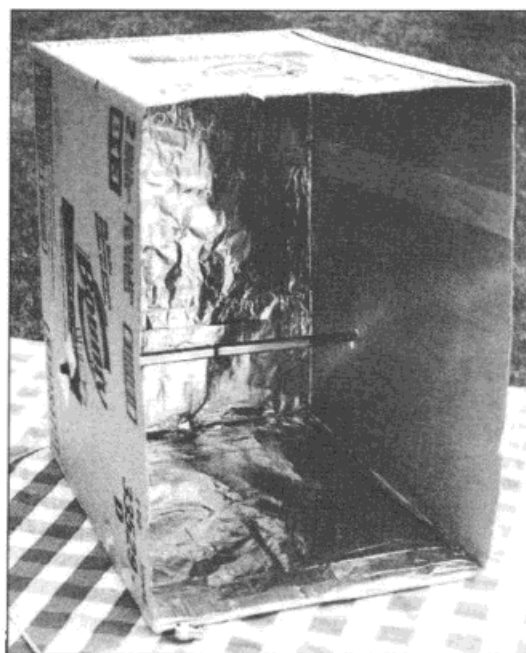


图 6.70 制作完成后的简单版本上行链路角反射天线

6.8.7 高性能角反射器

高性能版本其实只是简单版本的加大版，将反射板边长加长，从简单版的 22 英寸增长到 27 英寸。反射器的宽度也从 16 英寸扩大到 38 英寸。不过这些尺寸并不需要太严格，可以根据所能获得的实际纸板箱尺寸来确定。

为了保证反射器获得高性能，制作过程要十分仔细，小心地将 22 英寸 × 16 英寸的纸板箱展开，包括上下两面的活动板，这样可以得到一块沿着中间对折后大约 38 英寸宽乘以 76 英寸长的纸板，每边都裁掉 11 英寸，使得对折纸板每边都是 27 英寸。这将作为如图 6.71 所示的反射器表面，并将铺上铝箔纸用胶带粘好。

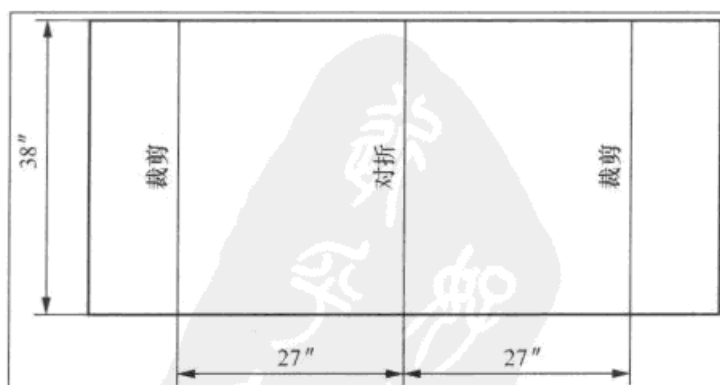


图 6.71 高性能角反射器表面的裁剪指导

将反射器反过来放，铝箔纸朝下，用剩余的纸板和胶带纸来加强反射器，加固它的形状，

但要注意依然保持在中间折叠。在反射器表面中心的位置开一个孔，用于安装同轴连接器。

另取一个 22 英寸 × 22 英寸 × 16 英寸的纸板箱，去掉 22 英寸 × 16 英寸较窄的其中一边，然后沿着长边将纸箱分为两半，只剩下两个相同 8 英寸宽的角。然后沿着中间折线弯曲反射器表面，铝箔纸向里，用胶带纸把它粘到角里并保持原来的形状。为此，您也许可能需要再用纸板和胶带纸再对它做些修整。

最后，要用纸板和胶带纸制作一个偶极子馈源的支撑架，使得能偶将偶极子固定到合适的位置，如同简单版本那样，距离反射器的每个反射面都为 7 英寸。比较省事的办法是再找一个纸箱切下其中一个角，在两侧面打孔，以放置偶极子上的 PVC 绝缘管，以及底面的电缆连接器。如果您之前已经先做了简单版本，只需要将铝箔纸剥下来，并切割出已经开好支撑偶极子带孔的那个角，将偶极子直接装上去，并用胶带纸粘牢，见图 6.72 将同轴电缆穿过反射器中央的孔，再次用胶带纸粘好。整个天线完工后，看起来就如图 6.72 和图 6.73 所示。

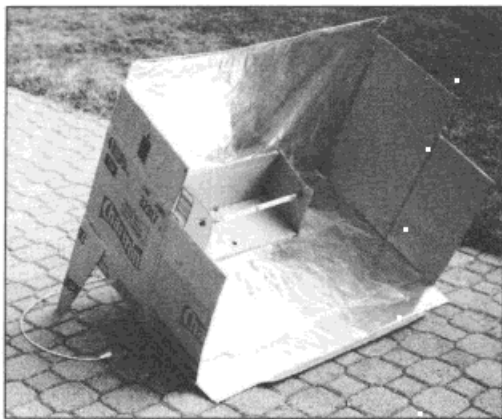


图 6.72 完工的高性能版本角反射天线。可以看到纸箱各个角是如何来支撑反射器，以及偶极子馈源到正确位置的。

后面的支撑脚可以将天线的仰角调节到 20° ，这个角度在我的地理位置上是刚好所需的

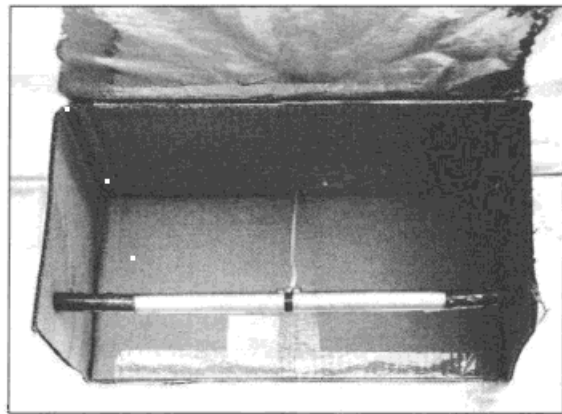


图 6.73 高性能版本角反射天线偶极馈源

6.8.8 上行链路操作

上行链路天线的水平波束宽度是相当宽的，因此方位角通常并不需要频繁调整。仰角位置的调整就更加简单了，由于一个反射面为水平放置，其他的反射面则是垂直的，所以天线辐射角的自然指向大约 45° 角。要降低这个辐射角时，就将天线的后部垫高即可。由于垂直波束宽度相当高，因此有可能将天线设置到某个角度不用再另外调整，这个角度将根据您的台站所在地理位置所定。例如，在我所居住的马萨诸塞州，将仰角调整到 20° 之后，就可以覆盖 AO-40 经过所有轨迹的信号，不需要再另外调节。要将仰角调到 20° ，则可以将天线的后部分垫高起来，直到反射器底面与地面成 25° 角即可，这可以通过在高性能版本天线的后部加两个合适高度的“支撑腿”，如图 6.7.2 所示。越靠近赤道的地理位置，所需的仰角角度就越高。

6.8.9 实际发射操作

在 OSCAR 上行链路进行发射之前,您首先要找到您自己的下行链路。在您尝试几次之后,应该发现没有说的那么难。您首先要找到信标,然后往上或往下调谐 100kHz 的范围,避开常用热闹频率,以免引起干扰。运用卫星跟踪软件获知下行链路的多普勒频移频率。上行链路频移大约是下行链路的 1/6。将您的收发信机 VFO 设置到上行链路频率,发送几个莫尔斯码,然后调谐到您所要的下行链路频率附近,找到您刚才发送的信号。您要调节发射机的输出功率,直到您的信号比信标信号弱 10dB。如果卫星并不总是处于远地点,那么您可能需要稍微降低一点发射功率,以防止触发了 LEILA 功能(上行链路功率限制程序,以确保过强的信号进入卫星转发器,不会使其他通联信号的功率降低),这点对于两个版本的天线来说都是要注意的事情。即便对于简单版本天线,当卫星运行轨道低于 30000km 时,都具备有足够的增益。

关于 OSCAR 40 更进一步的信息,可以到 AMSAT 的网站 www.amsat.org/ 查询。Steve Ford(WB8IMY)写了一篇关于 OSCAR 40 入门到文章,非常值得一读,文章里也包括了一些卫星资源信息。

笔者已经应用这些天线与 OSCAR 40 做了多次的通联,完整的台站还要包括 AIDC-3731AA 下变频器,YAESU 的 FT-847 收发信机。还要一个便携电脑运行 InstantTrack 和 InstantTune 软件,以定位卫星以及自动调谐 FT-847^[2]。

如您在图 6.74 中所看到的,整个卫星地面站都可以方便得放在一个餐桌上,便携电脑和 FT-847 是放在下行链路天线和简单版本上行链路天线的前方。下变频器是粘在下行链路天线后部,并用一小段 RG-6 同轴电缆连接到 FT-847,而上行链路天线则是直接连接到 FT-847 的 UHF 输出端。当使用高性能的上行链路天线时,可以放置在餐桌旁边的地面上。



图 6.74 整套卫星地面站包括跟踪用的便携电脑, FT-847 以及上下行链路两个天线。(嘿,认得出来桌上那个电键吗?那是 1944 年出品的 J-38,跨越了 60 年的时代!——编者)

这些天线果真能工作吗？答案是十分肯定的！通过这个简易的装置，我已经通过 OSCAR 40 取得了数十个 SSB 和 CW 通连，包括卫星到达大西洋上空时的 DX 通连。下行链路天线的信号听起来非常好，两个版本的上行链路信号得到的报告也是良好的。当我通联时谈起这个天线系统使用覆盖铝箔纸的纸板箱子制作时，总能得到对方兴趣和赞誉。OK，我们通过卫星见！

附注：

^[1] S. Ford (WB8IMY) “OSCAR 40 on Mode U/S—No Excuses!,” *QST*, Sep 2001, pp 38-41.

^[2] *InstantTrack* and *InstantTune* are available from AMSAT at www.amsat.org. A version of this article originally appeared in the *Proceedings of the AMSAT-NA 20th Space Symposium*, 2002.

Tony Monteiro (AA2TX) 在 1973 年成为一名火腿，现在为 AMSAT、TAPR、ARRL 和 QCWA 的成员，主要的兴趣在业余无线电相关的技术，可以经常听到他在卫星上的通联。Tony 曾经是贝尔实验室的技术职员，并在思科工作担任过资深管理岗位，还开过几个初创公司。他的邮箱为：aa2tx@amsat.org。

本文最早刊登在 AMSAT-NA 2002 年第 20 届空间研讨会的汇编资料上。

6.9 一种用于 VHF/UHF 卫星通信的简易固定天线

L.B. Cebik (W4RNL<SK>)

您可以应用这个高效的天线系统探索低轨道业余卫星。

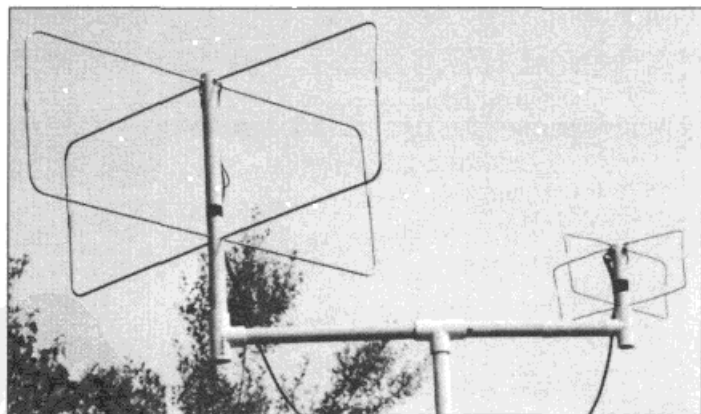


图 6.75 VHF/UHF 卫星通信的简易固定天线

当我们刚刚开始对业余卫星通信感兴趣的时候，对于跟踪天上卫星轨迹所需的，带有方位角和仰角旋转器复杂天线系统的投资考虑，往往让我们犹豫不决。对于入门者来说，所需的是一个简单、可靠的固定天线，或者说一套天线，这样可以先看看我们是否真的有兴趣继续深入去玩这种通信方式。因此我们关注的就是基本的卫星固定天线，并设计出一套适合家里制作的简单天线系统，这里介绍 145MHz 和 435MHz 两个版本。

6.9.1 十字交叉天线与卫星

在十几年前，许多工作在 VHF 和 UHF 波段的固定卫星天线曾经采用十字交叉天线，十字交叉实际上是包含两方面不同的意思：一方面是指它是个特殊的天线，由两个 90° 相位差馈电的十字交叉振子构成；另一个意思，是指通过对任何交叉振子馈以 90° 相差时能够产生全向辐射场的原理。第一个含义只是让我们理解到是个简单的天线，而第二个含义则可以开启我们对任何可能的天线产生全向工作的思路。

图 6.76 给出了一个获得全向辐射所需的 90° 相移的一般办法。注意同轴电缆中心导线只连接到两个交叉单元的其中一个。用一段特性阻抗与第一个单元馈电电阻抗相同的 $1/4\lambda$ 长传输线，将一个单元与另一单元连接起来。两个单元的另一末端，分别连接到传输线末端的屏蔽层上。如果构成单元刚好使用偶极子，那么 $70 \sim 75\Omega$ 的传输线正好可以作为移相线。然而，此时整个天线系统的馈电点阻抗将只有单个单元阻抗的一半，所以得到的大约是 35Ω 。对于这种采用偶极子的十字天线，我们要么就接受 $1.4:1$ 的 SWR，要么呢就找找一段匹配电缆，将它匹配到 50Ω 。这可以用一对长度 $1/4\lambda$ 并联的 RG-63 电缆得到大约 43Ω 的阻抗，从而可以将 35Ω 变换到 50Ω ，接到主馈电电缆去。对于所有这种匹配的系统，我们都要牢记算入传输线的速度系数，该系数将使实际的电缆长度比 $1/4\lambda$ 短。

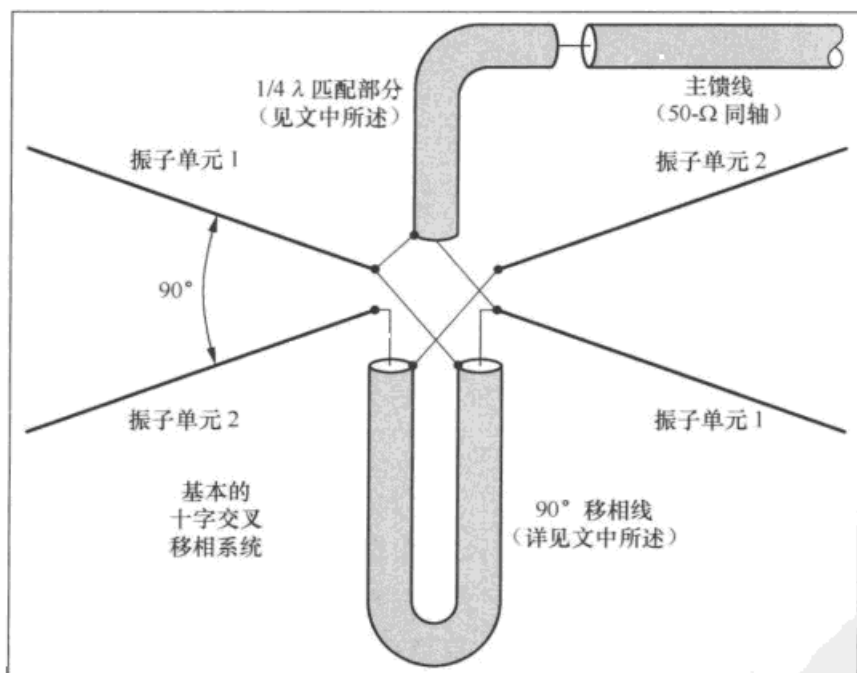


图 6.76 基本的十字交叉移相（与匹配）系统，可以在任何相互靠近的天线单元之间进行 90° 馈电

这种用偶极子构成的十字交叉天线，对于固定台站的卫星通信相当普遍。参见图 6.77 所示，在左侧，就是 20 世纪 70 年代以来在 ARRL《天线手册》上所推荐的天线系统，一个标准的偶极子十字交叉天线，放在一个模拟地面的地网上面。天线单元与地网之间大约在 $1/4\lambda \sim$

3/8 λ 距离时，辐射图最好。对于卫星通信来说，就是要尽量得到一个像圆形屋顶那样的辐射形状。在最好的情况下，是能够得到一个在靠近水平方向更突出一些的圆屋顶形状，使得卫星越过的整个过程，可以尽可能长时间的通信。

这种带地网的十字交叉天线系统，简单是简单，但也相当庞大，容易被风刮坏。不过我们可以将地网去掉，损失一点天线的性能。另一个思路是，减小天线的体积，用一个自身带有反射器的天线来替代，不过，这要求要满足发射和接收时圆顶形状的辐射图要求。有一种双 MOXON 方形阵列，如图 6.77 右侧所示的大概形状，比起传统的十字交叉天线有几个优点，首先是它能够产生较好的类似圆顶形辐射图，其次它也比较容易制作，安装小巧。

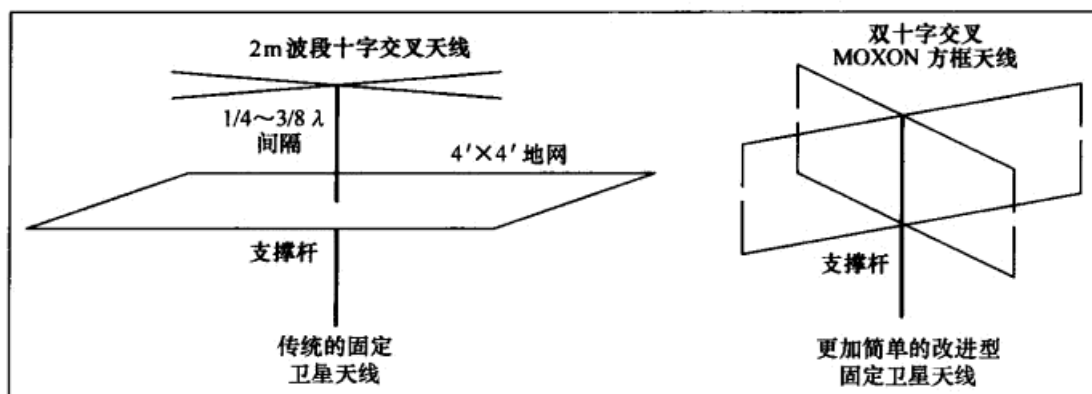


图 6.77 固定位置卫星天线的两种方案：传统带地网的十字交叉天线，与一对十字交叉的 MOXON 方框天线

几乎每种固定卫星通信天线，在低角度都存在零点，并且当我们将天线升得太高时，零点数会增加，因此卫星在低角度的时候会导致通信失败。图 6.78 给出了带有地网的十字交叉天线的垂直辐射图，以及一对 MOXON 方框天线位于离地面 2λ 时的情况。如果 1λ 的高度可行，那么处于这个高度时，将会减少更多的低角度零点。然而，制作者总是不得不平衡高度对于辐射图的影响，以及水平地面障碍的问题。

在垂直辐射图表明，双 MOXON 天线可比传统的十字天线更具有相当平滑的圆顶辐射形状。十字交叉天线圆形图的中间部分要比最大增益处降低 2dB，而正中央谷处更是降低了 3dB。这种峰值与谷值的差异，将可能使得通信不成功。因此，从得到良好的圆顶形状的目的，采用交叉 MOXON 将会更好。

对我来说，一个显然的简单想法就是在一个标准的偶极子十字交叉天线上再增加反射单元，以得到和加上地网类似的效果，图 6.79 说明了这种想法的局限性。这种方式实际上就是在偶极子十字天线后面加上反射单元，形成了一对交叉的 2 单元八木天线，并作 90° 相差馈电。这样所形成的辐射图确实更加圆滑，比双 MOXON 更强劲。但是，它的半功率点波束宽度却下降到 56° ，那么这样的天线对于具备 AZ-EL 跟踪旋转器系统来说，应该是相当棒的天线，但对于作为固定卫星天线来说这样波束宽度就非常不够。

而双 MOXON 天线，虽然增益稍低，当在整个空域的增益分布都比较均匀，对于入门者来说是比较容易获得成功的天线。在 145.5 ~ 146.5MHz 频率范围内，其辐射图变化在 0.2dB

之内，在整个 2m 波段频率范围内，则在 0.5dB 波动范围内。由于卫星工作频率通常集中在 145.8 ~ 146.0MHz 之间，频率特性相对宽的天线很容易满足它。对于 435.6MHz 版本会具有更大的带宽，能够覆盖卫星活动的 435 ~ 436.2MHz 频率范围。

与偶极子十字交叉天线一样，双 MOXON 天线也是通过一段 $1/4\lambda$ 的 50Ω 移相同轴电缆进行 90° 馈电的，激励单元应该如图 6.76 所示进行连接。由于单个 MOXON 方框单元的自然馈电阻抗就是设计为 50Ω ，因此两个 MOXON 并联就应该是 25Ω 。这是可以用一段 $1/4\lambda$ 的 $70 \sim 75\Omega$ 电缆并联作为匹配段，就能够将低阻抗很好得匹配到 50Ω 的主馈电线，并连接到电台。总结一句，我们已经将两个 MOXON 方框做十字交叉后，就形成了一个非常好的固定卫星天线。

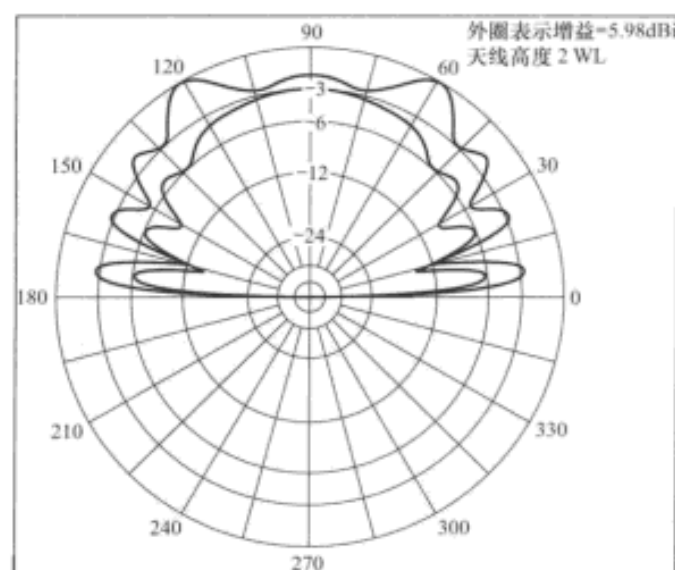


图 6.78 传统十字交叉地网天线($3/8\lambda$ 间隔, 蓝线)
与双 MOXON 天线 (红色) 在仰角面的
比较, 两者高度均为 2

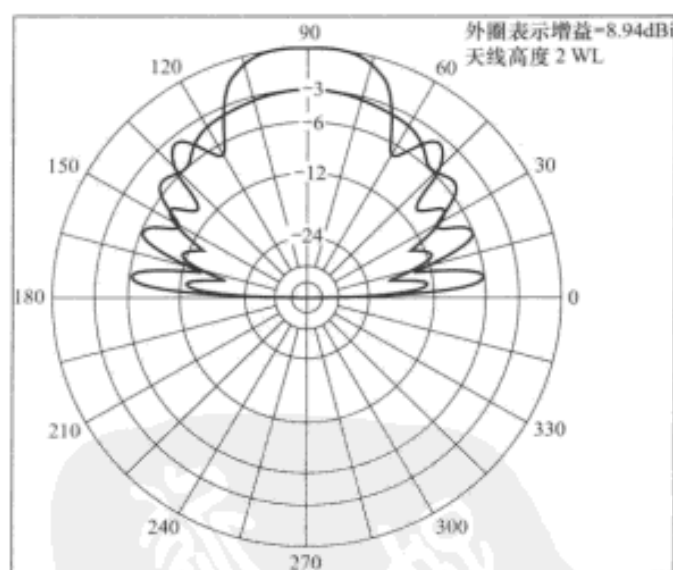


图 6.79 2 单元十字交叉天线(2 单元的交叉八木天线, 蓝线)
与双 MOXON 天线 (红色) 在仰角面的
比较, 两者高度均为 2

6.9.2 双 MOXON 天线的制作

实际上，MOXON 方框天线是一个将反射单元和激励单元进行变形的 YAGI 派生定向天线，不过，不再使用直线的单元，而是将激励单元与反射单元相向弯曲，那么这些单元末端之间的耦合，结合振子单元平行部分的耦合，产生的波束就更加宽。所以通过仔细地设计尺寸，我们就可以得到非常好的特性（也就是获得适当的增益和良好的前后比），以及 50Ω 的馈电点阻抗。

事实上，单独一个 MOXON 方框天线，就可以很好地工作在每个卫星频段上。当直接指向上方时，MOXON 方框天线的辐射图就是一个相当宽度椭圆形，尽管并非是完全的圆形。这种椭圆形也让 MOXON 天线相比偶极子十字交叉天线具有更多的优点。如果偶极子之间的移相线不够精确，那么十字交叉天线那种接近圆形的辐射图，将很快变成椭圆形，这是因为单个偶极单元本身的辐射图是 8 字形。而 MOXON 的椭圆形辐射图，却允许在尺寸和移相线长度要求上不需太精确。

图 6.80 给出了 MOXON 天线的关键尺寸，字母所代表的是表 6.12 的数据，设计的工作频率是 145.9MHz 和 435.5MHz，这两个频率为卫星频段的中心频率点。在 2m 波 MOXON 原型天线中，采用了 3/16 英寸直径的金属棒，而 435MHz 版本的则是用 #12 AWG 导线来制作，通常直径在 0.0808 英寸大小（用这个尺寸制作的单个 MOXON 天线，应该可以覆盖整个 2m 波段，以及在 432MHz 波段具有 12MHz 左右的带宽）。单元的直径稍微粗一点或细一点，都关系不大，但主要的尺寸如果要改变，则需要重新进行计算。

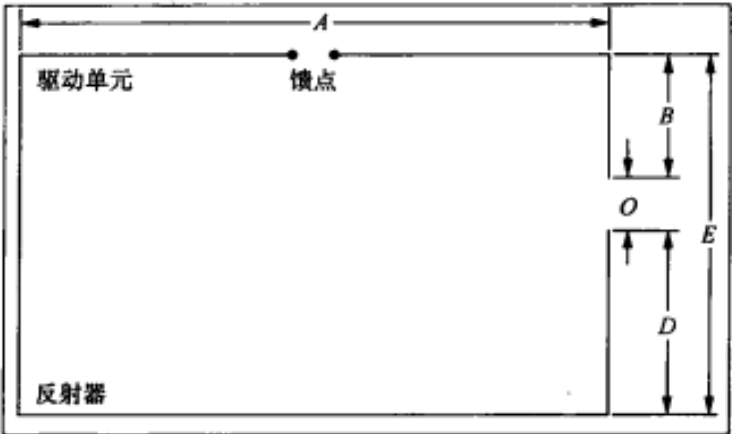


图 6.80 MOXON 方框天线的基本尺寸。
两个相同的方框构成一个十字交叉对

反射单元可以用单根的一段导线或金属棒来制作，我是用了一段金属管来弯曲形成弯角的。弯角的圆形会使得长度稍微比表 1 给出的尺寸大一点，我通常都考虑了这个弯曲的变化，把增加的长度，从边 - 边的尺寸（A）与反射单元尾部（D）之间距离扣去。在使用实际的铝棒制作之前，先用家里电力导线做些练习，可以使得实际加工时更准确。总的反射单元长度应该为 $A + (2 \times D)$ 。

表 6.12 卫星通信应用的 MOXON 方框天线尺寸 单位：英寸

每副天线需要两个同样的方框，移相线阻抗为 50Ω 同轴电缆，匹配线为两段 75Ω 同轴电缆并联。在原型天线中使用的是外径小于 0.15 英寸的低功率电缆。字母符号的意义参见图 6.80。

尺寸标号	145.9MHz	435.6MHz
A	29.05	9.72
B	3.81	1.25
C	1.40	0.49
D	5.59	1.88
E (B+C+D)	10.80	3.62
1/4λ 长度	20.22	6.77
计入 0.66 速度系数		
后移相线与匹配线	13.35	4.47
长度		

激励单元则包含两段构成，因为我们将整个激励单元从中间切断进行馈电和接入移相网络。我通常的做法是，在后面做弯曲和修剪获得准确尺寸之前，会留得长一些。激励单元总的长度，包括馈电连接的间隙，应该是 $A + (2 \times B)$ 。

可能在这个制作中，最关键的尺寸应该是间隙 C 了，我用一段五金店找到的尼龙管，套在单元振子间隙两端，可以很方便精确地调整间隙距离。当一切都测试并确认正确无误，用少许的超能胶将管子的末端和铝棒一起封住。我通常会在铝棒上弄个小缺口，使得超能胶可以注入，粘结好连接处。对于 UHF 版本，可以用一段热缩管，来固定间隙之间的距离，以及振子单元尾端的对齐固定。

制作好单个的 MOXON 天线是一个事情，另外还有个事情是要让这对交叉的 MOXON 天线工作起来。图 6.83 是我制作原型的一般方案，采用 CPVC 管的办法（也可以用标准的 40 或更薄些的 PVC 或玻璃钢管）。支撑管的直径则是 3/4 英寸。反射单元穿过支撑管下面的孔槽，并且两边都固定住。两个反射单元底部的中心点是否接触，对于工作上都没有影响，所以我用了一颗非常小的螺丝钉使 2m 波反射单元的相对位置固定。我将 435MHz 版本反射单元的中心干脆焊接一起，然后再给 CPVC 管道底部加上一个转接头，以支撑两个反射单元的安装，以及将底部套接到主天线杆。如有需要，可以对管子都加上盖子或密封。

馈电点都焊接上接线垫，移相线沿着支撑管的一边放置，而匹配线则沿着另一边垂下安置，用电胶布将两段线都固定住，在最坏的天气下，有可能需要用防腐材料或外皮再裹一层。同样的，电缆末端暴露出来的部分，以及相互连接的地方，都应该密封防水。具体可以参见图 6.81 中那个原型天线的处理办法，这是在进行密封前的样子，由于防腐材料或外皮覆盖后，想观看的地方就显得不太清楚了。

两个天线安装完毕之后的样子见图 6.82，从 T 型连接头接出的 PVC 管，可以连到中间的 T 连接头，这样主支撑杆就可以同时支撑两个天线了。用各种这类 PVC 材料部件，就可以组合成能与电视天线撑杆配合使用的支撑系统。另外一种方式，是将两个天线分别隔开大约 10 英尺安装。尽管我几乎是居住在一个小山顶上，但 10 英尺安装高度，也已经被证实对于多数的卫星接收来说是足够的。

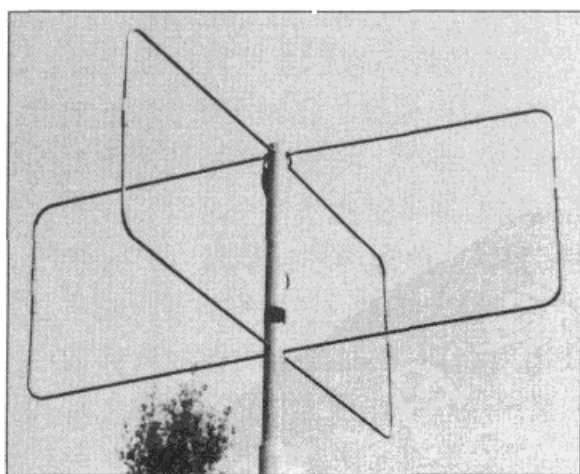


图 6.81 145.9MHz 交叉 MOXON 方框天线对的近视图

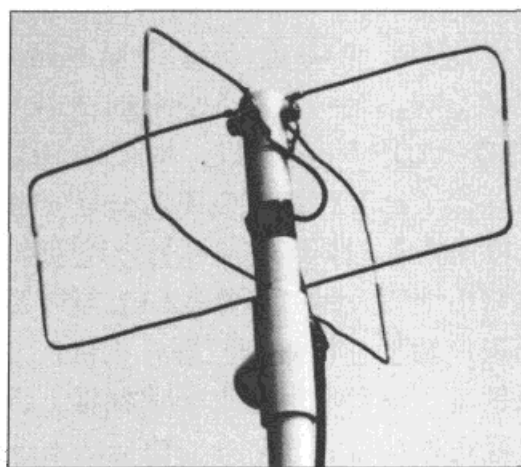


图 6.82 435MHz 的 MOXON 天线

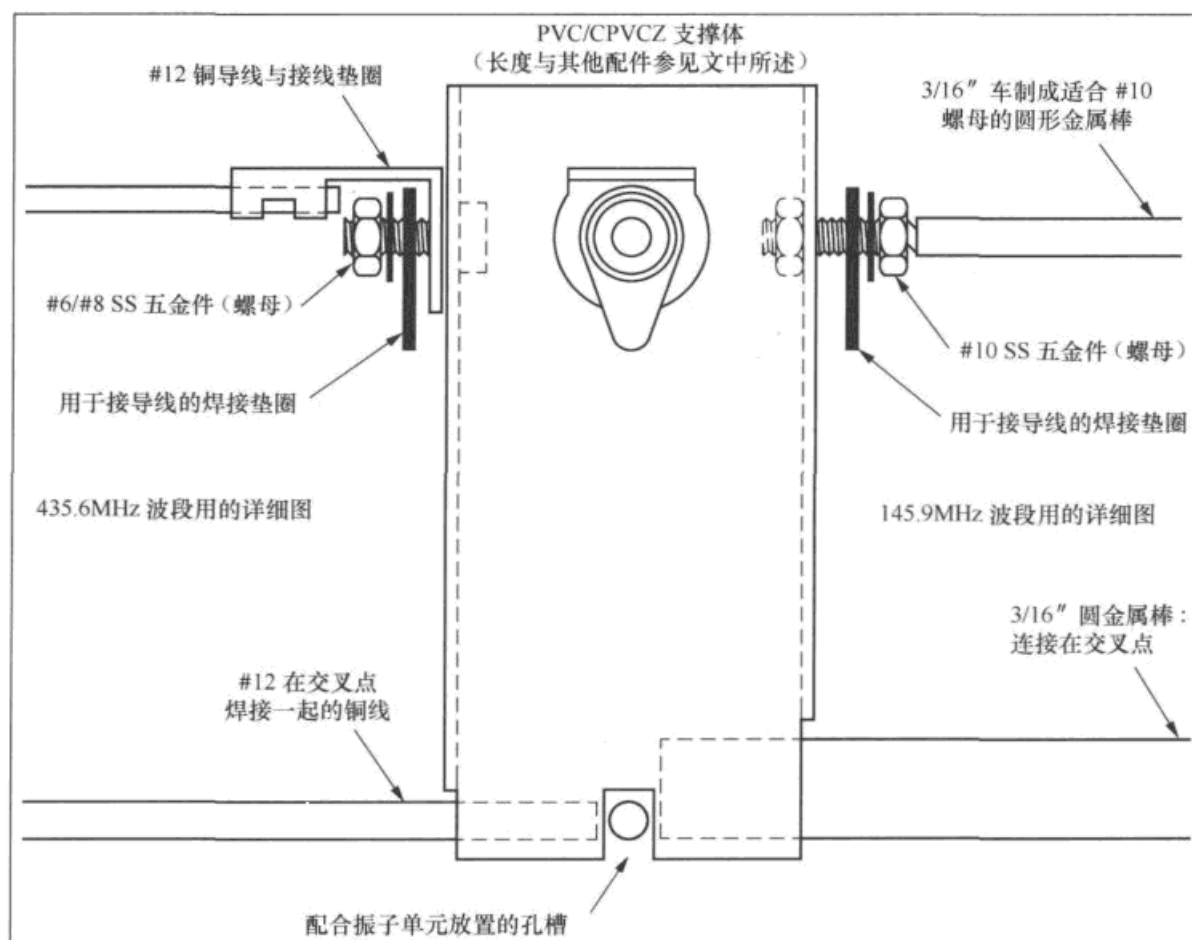


图 6.83 双 MOXON 原型天线中的一些结构细节图

两个天线可以被安装在同一支撑杆上，不过，为了保证具有类似的圆顶形辐射图，它们应该对于地面保证具有相同的波长数高度。打个比方，假如 2m 波段天线两个波长的高度是大约 14 英尺，那么对与 435MHz 天线来说，其底部离地面的高度就应该为 4.5 英尺。将高频段的的天线，叠放在 2m 波天线下方，将会对所需的辐射图形状产生少许的影响，但实际的操作上并无大碍。

对于这个天线系统，除了激励单元与反射单元之间的间隙需要尽量精确之外，没有其他需要调整的。这种十字 MOXON 天线具有很宽的 SWR 曲线，比如在整个 2m 波段，最高 SWR 都在 1.1:1 以下。不过，如果移相线长度误差太大的话，将会严重破坏所需要的辐射图形状。这除了需要在裁剪电缆之前对移相线和匹配线长度多做几次检查之外，别无他法。正确的长度是指从一个连接点到另一连接点的长度，要计入电缆内芯线暴露出来的部分。

这些小型的天线不需要 AZ-EL 旋转系统对水平跨越运行的卫星进行跟踪。对于与卫星的通联来说，功率并非是个问题（相反，注意不要用太高功率），现代接收机前端也具有足够的灵敏度，使得通信变得非常容易。所以当卫星出现在地平线上 30° 左右时，这些天线本身就已经可以捕获到非常好的信号。不过当您已经完全沉迷于卫星通联时，您就会投资更多且更加完善的跟踪系统，此时，这些天线就可以作为您的复杂系统卸下维护时的备份天线！

6.10 工作于 435MHz 的便携式螺旋天线

对于 435MHz 工作频率来说，螺旋天线应用于 U 波段卫星通信上行链路将是非常合适的。螺旋天线所产生的完全圆极化，可以将在这些应用中影响最大的信号自旋衰落 (*spin fading*) 现象降到最小。图 6.84 所示的天线，符合 OSCAR 卫星通信中作为一个轻便高效上行链路天线所需的要求，可以快速装卸，重量轻，都是这种阵列天线的好处。该天线是 Jim McKim (W0CY) 设计的。

如前面提到，螺旋天线大概是对所有天线中对尺寸的容差性最好的，不过，这里给出的尺寸还是需要尽量接近，文中多数指定的材料在任何自选五金店或建筑材料店都有供应。制作这个轻便螺旋天线所需的材料在表 6.13 中已经列出来。

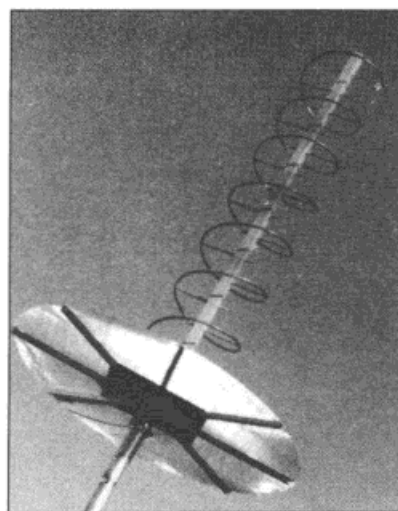


图 6.84 已装配完成的轻便式 435MHz 螺旋天线

表 6.13 轻便式 435MHz 螺旋天线材料清单

数 量	名 称
1	法兰盘安装的 N 型母连接器
18 英尺	1/4 英寸软铜管
4 英尺	1 英寸内径的镀锌钢管
1	5 英尺 × 1 英寸的玻璃钢管或枫木棒
14	5 英寸长的 1/4 英寸直径枫木销子 (总 6 英尺长)
1	1/8 英寸铝板，直径 10 英寸
3	2 × 3/4 英寸角钢支架
1	30 英寸 × 30 英寸 (圆或方形) 铝丝网或金属布
8 英尺	1/2 英寸 × 1/2 英寸 × 1/2 英寸带槽型铝，或老电视天线单元金属管
3	铁氟龙材料小垫片或聚苯乙烯小棒子 (用于螺旋第一个半圈支垫用)
1	1/8 英寸 × 5 英寸 × 5 英寸铝盘 (用于横梁 - 支杆连接盘)
4	1 1/2 英寸的 U 型螺栓 (用于横梁 - 支杆连接固定)
3 英尺	#22 号裸铜线 (用于扎住螺旋各圈与枫木销子)

各种五金件主要用于将连接器、铝盘和反射屏等的安装固定。

该便携式螺旋天线由 8 圈管径 1/4 英寸的软铜管构成，间绕支撑在一段 55 英寸长的 1 英寸直径玻璃钢管或枫木棒上。如果需要，也可以用剩余的硬馈线的铝外皮来替代软铜管。螺旋的圈数由穿过天线中间 1 英寸直径支撑杆，每段长度 5 英寸，直径 1/4 英寸的枫木销子支撑，

图 6.85(A) 给出整个天线的尺寸。每个支撑销子的末端都有一个 V 形凹槽，以定位固定软管铜管，见图 6.85(B)。

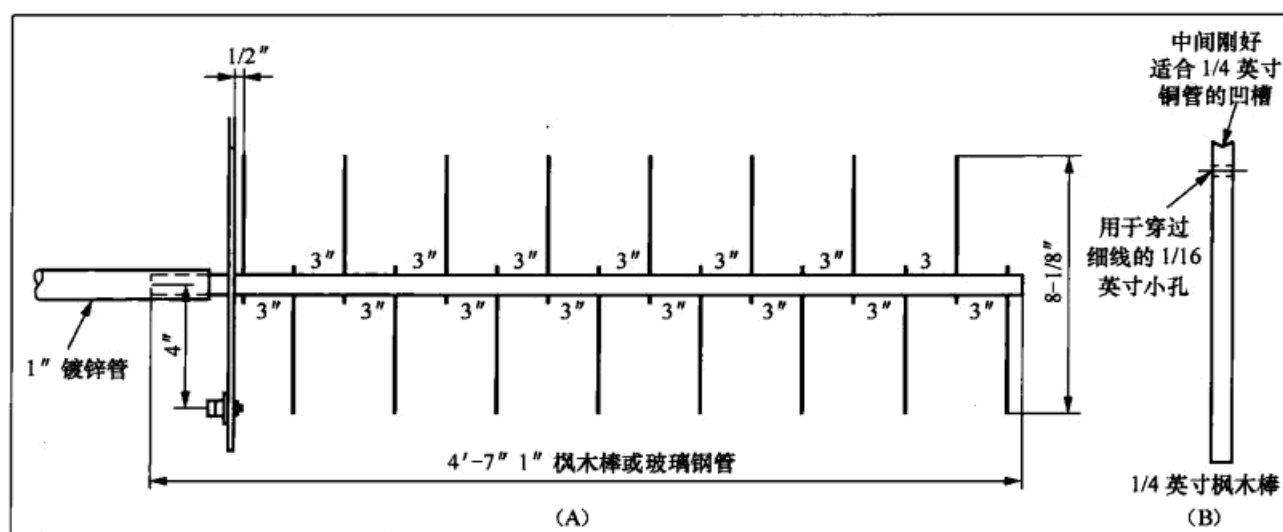


图 6.85 (A) 给出这个轻便式 435MHz 螺旋天线布局图，第一个 5 英寸长的支撑销子，与地网之间的间距是 1/2 英寸；其他各个销子的间距都是 3 英寸。(B) 图是用来卡住螺旋管的支撑销子凹槽细节，同时也看到，在凹槽下方开一个 1/16 英寸的小孔，以便将细线穿过去固定螺旋管

天线中心的支撑棒，插入在一段 49 英寸内径的镀锌管上，这段镀锌管也作为天线的配重用。穿在螺旋内部直径 1 英寸的支撑棒必须是非导电的，在绝缘支撑棒与镀锌管连接点附近，可以用一片铝网或金属布作为反射屏。

如果您在寻找 1/4 英寸的软铜管时碰到些麻烦，可以到冷藏设备供应店去找找看。多孔的铝筛网用铁皮剪刀可以容易地剪切，通常这种材料都是按照每张 30 英寸 × 30 英寸销售的，这个尺寸也方便反射屏的制作。镀锌的 1/4 英寸硬金属布或铜皮也都可以用做反射屏，不过铝材的最容易加工，重量也轻。

这里用一块 1/8 英寸厚的铝板作为螺旋天线的支撑盘，这种材料的来源可以找找多余的货架的面板。图 6.86 给出这个支撑盘的布局。

图 6.87 还给出如何采用铝槽型材来支撑反射屏的另一办法（也可以采用铝管，如果槽型材料难以找到，那么去找找废弃的 TV 天线就有大把这种材料）。反射屏安装在 10 英寸直径的支撑盘底部，支撑盘和反射屏以及铝槽管用电镀五金件或铆钉固定在一起。这样整个支撑结构就非常牢固，尽管螺旋天线的中心支撑棒可以采用枫木，但最好还是用玻璃钢管。

用合适的五金件，将 N 型连接器安装在支撑盘的底部，连接器中心引脚要充分伸出，以方便将螺旋圈铜管的末端焊接上去。铜管的末端打平后要上点锡，以防止潮气的进入。如果螺旋圈将来需要从地网屏上卸下，那么就不要直接将铜管焊接到连接器，相反，可以采用一小块黄铜，在一侧打钻和攻丝一个适合 6-32 螺丝的孔，再在铜块上钻另外一个孔，以适合套进 N 型连接器的中心引脚，并将它们焊接在一起。现在，与螺旋圈铜管的连接，就可用一

颗 6-32 的螺钉，而不是用烙铁了。

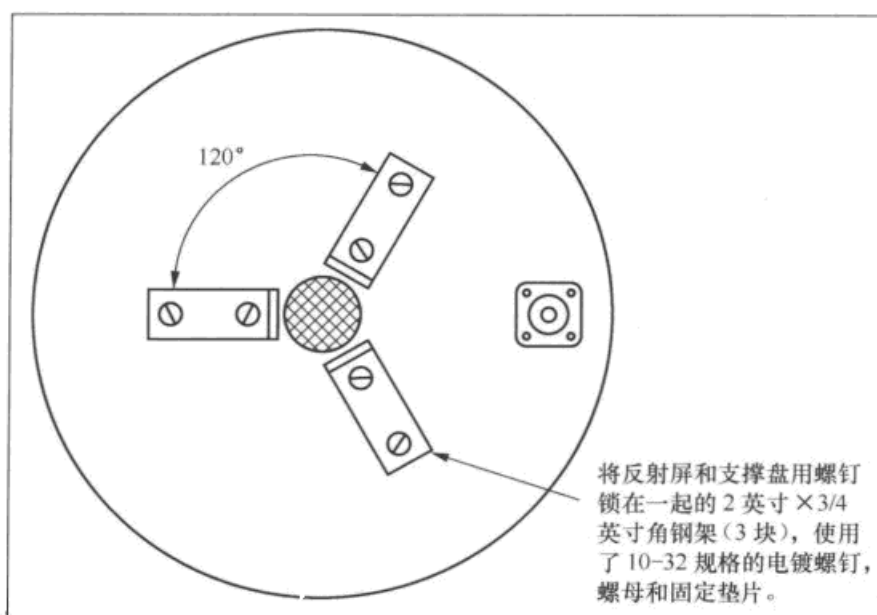
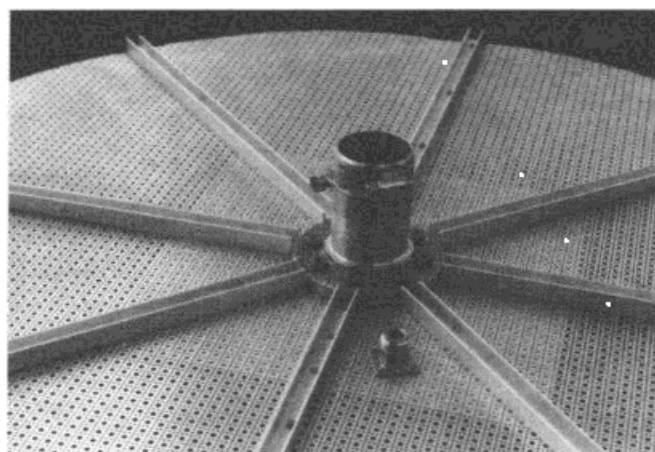
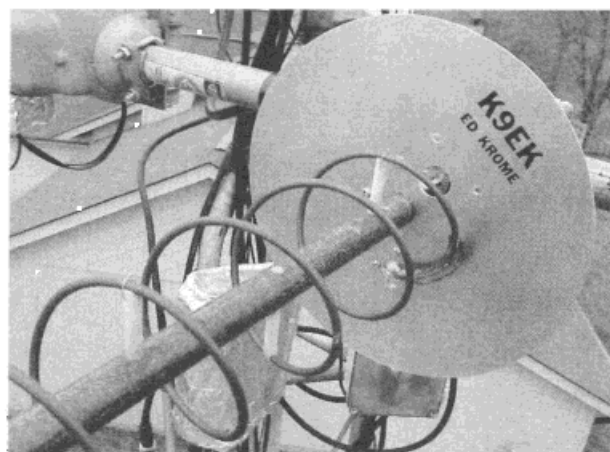


图 6.86 图中给出支撑盘（地网）与馈电点连接器的装配。圆形的支撑盘为一块直径 10 英寸、1/8 英寸厚的铝板。（其实方形铝板也可以）。3 块 2 英寸 × 3/4 英寸的角钢架被锁定到该支撑盘与反射屏的背面，用来固定套在支撑棒上的反射屏。带法兰盘的 N 型母连接器，安装在距离直径为 1 英寸的孔中心 4 英寸的位置



(A)



(B)

图 6.87 图 (A) 中是采用铝槽加固反射屏的办法，在这种办法中，图 6.86 的三个角钢架用一个旧的铝盘（支撑盘）来替代（W0CY 拍摄），图 (B) 中，从螺旋可以看出文中所述 1/4 圈匹配变换器的细节（K9EK 拍摄）。

关于图 6.85(A)，在玻璃钢管或枫木棒上规定的位置钻孔，以便让 5 英寸长度，1/2 英寸直径的销子穿过（如果采用的是枫木销子，需要在钻孔之前按照下面所述办法做抗雨水风化处理）。在每根英寸长的销子靠近凹槽的位置，钻一个 1/16 英寸小孔，以便穿过 #22 号裸铜线（该铜线用来将铜管固定在凹槽上），将 5 英寸长的销子打磨光滑，使胶水可以完全粘牢，

并对主支撑棒做环氧保护处理。

从反射屏位置起，开始顺时针方向绕制铜管，首先在铜管打平的末端钻一个孔，以方便穿进 N 型连接器的中心引脚，然后将它俩焊接一起，或者采用前面提到的，用螺钉锁入铜块的办法连接。仔细地将铜管通过一个一个支撑销子，绕成螺旋圈。

参见前文中提及的“ 50Ω 螺旋馈源”部分，弄清楚螺旋管的第一个半圈是如何靠近反射面位置安装的，图 6.87(B) 也同时给出 K9EK 将他的 U 波段螺旋天线匹配到 52Ω 馈线的优秀例子。保持这个间隔的安排非常重要，因为阻抗的匹配需要在铜管和地之间存在附加的电容。

最后用一小段 #22 号铜线穿入每个支撑销孔中，拧紧铜线将铜管和支撑销绑紧，并将铜线与铜管焊接起来，确保铜管卡在凹槽里面。按照这种办法将所有 8 圈螺旋都绕制好，完成后把铜管的末端剪断，并用焊锡封住末端。

木材的防风化处理

关于处理枫木销子的准备工作，需要有个次序。木制部件必须要做风化保护处理，以维持较长的使用生命。一个保护木制品比较好的方法，是将它们放在石蜡油中煮沸半个小时左右，任何在木制部件上的开孔，都应该在石蜡油中泡煮之后加工，因为木材经过覆上石蜡后再做加工处理不易发生氧化，小销子可以放在炖锅中煮沸。有个警告必须在这里提出，如果石蜡温度过高有可能将木材烧焦。石蜡通常在许多食品店销售用于罐头密封。木制部件还可以采用涂上三到四层防水油漆的办法来保护，每层清漆完全风干之后再刷上另外一层。

玻璃钢管或木棒应该能够刚好与钢管连接吻合，木棒可以采用打磨或在车床车制到合适的直径。如果采用玻璃钢管，则可以在与钢管连接处塞入一段合适的木销，木销插入管子时做环氧处理以保证长期使用。

透过管子和木棒打两个螺丝孔，并用螺钉将它们锁在一起，这样，这根管子就可作为一个牢固的安装架接到旋转器的横梁，并能配重天线的多数重量。如果安装件的“前面太重”的话，还需要将管子加重一些（如果平衡倾向另一个方向就要将管子裁短一些）。

在这个设计中，螺旋天线的阻抗一般大约为 105Ω ，通过改变铜管第一个半圈的间距，应该可以获得与 52Ω 电缆良好匹配。当通过调整第一个半圈的间距获得良好匹配后，要用聚苯乙烯或尼龙块，塞在铜管和反射面之间以维持这个间距不会变化，并可以用硅树脂将它们固定在反射屏位置上，最后还要记住使用同样的密封材料将 N 型连接器也密封好。



附录 A

卫星轨道

Martin Davidoff (K2UBC) 著 孙德庆 译

卫星轨道问题（确定卫星的位置关于时间的函数以及在太空中寻找它的轨迹）与我们研究诸如太阳周围的行星，地球周围的月亮或者是绕两者的卫星在运行本质上是一致的。这种相似性是缘于轨道上运行的物体只有自然界的作用力而没有推进系统造成的。17 世纪早期开普勒发现了行星运动的一些重要性质，它们被称为开普勒定律。

(1) 每一个行星都沿椭圆轨道环绕太阳，而太阳则处在椭圆的一个焦点中（行星在一个平面中运动）。

(2) 在相等时间内，从太阳到行星的连线（半径矢量）所扫过的面积都是相等的。

(3) 太阳系内各个行星公转周期（ T ）的平方与它们的椭圆轨道的半长轴（ a ）的立方之比相同。（ T^2/a^3 ）是常数。

这三个性质总结了观察结果，它们没有涉及控制行星运动的力。能够推导出开普勒定律的这种力的性质被牛顿归纳出来。这种力与把我们粘在地球表面的力是同一种——就是重力。

牛顿证明了当行星被一个指向固定中心点（太阳）的力所吸引时，开普勒第二定律就能成立。为了满足第一定律，这个力需要按这个行星与太阳的距离的二次反比（ $1/r^2$ ）变化。最后，如果要想实现开普勒第三定律，这个力需要与行星的质量成正比。实际上，牛顿走得更远，他假定不仅仅太阳这样吸引行星，每个质点（ m_1 ）都吸引其他各个质点（ m_2 ），这个吸引力指向两个质点的连线，大小为：

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \quad (\text{方程 1})$$

这里 G 是万有引力常数。

物体的运动是由作用其上的力所导致的。为确定卫星在太空中的位置，我们要 (1) 对

卫星所受的力和这个问题的其他方面做一些简化的假设。把注意力集中在运动的最重要的决定因素上。(2) 求解这个简化模型。(3) 按照最初的简化, 修正我们的结论。

1. 椭圆的几何性质

开普勒在他的第一定律中提到, 卫星运动主要以椭圆方式进行。所以应该用数学的方法来观察椭圆的几何性质, 它们有以下关系:

$$c^2 = a^2 - b^2 \text{ 或 } c = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (\text{方程 2})$$

使用方程 2, 任何一个参数 a 、 b 或 c , 都能在其他两个参数已知的情况下求得。从本质上来说, 为完全描述一个椭圆的形状需要两个参数。举个例子, 给定半长轴与半短轴 (a 和 b), 半长轴与原点 to 焦点距离 (a 和 c) 或者是半短轴与原点 to 焦点距离 (b 和 c)。

还有一个很方便的参数, 离心率 (e), 来描述一个椭圆。离心率可以被认为是一个描述椭圆于圆相似程度的数字。当离心率为 0, 我们就得到一个圆; 离心率越大, 椭圆就变得越来越狭长。更精确一些, 离心率是这样定义的:

$$e^2 = 1 - \frac{b^2}{a^2} \text{ 或 } e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (\text{方程 3})$$

根据它的数学定义, e 是一个从 0 到 1 的无量纲数。用方程 2 和方程 3, 我们能推导出另一个有用的关系。

$$c = ae \quad (\text{方程 4})$$

为描述椭圆的形状总是需要两个参数。4 个参数 (a, b, c 或 e) 中的任何两个都够用。

因为地球处在椭圆的一个焦点处 (开普勒第一定律), 为方便起见我们以地球为参照引入两个额外的参数: 从地球球心到轨道的“最高”和“最低”点的距离。

$$\text{远地点: } r_a = a(1+e) \quad (\text{方程 5a})$$

$$\text{近地点: } r_p = a(1-e) \quad (\text{方程 5b})$$

现在我们有 6 个参数, a 、 b 、 c 、 e 、 r_a 和 r_p 。任何两个都可以描述一个椭圆。用我们之前所学到的知识, 许多实际的卫星问题都可以解答了。

当椭圆的长轴和短轴相等时, 椭圆退化成圆。从方程 2 中我们可以看出当 $a=b$ 时 $c=0$, 就像我们刚才所说的那样。

由于圆轨道是椭圆轨道的一个特例, 解决卫星轨道问题的通用解法应该从研究椭圆轨道开始。但是, 圆形轨道往往研究起来比较简单, 所以我们将可以在它可以简化我们工作的时候再区别对待。

为解决卫星轨道问题, 首先要确定卫星在空中的轨迹, 然后研究卫星在地球表面的投影轨迹。其中的每一步都会依次被分解成更小的步骤。

2. 简化性假设

首先我们列出我们用以简化卫星在轨道平面上运动所作出的假设：

(1) 地球被认为是静止的，坐标系原点选定在地球的质心。

(2) 地球和卫星看作球对称的。这可以让我们用一个位置在其中心的质点来代表它们 (M 表示地球， m 表示卫星)。

(3) 卫星只受到一个力，一个指向地球质心的吸引力。这个力的大小按卫星与地球质心的距离的二次反比 ($1/r^2$) 变化。

刚才提到的这个模型被称作二体问题，详细地解答在大多数物理学导论书籍中都有。下面是一些重要结论。

3. 二体问题的解

起始条件：特定的起始条件（当卫星推进器关机瞬间卫星的速度和位置）导致了椭圆形轨道 ($0 \leq e < 1$)。其他起始条件会导致双曲线 ($e > 1$) 或抛物线 ($e = 1$) 轨道，这些我们不讨论。

圆形：对于能导致椭圆轨道起始条件的一个特别的子集，椭圆会退化（简化）成为圆 ($e = 0$)。

卫星平面：卫星轨道总是位于一个包含地球质心的平面上。当起始条件确定后，这个平面的方向在空间中是固定的（从一些固定的星星角度观察）。

周期和半长轴：卫星的周期 (T) 和轨道的半长轴 (a) 有以下关系：

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3 \quad (\text{方程 6a})$$

M 为地球质量， G 为万有引力常数。为计算地球轨道卫星，可以使用以下方程 (T 以 min 为单位， a 以 km 为单位)。

$$T = 165.87 \times 10^{-6} \times A^{3/2} \quad (\text{方程 6b})$$

$$a = 331.25 \times T^{2/3} \quad (\text{方程 6c})$$

请注意人造地球卫星的周期仅取决于它轨道的半长轴。对于圆形轨道， a 等于 r ，卫星到地球质心的恒定距离。

平均运动 (MM)：定义为在一个太阳日 (1 440min) 里，卫星公转次数（从近地点到近地点）。卫星的平均运动与它周期的关系如方程 7 所示 (MM 单位为每太阳日公转次数， T 单位为 min)。

$$MM = 1440/T \quad (\text{方程 7})$$

因为很多轨道参数的来源都提供平均运动，用它来计算周期和半长轴往往是必要的。

速度：卫星的总速度（ v ）沿轨道变化。规律如下：

$$v^2 = GM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right) = 3.986 \times 10^{14} \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right) \quad (\text{方程 8})$$

r 为卫星到地球质心的距离， r 与 a 以米计， v 以米每秒计。对于一个给定的轨迹， G 、 M 和 a 为常量，所以 v 仅与 r 有关。方程 8 因此可以再已知 r 的情况下用来计算轨道上任一点的速度。速度的范围是有限的：最大速度出现在近地点，最小速度出现在远地点。运动方向总是与椭圆轨迹相切。对于圆形轨迹 $r=a$ ，方程 8 可以简化为（ r 的单位为米， v 的单位为米每秒）：

$$v^2 = \frac{BM}{r} = (3.986 \times 10^{14}) \left(\frac{1}{r} \right)$$

对于圆形轨道， v 是常数。

位置：卫星的位置用极坐标 r 和 θ 表示。 θ 从近地点开始逆时针计算。往往我们需要知道 r 和 θ 关于运行时间 t （ t 从卫星经过近地点开始，或者当轨道为圆时取其他的参考点）的函数。

圆形轨道卫星以恒定速度运动：

$$\theta [\text{用角度表示}] = \frac{t}{T} (360^\circ) \text{ 或 } \theta [\text{用弧度表示}] = 2\pi \frac{t}{T} \quad (\text{方程 9})$$

半径也是固定的。

椭圆轨道的问题就更复杂一些。我们知道（方程 8）卫星在近地点运动更加快速。 t 和 g 的关系可以从开普勒第二定律中推导出来。

在椭圆轨道里，从近地点经过的时间 t ，如下给出：

$$t = \frac{T}{2\pi} (E - e \sin E) \quad (\text{方程 10})$$

这里角 E ，称为偏近点角，由以下的联立方程定义：

$$E = 2 \arctan \left[\left(\frac{1-e}{1+e} \right)^{0.5} \tan \frac{\theta}{2} \right] + 360^\circ n \quad (\text{方程 11})$$

$$n = \begin{cases} 0 & \text{当 } -180^\circ \leq \theta \leq 18^\circ \\ 1 & \text{当 } 180^\circ < \theta \leq 540^\circ \end{cases}$$

方程 11 也可以有几种变体：

$$E = \arcsin \left[\frac{(1-e^2)^{0.5} \sin \theta}{1+e \cos \theta} \right] \text{ 或 } E = \arccos \left[\frac{e + \cos \theta}{1+e \cos \theta} \right]$$

请注意，“近点角”意思是角。方程 10、11 联立起来，就形成了开普勒方程。

当人们第一次试图求解方程 10、11 时会遇到两个常见错误。方程 10 包含第一个陷阱。因为表达式 $e \sin E$ 是无量纲数， E 的单位必须使用弧度制。第二个陷阱位于处理方程 11 的

多种变体时。尽管反三角函数会有很多解，计算机和计算器只会给出一个主要的解。举个例子，当 $\sin 9=0.99$ ，那么 9 可以等于 82° 或者是 98° （或者是其中任何一个加减 360° 的任意倍数），但是计算器只会显示 82° 。如果真实情况需要一个主值范围以外的值，就需要对结果做出适当的调整。方程 11 已经包含了需要的调整，所以它可以用于 $-180^\circ \sim +540^\circ$ 范围内 9 的值。如果使用方程 11 的其他形式，就需要你来选择合适的范围。有一些提示也许有用：(1) $E/2$ 和 $\theta/2$ 必须总处于同一象限 (2) θ 增加时， E 必须增加 (3) 当方括号里的值穿越 $\pm$ 当时，方程 11 的变体需要做出调整。

我们现在有一种方法能在 θ 已知的情况下求解 t ：把 θ 代入方程 11 来求解 E ，再用 E 代入方程 10 得到 t 。它的逆过程，用 t 去求 θ ，会复杂很多。关键的步骤在于在 t 已知的情况下通过方程 10 求解 E 。不幸的是，不存在一个简单的用 t 表示 E 的方法。但我们可以画出 θ 关于 t 的函数图像，再反向读图来求得任意的 t 所对应的 E 。另一种方法是迭代逼近。迭代法是一种系统性的方法来猜 E 的解，计算对应的 t 来确定结论和目的值的距离，然后用这个信息来对 E 作出一个更好的猜想。这种方法听上去晦涩，做起来却简单。经常用于求解开普勒方程的迭代法被称为牛顿-拉夫逊方法。

现在我们把注意力转向 r ，卫星到地球质心的距离。比用 t 的函数来表示 r 更加方便的方法是用 r 和 θ 的关系来表示。

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos \theta} \quad (\text{方程 12})$$

4. 对简化模型的修正

现在我们看一下二体问题的解（简化行星轨道模型），检查一下怎样用更加详细的分析修改我们的结论。

(1) 在二体问题中，静止点是系统的质心，不是地球的质心。由于地球比人造卫星重得多，这点修正可以忽略。

(2) 把地球当作质点看待意味着假设地球的质量分布是球对称的。考虑地球实际上的不对称（主要是赤道的隆起）对卫星增加了一个额外的中心力。这些力以 $1/r$ 的更高阶变化（例如 $1/r^3$ 、 $1/r^4$ 等）。它们会导致 (i) 卫星椭圆轨道的主轴会在轨道平面上缓慢旋转，以及 (ii) 卫星平面会绕地球南北轴旋转。这些现象都是能观察到的，我们待会讨论。

(3) 除地球引力之外卫星受到许多其他力的影响。比如太阳，月亮和其他行星的引力，大气摩擦，太阳的辐射压力，等等都有影响。现在我们看看其中一些力的影响。

大气阻力：在低高度时影响卫星最主要的扰动力量就是卫星与地球大气中的原子和离子碰撞所产生的阻力。我们分两种情况讨论这种阻力：(1) 具有高远地点和低近地点的椭圆轨道以及 (2) 低高度圆形轨道。在椭圆形轨道里，阻力主要在近地点处起作用，降低卫星的速度，并导致远地点高度下降（近地点高度保持不变）。大气阻力通过降低轨道的远地点高度，

使椭圆轨道的离心率降低（轨道变得更圆）。

对于低高度环形轨道，阻力连续作用于整个轨道。它使得卫星以逐渐增加的速度沿螺旋线接近地球。这不是印刷错误。尽管与直觉相违背，阻力造成卫星速度增加。当卫星因于大气碰撞失去能量而降低到较低的轨道时；方程 8 表明高度下降时速度将上升。

一颗卫星在太空中的服役时间（在坠入大气层烧毁前）取决于起始轨道，航天器的几何形状和质量，以及地球电离层的组分（每天每年变化都很大）。

太阳活动对地球 300 ~ 600km 高度的大气影响很大。强太阳活动会增加地球的大气密度并增加对航天器的阻力。早期对卫星 3 ~ 5 年的寿命估计需要被修正，因为 1984 ~ 1987 年间记录下的太阳活动处在一个非常低的水平上。

引力因素：太阳和月亮的引力会影响那些高远地点（远大于地球半径）轨道卫星，如 Phase 3 系列业余通信卫星。在很多情况下这些小的扰动（力）在较长的时间里平均下来接近 0，所以影响不大。但在某些情况下它们的力持续数月甚至数年作用在轨道同一位置处。在这些情况下平均的结果就不能对消——它们会累积。这种结果，称为谐振干扰，会导致轨道较大的变化。这种影响的一个结果是 OSCAR 13 卫星在轨 8.5 年后坠入大气层。

20 世纪 80 年代中期，当评估 OSCAR 13 可能的轨道时，当时 AMSAT 工程师能用的计算机没有能力分析微小的发射时间以及起始轨道差异对航天器造成的长期影响。今天我们可以使用更加强大的计算机。同样感谢 James Miller (G3RUH) 和其他人的分析软件开发工作，让 OSCAR 13 的悲剧不会重演。

现在我们已经描述好了卫星在空间中的运动，我们来研究如何把这种运动和地球表面的观察者联系起来。

5. 从地球观察卫星运动

(1) 地球参照系

为了从地球上观察者的视角来描述卫星运动，我们需要建立地球参照系。我们再一次把地球当做球体来简化问题。地球的旋转轴（南北轴）提供了一条特别的穿过地球质心的线，与地球表面相交于两点，称为地理北极和地理南极。任何通过地球质心的平面与地球表面的相交线叫做大圆。构成赤道面的那个大圆，就是那个包含质心还垂直于南北轴的那个平面与地球表面的相交线，叫做赤道。包含南北轴平面的大圆集合也很有意思。每一个都被分为两个子午线（半圆），连接南北极。

地球表面上的点由两个角坐标表示，纬度和经度。

纬度：对于地球表面上给定的任意一点，纬度由以下方法确定：（1）画一条线连接这一

点和地球质心，(2) 从这一点向南北轴做垂线，(3) 测量形成的角。一个等效但更加口语化的对纬度的描述是这点与地球质心连线与赤道面的交角。为避免歧义，纬度上加上 N 和 S 来区分这一点位于北半球还是南半球。其一给定纬度的点的集合处在一个与南北轴垂直的面上。尽管这些纬度线能在地球表面形成圆，但它们不是大圆。赤道（纬度为 0）是唯一一个大圆，因为赤道面经过地球质心。大圆的重要性将会在我们等会研究球面三角学的时候显现出来。地球的更好的模型在定义纬度的时候要考虑赤道区的隆起和其他的不对称。这会牵涉到大地测量纬度，地心纬度和天文纬度的不同。这些细小的改进我们不讨论。

经度：在一个给定子午线上所有的点拥有同一经度。为了指定经度需要一个参考点或者是“本初”子午线（英国皇家格林尼治天文台原址）。一个给定点的经度即为从地心连出到 (1) 赤道与本初子午线的交点和 (2) 给定点所属子午线与赤道交点两点的夹角。为方便起见，经度有后缀，E 或 W，来表示这个测量角在本初子午线的东边或西边。

(2) 轨道倾角

地球围绕南北轴自转，围绕太阳公转。以固定的行星做参照，赤道面和近似的卫星轨道面的方向是固定的。两个平面的交线称为轨道交线，它连接升交点和降交点。这两个平面的相对方位对于卫星用户来说很重要。它部分地用轨道倾角来表示。轨道倾角， i ，是地球质心到北极的连线与经过地球质心的轨道面垂线夹角（为避免歧义，半条线的方向按卫星运动方向使用右手螺旋定则）。

轨道倾角可以从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。对于一阶运算来说，我们前面谈到的简化模型扰动不会造成轨道倾角变化，但是高阶运算会得出一个平均值大小的震荡。我们对接下来三种情况作一个简单分析。当轨道倾角为 0° 时，卫星与赤道同方向运转。当轨道倾角非零时，卫星在轨道上通过赤道两次，一次向北一次向南。当轨道倾角为 90° 时，卫星将在轨道上经过南北极。

轨道有时也分为极地轨道（近极地轨道），即轨道倾角为 90° （接近 90° ）或赤道轨道（近赤道轨道），即轨道倾角为 0° （接近 0° 或 180° ）。卫星地面投影能到达的最大南北纬度（ $\Phi_{\max}$ ）为 (1) 当轨道倾角介于 0° 到 90° 时为轨道倾角，(2) 当轨道倾角介于 $90^\circ \sim 180^\circ$ 时为 180° 减轨道倾角。

(3) 近地点幅角

轨道交线（地球质心与升交点线段）和椭圆长轴（地球质心和近地点线段）夹角被称为近地点幅角。在卫星运动的简化二体模型上，近地点幅角是常数。但在实际上，它随时间变化，主要由于地球的赤道区隆起。运动（变化）速率由如下式给定：

$$w = 4.97 \left(\frac{R_{eq}}{a} \right)^{3.5} \frac{(5 \cos^2 i - 1)}{(1 - e^2)^2} \quad (\text{方程 13a})$$

这里

w = 近地点幅角每天的变化率

R_{eq} = 与 a 相同单位的地球赤道平均半径

a = 半长轴

i = 轨道倾角

e = 离心率

注意式子 $(5 \cos^2 i - 1)$ ，不管 a 和 e 为何值，当 $i=63.4^\circ$ 时近地点幅角为常数。当 $i < 63.4^\circ$ 或者 $i > 116.6^\circ$ 时近地点与卫星同向旋转，当 $63.4^\circ < i < 116.6^\circ$ 时反向旋转。

用 w_0 来表示 w 在特定时间的值。未来 w 的值可以通过下式求得：

$$w(t) = w^\circ + \omega t \quad (\text{方程 13b})$$

t 是经过时间，以天计。

(4) 交点和近点周期

我们研究过赤道区隆起对近地点幅角的影响后，我们介绍一个新的名词，交点周期，指卫星从升交点到下一个升交点所花费的时间。我们之前讨论的是近点周期（从近地点到近地点）。在技术文献里，如果上下文意思足够清楚，形容词“交点”和“近点”往往会省略。在附录的方程里，我们会明确指出交点周期。而周期则是指近点周期。

(5) 太阳时和恒星时

生活在地球上的我们很自然的会用太阳来计时。所以我们说每天地球绕南北轴完整旋转一圈，实际是指一个太阳日。一个太阳时被武断地分为精确的 24 小时 (1 440min)。

地球精确旋转 360° 的时间被称作恒星日，当单独使用“天”单位时，指太阳日。比如说，NASA 发射的轨道飞行器用圈每天来表示平均速度，这里的天是指 1 440min 的太阳日。

(6) 进动：圆形轨道

尽管二体模型预测轨道平面将保持静止，我们已经发现赤道区隆起会造成影响，轨道平面会围绕地球南北轴进动。

$$\Omega = -9.95 \left(\frac{R_{eq}}{r} \right)^{3.5} \cos i \quad (\text{方程 14})$$

(仅适用于地球圆形轨道)

Ω = 轨道平面进动率，单位 $^\circ$ / 天

R_{eq} = 平均地球赤道半径 = 6 378km

R = 卫星至地球质心距离，与单位 R_{eq} 相同

i = 轨道倾角

(7) 太阳同步轨道

通过选择卫星高度和轨道倾角，我们可以在一个可观的范围内调整 Ω 。一个每年进动非常接近 360° 的地轨道被称为太阳同步轨道。这种轨道基本上可以每天在同一时间经过地球的同一个位置，让通信和各种数据采集变得方便。它们可以为太阳能电池板提供几乎连续的太阳光照，也为卫星航拍提供了良好的太阳角度。基于以上几种原因，轨道会被精心设计成太阳同步形。

为实现每年进动 360° ，我们需要每天进动 0.986° ($360^\circ / 365.25$ 天)。把这个数字代入方程 14 求解 i 我们将获得

$$i^* = \arccos \left[-(0.09910) \left(\frac{r}{6378} \right)^{3.5} \right] \quad (\text{方程 15})$$

这里 i^* 表示为获得太阳同步轨道所需的轨道倾角。在这种形式下，我们把 r 的值代入并计算倾角就可以获得太阳同步轨道。做出方程 15 的图像，我们可以看到低轨道太阳同步卫星是接近极地的。你会发现为实现太阳同步所需的每天 0.986° 的进动量会导致卫星在每个太阳日中旋转超过地球的 360° 。这不是巧合，进动量是为这个目的精心选择的。

6. 进动：椭圆轨道

椭圆轨道围绕地球南北轴的进动由下式给出

$$\dot{\Omega} = -9.95 \left(\frac{R_{eq}}{a} \right)^{3.5} \frac{\cos(i)}{(1-e^2)^2} \quad (\text{方程 16})$$

当 $a = r$, $e = 0$ 时（就是说椭圆轨道成为圆型轨道），方程 16 简化为方程 14。

(1) 经度增量

现在我们知道卫星如何在轨道面中运动，以及轨道面的方向如何随时间改变。我们下一个目的是把这些信息和经度增量结合起来。经度增量 (I) 或简单来说增量，被定义为经度在两个连续升交点之间的改变量。用数学来表示就是：

$$I = \lambda_{n+1} - \lambda_n \quad (\text{方程 17})$$

这里 λ_{n+1} 是指格林威治东边 $[\circ \text{ E}]$ 任何一个升交点的经度值， λ_n 是指上一个升交点用 $^\circ$ 计量的经度值。 I 的单位是东向度 / 每圈 $[\circ \text{ E/rev}]$ 。

有两种方式可以获得进动量：通过长时间的观察结果做平均，或者从理论上通过一个模型来计算它。尽管最好的数据是通过实验获得的，计算也是需要的；我们需要在航天器发射前就需要 I 的值，以及在入轨最初几周或几个月还没有累计足够长时间的数据时也需要

要计算。

接下来的计算需要使用方程 16 中定义的符号规约。但在方便的时候，最终结果也可以简单的变号来表示为西向度。

如果我们忽略轨道的进动，可以用卫星从升交点到升交点的时间内地球旋转的角度来估算增量。

$$\bar{I} = \left(\frac{T}{1440} \right) (-360.98563^\circ E) \quad (\text{方程 18a})$$

$$\bar{I} = -(0.250684^\circ E)T \quad (\text{方程 18b})$$

周期 T 必须以分钟计，负号表示之后的每个交点都会更加向西， 360.98563° 是在一个太阳日（1440min）里地球绕轴旋转的角度。从方程 18b 中我们可以看到我们可以计算 $T/4$ 并把结果表示为西向度每圈来简单地快速估计 I 。

方程 18 所提供的轨道增量可以通过考虑轨道面进动（方程 14 或 16）对于地球视在转动在一个太阳日内的影响加以改进。结果由方程 19 给出。

$$\bar{I} = (T/1440)(-360.98563 + \dot{\Omega}) \quad (\text{方程 19})$$

一旦增量已知，我们就可以计算任何升交点的经度 λ_m 。 λ_n 是任何一个其他升交点的经度。轨道参考数 m 和 n ，可以是标准的从发射后第一条轨道开始计，也可以用任何方便的序列。

$$\lambda_m = \lambda_n + (m-n)I \quad (\text{方程 20})$$

这个方程在时间上向前向后算皆可。当预测未来的轨道时， $m > n$ 。方程 20 要用正确的东西经，范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，必要时要加减 360° 来调整。

(2) 地面轨迹

为研究地面轨迹，我们需要（1）研究轨道面与地球表面的交线几何性质。（2）考虑卫星在轨道上的运动。（3）考虑地球的旋转。解决这种复杂问题最好的方法是使用称作向量的数学概念。所有关于轨道力学的高级教材都使用这种方法。但是许多简单的问题可以使用球面三角学。如果你有一定的平面三角学基础，球面三角的简介就可以给你提供理解地面轨迹方程是如何推导出来的知识。既然多数读者有三角学知识而不是向量，我们将采用球面三角方法。

后面是对于球面三角学的深入介绍。圆形轨道的结果之后会有总结和归纳。（那些只需要地面轨迹方程来编程的读者可以跳过球面三角学和其派生部分，直接跳到总结）之后我们将推导并总结椭圆轨道的地面轨迹方程。

7. 球面三角学基础

一个画在球面上的三角形仅当三条边都为大圆的弧时才被称为球面三角形。大圆是指通过球心的平面与球表面的交线。地球的赤道是一个大圆，其他纬线不是；卫星轨道面与静止

(不旋转)地球的表面交线是大圆;地面站周围画的范围圆不是大圆。

球面三角学研究的是球面三角形边与角的关系。球面三角学的标记法与平面三角学很相似。表面角和定点用大写字母 A , B 和 C 标示,每个角的对边用相应的小写字母标示。注意每边的弧长与连接顶点与球心形成的圆心角成正比。举个例子,边 b 与 $\angle AOC$ 成正比。比例系数为球的半径,但因为它抵消了我们感兴趣的计算,边的长度也往往用它的角度来表示。

球面三角形中边角关系的规则与平面三角不同。在球面三角学中,三角形内角和往往不是 180° ,斜边的平方也往往不等于直角边的平方和。

一个有至少一个 90° 角的球面三角形叫做直角球面三角形。

回忆一下在平面三角学中直角三角形的规则比其他不规则三角形要简单。在球面三角形中情况也类似:直角球面三角形的规则比一般球面三角形要简单。幸运的是,我们将要处理的球面三角形至少有一个直角,我们只需要考虑直角球面三角形的定律。

新手第一次应用球面三角学时往往会遇到两个陷阱。第一个是角度弧度陷阱,原因是忽视对于一个给定的方程或计算机要对角使用合适的单位,例如,注意角 $\theta = 30^\circ = \pi/6$ 弧度。先考虑与计算机相关的方面。为了在大多数简易科学计算器上计算 $\sin(\theta)$,你必须输入“30”,因为计算器在你不做其他指定的时候认为 θ 是角度制。为在计算机上用 BASIC 计算 $\sin(\theta)$,你必须输入 $\pi/6$ (或 0.523 60),因为 BASIC 语言认为 θ 是弧度制。在某些情况下,尤其是当 θ 不是三角函数的自变量时,方程的形式决定了 θ 必须是角度制还是弧度制。考虑一个北纬 30° 的无线电台站试图用方程 $S=R\theta$ 来求它沿子午线到赤道的表面距离。方程只能带入弧度制,所以应该用 $\pi/6$ 。

第二个陷阱是球面三角学的新手会把纬线当作球面三角形的一条边。唯一一条能这么做的纬线是赤道。所有其他纬线都不能用,因为它们不是大圆的弧。

8. 圆形轨道: 推导

推导圆形轨道的地面轨迹最重要的一步是画一张清晰的图。我们的目的是计算当航天器从最近一个升交点经过 t 分钟抵达 S 点时星下点(SSP)的经纬度—— Φ_s 和 λ_s 。我们假设周期 T , 轨道倾角 i 和升交点经度 λ_0 是已知的。

因为沿真实地面轨道的弧 AS 并不是大圆的一部分,我们首先考虑静止地球的情况(不绕南北轴旋转)。在这样的地球上,在经过升交点 t 分钟后星下点为 B 。 $\triangle ABC$ 为直角球面三角形。角 A 为 $180^\circ - i$, 弧 AB (球面三角边 c) 是环形轨道的一部分。

$$c = 2\pi \frac{t}{T} \quad (\text{参照方程 9})$$

基于定义,点 B 的纬度与 a 相同。

求解点 B 纬度的问题,用 i 、 t 和 T 表示 Φ_B , 与用 A 和 c 表示 a 是同样的问题。

$$a = \arcsin[\sin(c)\sin(A)]$$

用变量 Φ_B 、 T 、 i 和 t 来代换，我们得到

$$\Phi_B = \arcsin \left[\sin \left(2\pi \frac{t}{T} \right) \sin 180^\circ - i \right]$$

应用正弦函数的对称性，可以化简为：

$$\Phi_B = \arcsin [\sin(2\pi t/T) \sin(i)] \quad (\text{不旋转的地球})$$

如果我们想用以角度表示的 c 来参与运算，我们需要替换

$$2\pi \frac{t}{T} \quad 360^\circ \frac{t}{T}$$

为求解 B 的经度—— λ_B ，我们注意到 $b = \lambda_o - \lambda_B$ 。所以我们用 Φ_B 、 t 和 T 求解 λ_B 的问题等效于用 a 和 c 表示 b 。

$$b = \arccos \left[\frac{\cos(c)}{\cos(a)} \right]$$

做合适的替换，方程表达为：

$$\lambda_o - \lambda_B = \arccos \left[\frac{\cos \left(\frac{2\pi}{t} \right)}{\cos(\Phi_B)} \right] \quad (\text{不旋转的地球})$$

地球旋转的效应是把星下点由 B 移动到 S 。纬度保持一致 ($\Phi_s = \Phi_B$)，只有经度变化。经度改变量仅简单取决于在时间 t 内地球的角旋转量。对于第一次近似，地球的旋转速率为每 $\text{min} 0.25^\circ$ ，所以如果我们以 min 测量 t ， $\lambda_s = \lambda_B - t/4$ 。对于长期预测来说应该使用更准确的值（我们讨论经度进动时讨论的那个）。这个值是每 $\text{min} 0.25068^\circ$ （参见方程 18b）。

更准确的推导应该考虑几个其他情况：卫星在南半球， $0^\circ \sim 90^\circ$ 的轨道倾角，向南飞行的航天器等。方法是类似的，我们将在下一节总结结果。

9. 圆形轨道：总结

星下点的纬度：

$$\Phi(t) = \arcsin \left[\sin(i) \sin 360^\circ \frac{t}{T} \right] \quad (\text{方程 21})$$

注意：“ $\Phi(t)$ ”应该读为“纬度对时间的函数”；它不是指 Φ 乘以 t 。

星下点的经度：

$$\lambda(t) = \lambda_o - (0.250684)T + (s1)(s2) \arccos \left\{ \cos \left(360^\circ \frac{t}{T} \right) / \cos[\Phi(t)] \right\} \quad (\text{方程 22})$$

$$s1 = \begin{cases} +1 & \text{当 } 0^\circ \leq i \leq 90^\circ \\ -1 & \text{当 } 90^\circ < i \leq 180^\circ \end{cases}$$

$$s2 = \begin{cases} +1 & \text{当 } \Phi(t) \geq 0^\circ (\text{北半球}) \\ -1 & \text{当 } \Phi(t) < 0^\circ (\text{南半球}) \end{cases}$$

符号惯例

纬度

北纬：正

南纬：负

所有的角以角度记，时间以分钟记

i = 轨道倾角

T = 周期

t = 从最近升交点起经过的时间

λ_0 = 最近升交点的经度

经度

东经：正

西经：负

请注意东西经的符号惯例。美国业余无线电爱好者使用的大多数地图用西经标注，这等效于把西经称为正。因为用右手坐标系可以带来很大的计算方便，所以绝大多数数学和物理书籍都以东为正，我们的计算遵循这一习惯。计算完成以后再把经度重标为西经是很简单的。这本书里的所有以用户为中心的数据都这样处理过。

方程 22 仅能被用于单圈轨道。在每圈结束后，应该用经度进动来重新计算升交点经度，然后再使用方程 22。

方程 21 和方程 22 可以在任何时间 t 求解，如果 i 、 I_0 和 T 已知，换句话说，为确定圆形轨道的星下点位置需要 4 个参数，我们使用的 4 个被称为“经典轨道要素”。他们被选中的原因是每一个都有清楚的物理意义。也有其他几组轨道要素可以使用。

10. 椭圆轨道：推导

我们已经研究过圆形轨道的地面轨迹方程的推导过程，接下来来看看椭圆轨道所需的额外的参数和步骤。

我们假设以下几个参数是已知的： T (周期：min)， i (轨道倾角：°)， λ_p (近地点星下点经度)， w (近地点幅角) 以及 e (离心率)。我们的目标是对任何时间 t 求解星下点经纬度 $\Phi(t)$ 和 $\lambda(t)$ 。我们从近地点开始测量时间。

实际的地面轨迹不是大圆，所以我们的策略又一次选定在静止地球模型上来应用球面三角学原理。之后按照地球的旋转调整结果。

步骤 1：我们在这里的目标是把我们的那些与近地点有关的参数和升交点建立联系。更明

确的说, 我们想计算 (1) 卫星从 D 点到 P 点经过的时间, (2) 近地点纬度, (3) 升交点经度。

(1) 考虑静态地球模型, 把注意力集中在三角形 CPD 上。弧 PD 从定义上来说等于近地点幅角—— w 。应用开普勒方程 (方程 10 和 11), 我们可以把 w 的值代入 θ 来计算从近地点到升交点所需时间, 称为 t_p 。

(2) 按照定义, 近地点纬度为弧 PC 长度。 $\angle PDC$ 等于 $180^\circ - i$ 。已知 $\angle PDC$ 和弧 PD , 我们可以用纳皮尔圆部法则 2 来求解弧 PC 。

$$\Phi_p = \arcsin[\sin(i)\sin(w)]$$

(3) 为求点 D 的经度, 我们再次使用纳皮尔圆部法则 2。

$$\dot{\lambda}_o = \lambda_p + \arccos\left[\frac{\cos(w)}{\cos(\Phi_p)}\right]$$

(4) 升交点的实际经度的求法是计算在卫星从升交点到近地点过程中地球的旋转量, 再把这个增量加到静态地球的结果中。为简化之后的方程, 我们把地球的自转近似为每 $\text{min}0.25^\circ$ 。

$$\lambda_o = \lambda_p + \arccos\left[\frac{\cos(w)}{\cos(\Phi_p)}\right] + \left|\frac{t_p}{4}\right|$$

步骤 2: 我们现在研究在任意时间, S 的星下点位置, 无论在近地点之前或之后。我们又一次从静态地球模型开始来探索点 B 的经纬度。为此需要使用球面三角 BDE 。

(1) 为强调 θ 随时间的改变, 我们把这一部分写为 $(\theta(t) + w)$ 。使用纳皮尔圆部法则 2 我们可以获得点 B 的纬度, 也就是 S 星下点的真实纬度。

$$\phi(t) = \arcsin\{\sin(i)\sin[\Phi(t) + w]\} \quad (\text{方程 23})$$

(2) 再次应用纳皮尔圆部法则 2, 我们获得点 B 的经度。

$$\dot{\lambda}(t) = \dot{\lambda}_o + \arccos\left[\frac{\cos[\theta(t) + w]}{\cos[\theta(t)]}\right]$$

(3) 最后, 按地球旋转做校正, 我们可以获得 S 星下点的真实经度。

$$\lambda(t) = \dot{\lambda}_o + \arccos\left[\frac{\cos[\theta(t) + w]}{\cos[\theta(t)]}\right] - \frac{t}{4} - \frac{t_p}{4} \quad (\text{方程 24})$$

方程 24 仅仅给出了当航天器在北半球, $\theta > W$ 而且都小于 90° 时的正确解。

11. 赤经赤纬坐标系

我们已经讨论了所有经典轨道元素, 除了赤经。天文学家和卫星研究人员的计算最好是用惯性坐标系 (用遥远的恒星来确定固定的方向)。赤经、赤纬坐标系就是用于这个用途。

这种系统中心的位置不重要，为方便起见我们取地球质心。我们想象一个无穷直径的球体，叫做天球，包围着地球，当地球的赤道面向四方扩展时，它成为天球的赤道。当地球的南北轴延伸时，它成为天球的极轴。为在赤经赤纬坐标系中定位一个点，我们需要一组三个垂直轴，向北延伸的极轴是一个，其他两个在赤道面上。我们让其中的一个与春分日太阳中心指向地球质心方向平行。物体在空间中的位置由两个角表示，称作赤经和赤纬，或者有需要的时候，离地球距离。

这种坐标系用来跟踪卫星轨道面的方向是很方便的，因为轨道面围绕天球极轴缓慢转动。令 Ω_0 (在特定时间) 为天球赤道上夹 (1) 从地球质心到春分点连线，(2) 地球质心到卫星轨道平面升交点连线的角。这个角即为历时的升交点赤经 (RAAN)。在 Ω_0 已知时，我们能利用一下方程求解未来任何时间的升交点赤经：

$$\Omega(t) = \dot{\Omega}_0 + \Omega_0 \quad (\text{方程 25})$$

使用适当的赤经赤纬坐标系，我们可以把跟踪 (1) 交点连线方向，(2) 地面观察者位置这二者轨迹的问题区分开，就因为地球绕本身的极轴自转，绕太阳公转。在任何时候这两个信息都可以用航天器在轨道平面中的位置联合起来给出星下点经度。

12. Bahn 经纬度

卫星在轨道面里的朝向由两个角，Bahn 纬度和 Bahn 经度。Bahn 纬度指航天器 +Z 轴与轨道平面交角。假设我们按这个角旋转航天器，Z 轴就会在轨道面上，再转一个角，+Z 轴就会与地心到远地点连线重合。第二个角是 Bahn 经度。

赤纬：把一条线旋转为一个面，本质上是纬度。赤经：在一个面上旋转，本质上是经度。

13. 轨道要素

用来描述卫星，火箭，行星或其他天体的位置和运动的参数称作轨道要素。为担当轨道要素，有许多参数可供选择。最终决定取决于要解决问题的特性，已知的信息和使用的坐标系。如果我们关心没有推进器也不受大气阻力的卫星，我们发现需要一组 6 个参数来确定在特定时间 (历时) 航天器的位置以及来精确预测未来的位置 (基本卫星跟踪问题)。

从计算的角度上看，在惯性直角坐标系里，需要 6 个要素，3 个位置坐标和 3 个速度分量。这组要素的一个缺点是不能提供任何简明扼要的信息说明轨道是怎样的。相反，近地点幅角，平均运动 (或半长轴)，升交点赤经和从上个近地点经过时间就对直接观察轨道很有帮助。

爱好者用在跟踪问题上的轨道要素往往是传统组合的变种。在很多情况下，来源 (或者是程序需要) 往往能对特定历时提供多于 6 个参数。许多程序需要超过 6 个参数是因为他们

不仅仅局限于解决基础问题。举个例子，他们会考虑阻力影响，或者考虑卫星在轨道面的朝向来确定倾角。有些数据来源提供冗余数据是考虑到有的跟踪程序要平均运动而有的要半长轴。在任何情况下，一组轨道要素在同一时间至少需要 6 个参数。

14. 扁圆的地球

在我们第一个近似里，把地球当作平均半径 6 371km 的球体是合理的。基于球体地球的卫星运动模型将预测卫星轨道面的方向（赤经和轨道倾角）将会保持固定，而且卫星轨道面的近地点（近地点幅角）也不会改变。这种模型对于单圈轨道还尚可接受，但做长期预测就不适合。

为了把近地点改变量（方程 13）和交点连线的运动（方程 16）这些重要因素纳入方程中，需要建立更复杂的模型。下一步扩展复杂性的方式是使用椭圆体模型（绕极轴旋转椭圆）。更高阶模型是可能的，但是基于椭圆的扁圆地球模型的结果已经很好了。椭圆的半长轴为赤道半径：6 378km，半短轴是极半径：6 357km，地球的离心率为 0.081 82。

扁圆地球模型有两种方式参与运算。首先，它影响卫星在空间中的运动。我们用方程 13 和方程 16 来计算这些影响。再者，它影响到与地球表面地面站位置相关的计算，比如天线朝向参数和距离。如果比较球体地球模型和扁圆地球模型所预测出的天线朝向（方位角和仰角），误差仅在几分之一度，这点量对于任何业余天线都测不出来。使用扁圆模型确实会使问题变复杂，比如要区分地心纬度，大地测量纬度和天文纬度。

一个设计跟踪程序的合理方式是用方程 13 和方程 16 来考虑扁圆地球的影响，但在计算范围和天线朝向时把地球当做球面。这可以满足 99.9% 的爱好者需求。但是，为了计算把 Phase 3 卫星用火箭从转移轨道送入工作轨道的重要轨道决定参数时，最好用尽可能精确的模型。因为主要的早期跟踪程序都特别为轨道转移过程设计，他们在所有步骤中都使用椭球地球模型。这种改进在今天发行的大多数程序里都有。

15. 特殊轨道

至少我们有 4 个可变的参数——离心率、轨道倾角、半长轴和近地点幅角——从很多可能的方式中来分类轨道。我们已经花了很多心思来研究轨道倾角接近 90° 的低高度地球轨道。我们也讨论过太阳同步轨道的特别属性。在这一部分里，我们主要研究另外两种无线电爱好者感兴趣的轨道。

16. 对地静止轨道

以零轨道倾角发射的卫星将一直停留在赤道上空。如果卫星在圆轨道（恒定速度），由

西向东,停留在精心选择的高度(35 800km),它的角速度将与地球绕轴自转的角速度相等(周期 = 24 小时)。结果是地面上的观察者会发现这颗卫星静止地悬挂在空中。这种轨道卫星被称为地球静止轨道卫星。

地球静止轨道有几个特性使它成为接近完美的通信卫星轨道。最主要的,卫星链路的多普勒频移不存在,地面站可以不考虑星历和跟踪。但也有一些需要注意的问题,比如有太多航天器处在赤道之上地球静止轨道上,停泊位置很紧张。从爱好者无线电的角度来看,地球静止卫星也不是没有问题。一个最大的缺点是一个单一的航天器只能覆盖到稍少于一半地球的范围。有时候地球静止卫星对于高纬度地区的东西方向通信效果很差。把莫尔尼亚(Molniya)轨道(下一节提及)作为比较标准,这种结论是对的。

如果轨道倾角不为零,航天器就不能显得静止;静止卫星只能放置在赤道上。一个周期为 24 小时轨道倾角不为零轨道的地面轨迹将是一个对称的 8 字形。注意这种轨道的升降交点是一致的,升交点经度是常数(增长量接近于 0)。24 小时轨道也被称为同步轨道。地球静止轨道是一种特殊的同步轨道,有为零的轨道倾角。

请注意有些作者会把同步(或地球同步)一词用于其他类型轨道,有恰好 24 小时因数的椭圆或圆形轨道,诸如 8 小时或 12 小时。因为这可能会导致不必要的混淆,我们避免这样使用同步一词。

莫尔尼亚(Molniya)型轨道

回过去看椭圆轨道,我们注意到环形轨道的近地点位置(近地点幅角)按方程 13 的速率每天变化。这个式子一个有趣的现象是当 $i = 63.4^\circ$ 时,近地点幅角将为常量,与周期和离心率无关。因此导致近地点幅角,周期和离心率可以为满足其他任务需求而独立选择。

$i = 63.4^\circ$,离心率在 0.6 ~ 0.7 之间,周期在 8 ~ 12 小时之间的轨道有一些使它们适合做通信卫星的性质。前苏联莫尔尼亚系列航天器的设计就利用了这种轨道的优势。

让我们简要回顾一下这种曾经用于莫斯科—华盛顿热线的 Molniya II 型卫星(这条热线使用多余的莫尔尼亚和国际通信卫星链路)。航天器轨道维持在轨道倾角 63.4° ,近地点幅角维持在 270° ,周期 12 小时。因为周期为 12 小时,地面轨道每天重复(尽管有升交点经度的缓慢漂移)。远地点,总在北纬 63.4° 缓慢运动。在远地点处,接近半个地球(大多数在北半球)都在视野内。华盛顿和莫斯科主要的链路窗口期能持续 8 ~ 9 小时。一个单独的航天器每天能连接华盛顿站 16 小时。能同时连接两站 12 小时。因此,三颗莫尔尼亚卫星系统可以为华盛顿和莫斯科提供可靠的 24 小时连接。

从业余无线电爱好者的角度来看,莫尔尼亚型轨道有不少吸引人的特性。航天器 Phase III 的轨道就是基于莫尼亚型轨道的变种。

对于这种特定的轨道有很多的讨论。有些爱好者倾向于 $i = 63.4^\circ$ 的轨道。在这个轨道倾角下,轨道的远地点可以连续的取在希望的北半球上。其他爱好者倾向于其他值的倾角,因

为近地点幅角的缓慢变化可以让使用者能和世界上更大部分的地区通信。考虑 Phase III 系统的长期效应，这种卫星可以在发射后六七年由于远地点漂移过赤道而照顾到南半球。之后会再有一颗新的卫星来接管北半球。

同时，航天器设计工程师必须考虑高倾角所需的推力和在一年里太阳照射航天器的倾角等因素。太阳角对航天器可用的发射功率影响很大。

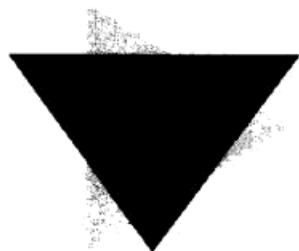
当我们和地球静止轨道比较时，莫尔尼亚型轨道有几个优点，我们已经讨论过。还有几个缺点。

大多数缺点都不严重，一个需要注意的是天线需要对准和多普勒频移，但比低轨道卫星问题小。

一个主要的问题是 AMSAT 的工程师要面对的。莫尔尼亚型轨道卫星每圈将两次穿越范艾伦辐射带。这对许多携带的电子部件提出要求，特别是与中央计算机有关的部分，可能会被高能粒子损坏。因此需要额外的护罩来保护计算机芯片，但是这种护罩会增加重量，限制进入需要的轨道。

这种妥协影响很大，所以 AMSAT 为了研究辐射对 OSCAR 10 使用的 RCACMOS 集成电路进行了特别的研究。准备发射的这种类型的芯片将被暴露在模拟的宇宙环境中接受辐射。在 Argonne 和 Brookhaven 国家实验室进行的失效率研究测试了不同剂量的辐射和不同的护罩。研究的数据被用在 OSCAR 10 的设计上。考虑各种可能的选择，工程师能够把航天器上计算机的设计寿命设计成 3 ~ 5 年以上。当 OSCAR 13 建造完成后，集成电路有比实际的辐射量更强的耐性。考虑辐射伤害，OSCAR 13 有接近一个世纪的预期寿命。





附录 B

其他卫星分系统：结构、环境、能源、姿态、推进和控制

Martin Davidoff(K2UBC) 博士著 孙德庆 译

1. 结构

在航天器结构分系统里，框架把各个部分连结为一体，起到诸如天线，太阳能电池和内部电子模块的物理支撑作用；在发射过程和太空中保护其他分系统；对卫星内部起到热传导；连接运载火箭等。结构设计（尺寸、形状和材料）是受运载火箭的限制，受航天器的任务，受轨道和姿态稳定系统影响的。OSCAR 6、7 和 8 重量为 18 ~ 30kg。早期更大的装备了推进器或液体燃料发动机的 Phase III 航天器发射重量为 90 ~ 125kg。MicroSAT 系列航天器质量大约在 10kg，被装在边长大约 23cm 的正方体盒内。

在观察卫星时结构最显著的特性是那些适配器。它们连接卫星与运载火箭，用于各种无线电通信的天线，太阳能电池，为保障航天器热平衡的热辐射覆层，还有 Phase III 的远地点推进器喷嘴。AMSAT 的卫星尽可能地使用铝板焊接结构来减小加工复杂度。

MicroSAT 的结构很特别。它由 5 个模块（盘）叠在一起，用不锈钢螺钉紧固。参见图 B1。每一层框架约为 210mm×210mm×40mm。5mm 厚的铝制侧面板外侧装有太阳能电池。整个结构为 230mm×230mm×213mm 的长方体。这种盘式结构异常坚固，不需要额外的框架。

每一层都包含一个电子组件。每个 MicroSAT 都需要的基本模块为：(1) 电池 / 充电控制器，(2) 接收机单元，(3) CPU/RAM，(4) 发射机单元。第五个模块为 TSFR 盘。TSFR 表示“待租空间”。这些 TSFR 盘是预留给那些实验性质的特定任务子系统的。

MicroSAT 先天具有的一个显著特征是，它可以让世界各地的爱好者小组建造未来航天器上携带的 TSFR 盘。它建立的标准结构也极大地简化了那些想自己制造 MicroSAT 并想降低造价的小组的工作量。

OSCAR 40 的设计结构是为了适应 ESA(欧洲空间局)的两项要求。当 ESA 发射两颗大的主用卫星时，一个卫星叠在另一个上面，中间用圆锥形适配器分隔。下面卫星的底部被连在火箭上，上面卫星的底部被连在转接环上再连到下面卫星的顶部。因此转接环必须在整个卫星发射过程中支撑上面的卫星。而上面的卫星最大可达 10 350 磅(4 695kg)重。

AMSAT 曾试图研究让转接环成为 P3 卫星结构框架的一部分。但这种努力并没有得到满意的结果。在与 ESA 的商讨中，AMSAT 建议使用另一种圆柱形专用支撑结构(SBS)来分隔两个主用卫星，而 OSCAR 40 的结构框架能够装在 SBS 里。经过大量的磋商，ESA 同意了这种方法。SBS 的设计，制造和测试是 AMSAT 的一个主要技术成就。

OSCAR 40 的结构框架形状与之前的 Phase III 卫星完全不同。它是 AMSAT 第一个发射后伸出太阳能板的卫星。中央结构是六边形，重 60kg，差不多是 OSCAR 10 和 13 的 10 倍重。包括结构框架和上面装的所有东西、燃料和 SBS 的卫星重 400kg。

2. 环境控制

卫星环境控制子系统的功能是在不同的点上调节温度，阻挡高能粒子并保护机上电子系统免受高频干扰。我们着重于热控制。

卫星的温度取决于流入流出的能量。更确切地说，卫星会把自己的温度调整到流入流出热量相等。尽管我们谈论的是卫星的“温度”，卫星的不同部分温度不同而且时刻在变。

卫星设计师的任务是建立一个环境模型，这个模型需要精确预测在整个卫星服役过程中，每一部分的平均温度和极限温度。这包含了发射前，卫星将在火箭的顶端被热带的酷日炙烤超过一周；发射和入轨，以及在轨阶段。在一年里的某些季节，卫星可能几个月都不会进入阴影（地球经过太阳和卫星之间，在其他的季节里可能一天要好几小时在阴影里）。因为这不是太热就是太冷的温度极限，可能会导致电池或电子或机械分系统的永久损坏，热设计必须让敏感元件的温度时刻处在界限内。

一旦卫星进入真空，热传递只能依靠辐射和传导；无需考虑对流。Phase IIIA 卫星的完整能量平衡模型把卫星分为 121 个子单元的集合，每个通过传导和辐射连接与几个其他子单元相连。为从数学上解能量平衡方程，设计师需要处理 121 个相关的非线性方程，每个有三四个变量。这不是纸笔能解决的，需要一个大型计算机。就算使用精密计算机模型，想达到 $\pm 10K$ 的精度也很难；商业卫星制造商往往诉求于制造一个等比例模型放在空间模拟器里测试热平衡。Phase

IIIA 的热设计问题是由 Dick Jansson(KD1K), 用 Martin Marietta 公司捐赠的计算机处理的。

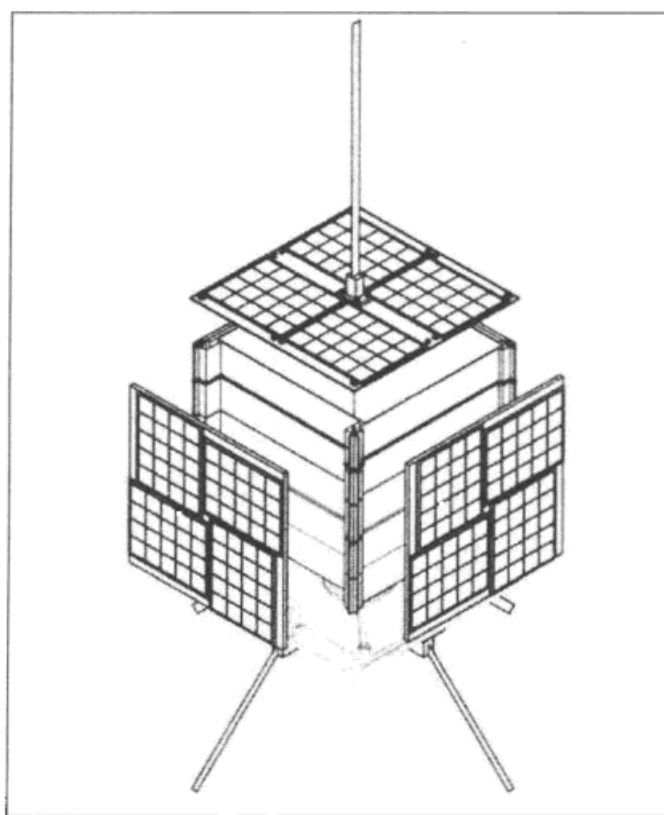


图 B1 MicroSat 结构

Dick 也参与了 OSCAR 40 的设计。这次使用了一台强力个人计算机来处理一个 450 个节点（温度点）和 3750 条热连线的模型。

较早的 OSCAR 在热设计上使用了一个更简单更不精确的方法，结果也说得过去。因为这个简单方法的细节是热设计方法很好的介绍，我们把它当作例子。

热设计：一个简单的例子

太阳是卫星能量输入的唯一来源。数量上我们可以写为：

$$P_{in} = P_o \cdot A \cdot \alpha \beta \quad (\text{方程 26})$$

这里

P_{in} = 卫星的能量输入

P_o = 太阳常数 = 距太阳 $1.49 \times 10^{11} \text{m}$ (地日距离) 在每单位表面积 (与辐射方向垂直) 每时间单位的入射能

$$P_o = 1380 \text{W/m}^2$$

$\langle A \rangle$ = 卫星对太阳辐射的有效接收面

α = 吸收率 (在一个完整轨道上卫星能接收阳光的比率)

β = 日食因子 (在一个完整轨道上卫星能接收阳光的比率)

卫星的功率输出包括在温度 T 下的黑体辐射和无线电发射。由于黑体辐射远强于无线电发射, 我们可以忽略后者。

$$P_{\text{out}} = A\sigma eT^4 \quad (\text{方程 27})$$

这里

P_{out} = 卫星的能量辐射

A = 卫星的表面积

σ = 斯蒂芬-玻耳兹曼常数 = $\frac{5.67 \times 10^{-8} \text{ J}}{\text{K}^4 \text{ m}^2 \text{ s}}$

e = 卫星表面的平均发射率因子

T = 温度 (K)

在均衡时, 辐射输入输出必须平衡,

$P_{\text{in}} = P_{\text{out}}$ 或

$$P_0 \langle A \rangle \alpha \beta = A \sigma e T^4 \quad (\text{能量平衡等式}) \quad (\text{方程 28})$$

求解温度, 我们获得

$$T = (P_0 \langle A \rangle \alpha \beta / A \sigma e)^{1/4}$$

$$T = \left(\frac{P_0 \alpha \beta \langle A \rangle}{\sigma e A} \right)^{1/4}$$

几个参数的合理平均值是 $\alpha = 0.8$, $\beta = 0.8$, $e = 0.5$ 。对于 AMSAT-OSCAR 7, $A = 7770 \text{ cm}^2$ 且 $\langle A \rangle = 1870 \text{ cm}^2$ 。代入这些值我们得到 $T = 294 \text{ K}$ 。这等于 21°C 。和 OSCAR 7 观察出的均衡温度很接近。经过一年的运转, 由于 β 在 0.8 到 1.0 间变化, OSCAR 7 的温度在 $275 \sim 290 \text{ K}$ 内变化。转发器的末级放大器, 当然更热一些。

为把卫星工作温度调整在目的值有一些被动方法。比如通过粗糙或喷涂的方法调节表面吸收率 (α) 和发射率 (e) 并在设计时把结构件的热传导列入考量。主动方法包括用双金属片控制的百叶窗和天窗, 或者可以由地面站控制的可充放氦气的导热管。在特定情况下 OSCAR 卫星会启用主动温度控制; 在某些情况下一些特别分系统是因为它们对卫星温度的影响而启动的。

热管技术是 OSCAR 40 设计中的重要组件。热管是一条金属制成的长而细的真空管, 充入部分液体 (形成毛细作用)。液体在热端气化, 蒸汽流过热管的中空芯并在冷端凝结。液体通过毛细作用经过芯材循环回热端。一个设计良好的热管可以比相同重量的最好导热材料多传导几倍的热量。这个过程不需要能量而且可以在失重下工作。

OSCAR 40 包含 4 条用无水氨作为导热液体的热管。每个在卫星的结构里形成一个六边形环。

3. 能源供应分系统

通信卫星可以被分为有源或无源的。一个无源卫星的例子是一个用导电材料包覆来反射无线电波的大气球 (Echo I, 1960 年 8 月 12 日升空, 充满气直径 30m)。使用无源反射器, 这种卫星不需要任何电子元件或能源。因为这种卫星追求简单, 反射回地球的无线电功率很少, 只有装备转发器的有源卫星 (假设上行信号强度相等并比较 50kg 范围内的相同质量卫星) 发射信号的 1/100 00000 (70dB)。

无源卫星 (装备转发器) 需要能量。供应电力的能源应该可靠, 高效, 廉价而且寿命长。对于高效率我们指可用电能与重量的比例以及可用电能和废热的比例应该高。我们看一下被广泛研究的三种能源: 化学能, 核能和太阳能。

(1) 化学能源

化学能源包括原电池, 蓄电池和燃料电池。早期的卫星像 Sputnik I, Explorer I 和最早几个 OSCAR 使用原电池。当电池用尽, 卫星就宣布作废了。这种类型的卫星往往只有几周的寿命, 尽管使用低功耗发射机 (总共约 70mW) 的 Explorer I 用水银 (Hg) 电池支持了几乎四个月。这些早期的实验性卫星证明了使用卫星通信和科学探索的可行性, 因此推动了长效电源系统的发展。今天, 电池 (这里指蓄电池) 主要用于在卫星上储存电能来缓冲峰值负载并在日食期间为卫星供电, 它们不再使用原电池电源。

早期 OSCAR 任务的电池是有企业捐助或者是来自政府机构在项目完结后留下的备用电池。20 世纪 80 年代早期, AMSAT 意识到需要更稳定的电池来源来支持正在发展中的业余卫星项目。AMSAT 因此启动了一个不断发展的电池资质项目来为未来的任务提供电池。Larry Kayser (VE3PAZ) 调查了“宇航级”电池的规程。他总结出来妥善屏蔽的商业级镍镉电池就很有可能足够可靠。Kayser 和渥太华的一组爱好者买了 6Ah GE 公司的航空镍镉电池, 并对他们进行品质检查。其中包括用 X 光检查内部缺陷, 并用计算机控制的大型充放电循环来详细记录数据。所有不正常的电池, 无论比别的好还是坏, 都被剔除。剩下的电池被配对, 装好并在冰箱里储存以避免劣化。

OSCAR 11 使用这一批里的电池, 它从 1984 年 3 月开始就表现完美。90 年代后期发射的 MicroSAT 和 UoSATs 也用这批电池供电。AMSAT 继续关注新技术, 比如密封镍氢电池, 能量密度大约是镍镉的五倍, 但是费用和可靠性是重要的选择标准, 所以有理由继续使用过去表现良好的可信赖技术。

另一种化学能系统, 燃料电池在相对短期的载人航天任务时能够提供所需的大量能源。

燃料电池看来不适合用在当前的 OSCAR 任务上。

(2) 核能源

一种经过飞行测试的核电源是同位素辐射热电发电机。在这种类型的装置里，放射性同位素的衰变热被热电偶直接转化为电能。一些早期的美国子午仪导航卫星 SNAP 3B 和 SNAP 9A (25W)，使用这种类型的发电机。美国现在不再在地球轨道上使用核动力，但星球大战相关项目的核反应堆研发还在继续，前苏联现在的雷达型海洋监视卫星 (RORSAT) 使用核反应堆。1989 年有 34 个已关闭但仍有放射性的反应堆在地球轨道上。

核能源的功率重量比很高，工作寿命非常长，还能在高辐射环境下工作。但是它们产生废热很多，而且由于燃料因素，每瓦的硬件成本很高（出于安全性的考虑和保险费用，也有很高的成本）。在以下任何一个条件下的任务核电源都是最有用的：太阳强度大幅下降（空间深处），能快速摧毁太阳能电池的辐射环境（范·艾伦辐射带轨道）或需要大量能源。

美国和前苏联遭到很大压力停止在地球轨道上使用核能。最主要的原因是在发射失败或卫星坠入大气层时的核污染危险。核动力卫星一般被放置在低轨道上，打算在有效期结束后推入高轨道。但很多人认为不可接受的是卫星在到达高轨道之前就很可能失效。那三个坠入大气层的核动力卫星就很好的说明了这点，它们不是把放射性材料喷入大气层就是喷到地上 (SNAP-9A [1964]、COSMOS 954 [1978]、COSMOS 1402 [1983])。越来越严重的太空碎片问题也对这种卫星造成很大威胁。另外一个认为核动力卫星不合理的理由是它们造成很严重的伽马射线污染，并会对伽马射线天文学造成很严重的影响。

核动力对于 OSCAR 卫星不存在任何问题。如果前面的事例还不能说服你，那些现实的问题比如保险和设备费用，安全预防措施和操作核原料相关的文书就肯定会说服你，结论显然不是说科学性深空任务不适合使用核动力。前往太阳系外的旅行者号任务没有携带 400W 核能发电机就一定不可能完成。

(3) 太阳能

我们第三种考虑的能源是太阳能。第一个太阳能电池在 1954 年用硅制成，太阳能电池迅速成为卫星的主要电源种类。但是，它们在这些应用上离理想还有很大距离，它们要和天线及热辐射覆层争夺外表面空间。它们的效率随时间下降，尤其是卫星轨道穿过范艾伦辐射带时（高 1600 ~ 8000km）。它们在零下温度效率最高（大多数电子系统在 10℃ 效果最好）。它们需要的卫星方向可能与任务目标相冲突。最后，它们在日食阶段没有输出。

尽管有这些不足，用太阳能电池做电源来发电并用蓄电池储电仍然是长服役时间卫星的最简单解决方案：它们价格不贵；它们产生废热很少，并且功率重量比也还不错。

在地球轨道上一平方米垂直接收太阳辐射的太阳能电池大概能输出 1380W。卫星可用的功率数量是由太阳能电池的效率决定的。在过去的 15 年里，OSCAR 使用的电池效率接近翻倍。最早 MicroSAT 小组使用的硅太阳能电池使用的背表面反射技术使效率超过 15%。在不远的将来，我们可能会用更高效率的砷化镓太阳能电池。1988 年有研究人员报告使用硅和砷化镓的双层电池效率能达到 31%。尽管这只是实验室产品，它们确实说明了太阳能电池技术正在发展。在几年以前，MicroSAT 那么大的卫星不能产生足够的能量来支持一个有用的任务。

一旦卫星被发射，太阳能电池的效率就将因辐射损伤而下降。太阳能电池往往被玻璃面板包覆以降低劣化速度。但这些面板会导致初期效率降低并增加卫星重量。UoSAT E 所负责的一个太阳能电池实验任务就是评估各种新太阳能电池技术在太空环境中的长期表现，进入测试的电池有：砷化镓，磷化铟和新硅设计。这项研究着重于使用不同尺寸面板对长期辐射劣化造成的影响。

(4) 实用能源分系统

典型的 AMSAT 卫星能源系统包括一个能量源，一个储能装置和调节设备（参见图 B2）。能量源包括太阳能电池（未来的任务可能会使用砷化镓或锂电池）、日食（卫星在地球的阴影里）所需的储能单元和可变负载。

AMSAT 卫星上典型的电源调节设备包括一个电池充电调节器（BCR）和至少一个仪器开关电源（ISR）来在电压变化时使用 DC-DC 转换来提供整流和保护。因为电源故障会导致整个卫星失效，所以为保证工作的连续性，BCR 和 ISR 都特别准备了两份来保证冗余，并在内部失效或收到地面指令时自动切换。

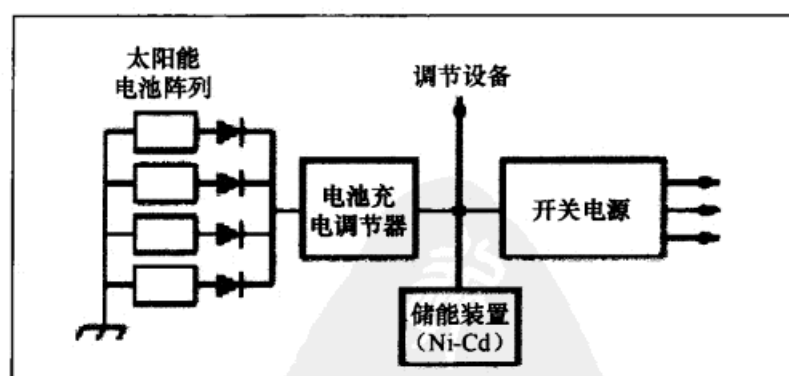


图 B2 卫星能源分系统框图

Phase III 卫星有两套独立电池：储存在低温环境下的一个低容量备份能在除长时间日食之外让系统正常工作；太阳能电池阵由二极管隔离，所以一个阵故障会导致输出能力下降，但不会影响卫星运作。二极管也避免卫星在黑暗中电池通过太阳能电池放电。MicroSAT 所达

到的可靠性还不包括使用冗余电源系统。

MicroSAT 使用一种很有意思的电池充电调节方式。卫星上的发射机被设计为在很宽的功率范围内都能保持高效率，从几分之一瓦到 4W。星载电脑为使电池压力最小而选择合适功率等级。在大范围变化条件下工作，软件是反馈环的重要因素。软件周期性的改良来最大化卫星寿命。

当能源供应分系统能为卫星主要系统连续工作供电时，我们说卫星有能源预算盈余。如果部分分系统要为蓄电池充电而周期性关闭时，我们说卫星有能源预算赤字。

在估计卫星表面太阳能电池阵列的平均功率输出所需的卫星几何形状插图可以在参考来源里找到。

4. 姿态控制分系统

卫星相对于地球和太阳的方向（它的姿态）对有效天线增益，太阳能电池电力供应，热均衡和科学仪器运作都有很大影响。姿态控制分系统在复杂性上有很大区别。一个简单的系统可能是在框架上装条形磁铁来把卫星和地磁场对齐。一个复杂的系统可能使用低温气体喷射，固态火箭和惯性轮，这些都用计算机和一个复杂的传感器系统控制。姿态控制系统可以提供三轴稳定性，或把卫星的某个轴指向特定方向——指向地球，指向惯性空间的特定方向（以固定的恒星做参照），或平行于当地的地球磁场。把卫星的方向指向惯性空间的某固定方向是让卫星绕其主轴旋转实现的（自旋稳定）。

姿态控制系统可被分为主动的或被动的。被动系统工作时不需要能源或传感器信号。相应地，它们更简单可靠，却不太灵活。广泛使用的一些姿态控制系统在以下几段中介绍。

★ 质量喷射器

这种类型的设备基于火箭原理工作，它们是主动的也相应比较复杂。一些例子是低温气体喷射，固体推进剂火箭或离子推进器。质量喷射器一般用来推动卫星绕轴旋转。角动量守恒的结果是旋转轴将会在惯性空间里保持固定方向。

★ 角动量储存器

这一类设备使用惯性（飞）轮原理。假设卫星有一个可用地面控制的包含飞轮的直流电机。如果飞轮的角动量变化了，卫星其他部分的角动量也必须反向等量变化（角动量守恒）。这些系统被分类为主动系统。

★ 环境力耦合器

每个卫星都与它的环境有数种耦合（影响）方式。在二体中心力模型里，地球先被看做质心处的质点。之后的分析表明地球的非球对称性会导致卫星轨道出现可观察的扰动。卫星的非球对称质量分布也会导致可观察的效应。对卫星的质量分布分析可以找到卫星因为地球引力梯度而指向地心的一条轴，重力梯度设备就利用了这一效应，任何乘过帆船的人都知道，重力使船有两个稳定状态。如果卫星轨道很低并且卫星有一个方向的长度比另外的长得多的

话,重力梯度效应就很明显。在卫星上装一个尾部有配重的长尾就可以使卫星利用重力梯度。

另外一种可用于姿态控制的环境因素是地球磁场。一个地球磁场的简化模型是一个与转轴有偏离的双极磁场模型。双极磁场强度按 $1/r^3$ 衰减, r 为与地球中心的距离, 所以使用磁场做姿态控制在低高度时效率最高。磁场的方向一般用方位角和斜角来定义, 为描述方位角和斜角, 我们想象一个与地球共轴且穿过我们感兴趣那一点的球面。在这个球上方位角和斜角起的作用就与地球表面上用方位角和高度描述方向一样。

也可以用线圈组成的电磁铁来组成主动控制系统, 来用地球磁场做姿态控制。让电流流过线圈, 就能形成一个暂时性的磁铁。控制合适的时间, 线圈可以产生任何需要方向的扭矩。这种类型的设备一般叫做扭力线圈。

需要注意的是, 设计者不想使用磁场或重力梯度耦合器来做姿态控制, 这些力也仍然会存在而且它们的影响必须考虑。

★ 能量吸收器

能量吸收器或阻尼器是用来把不需要的动能转换为热能的。它们需要与前面提到的姿态控制方法结合使用。举个例子, 如果耗散力不存在, 重力梯度力会使卫星主轴在垂直方向附近做钟摆运动而不是指向地心。相似地, 卫星上的条形磁铁会使卫星在当地磁场方向附近振荡而不是与它平行对齐。阻尼器可以用弹簧、黏性流体或阻滞棒(涡流制动器)等被动设备组成。在这些情况下, 扭力线圈也可以用于产生相同的效果。

实用姿态控制

被动磁性稳定器被首先用在 OSCAR 5 上, 之后也用于很多 Phase II 卫星上。当使用被动磁性稳定器时, 一般用坡莫合金磁滞阻尼棒来减少卫星绕当地磁场方向的旋转并抑制小型震荡。注意在近极地轨道并使用这种稳定器的卫星将每绕地球一圈旋转 720° (以惯性空间记)。

考虑到温度控制, 我们不想让卫星的一面朝向太阳太久, 所以有意引入一点旋转来控制温度。

把斜面十字形天线的一面涂上反射涂层另一面涂上吸收涂层, 这是一种比较新的方法来实现这一点。太阳的辐射压会使卫星像辐射计一样旋转, 这种旋转被当时的用户戏称为“电动烧烤架”方法。

由于 UoSAT 上的照相机必须指向地球, 被动磁性稳定系统并不够用。为实现这一任务目标, UoSAT 的工程师把复杂的重力梯度稳定器和力矩线圈联合使用。UoSAT 系列的设备改进和几代的软件优化, 使这种主动控制系统的表现大为改观。系统硬件和控制软件的演化对卫星稳定技术做出了很大贡献。

OSCAR 10 和 13 使用自旋稳定(每分钟 $20 \sim 30$ 圈)。理想情况下, 当卫星在远地点时旋转轴指向地心, 但是为保证卫星能得到合适的光照, 方向要与理想情况下有点偏差。当轨

道倾角接近 57° 时，偏差相对较小（大概在 20° 的量度上），所需的偏移会周期出现。平均而言，像 OSCAR 13 这类卫星需要每三个月校正姿态一次。姿态信息由星载电脑控制的太阳地球敏感器获得。

为改变姿态，力矩线圈必须以精确的时序来驱动。由地面站上传的指令指挥星载电脑监视太阳地球敏感器，并在合适的条件下驱动力矩线圈。

OSCAR 10 和 13 装备了黏性流体阻尼器来减小摆动（在旋转轴方向上的小振动）。这些阻尼器由装在细管（大约直径 0.2cm，长 40cm）里的水和甘油（大概各占 50%）混合液组成，装在卫星的每条臂的远边上。

OSCAR 40 上的姿态控制系统做出了一些较大的改变，允许卫星在整个轨道上都能将天线指向地球中心。它有一组 3 个正交的磁悬浮反动量轮，2 个力矩线圈，和 6 个章动阻尼器。在没有外力时，卫星的角动量保持不变，但可以通过在 3 个反动量轮中传递动量来改变卫星的朝向。反动量轮是磁悬浮的，所以没有摩擦也不需要润滑。这套卫星上的系统估计寿命在 10 ~ 15 年以上。力矩线圈用来释放累积的动量来使反动量轮的速度维持在一个合适的区间内。章动阻尼器与 OSCAR 10 和 13 上的类似。它们的主要作用是在 OSCAR 40 变轨时维持旋转的稳定。

5. 推进分系统

最简单的空间推进系统是一个固态燃料小火箭，一旦点燃，就会燃烧到燃料耗尽。这种类型的火箭一般被用来把卫星从近地轨道推送到远地点接近地球静止轨道高度（35 800km）的椭圆轨道，或从这种椭圆轨道推送成接近地球静止轨道高度的圆形轨道。这种火箭被称为“远地点发动机”或简称为“助推器”。

液体推进器的建造更加复杂，它们需要在发射现场注入包含有害物质的燃料。但是，它们可以多次燃烧，这极大地增加了任务计划的灵活性。

固态和液态推进器都极度危险。它们的使用、操作、运输和储藏都必须遵照严格的安全规程。

(1) Phase 3A：固态燃料火箭

唯一使用了固态助推器的 AMSAT 卫星是 Phase IIIA。助推器是用来把卫星从预定转移轨道（大约 $300\text{km} \times 35\,800\text{km}$ ， 10° 倾角）转移到目标工作轨道（ $1500\text{km} \times 35\,800\text{km}$ ， 57° 倾角）。

固态助推器为 Thiokol TEM 345-12，在球形壳体（半径 17cm）中装有 35kg 铝粉和有机药物的混合剂，单喷气嘴。这些火箭原来是为“双子星座”号飞船设计的制动火箭。TEM 345 可以在 20s 的燃烧过程中产生 1600m/s 的速度改变。因为发射失败，固态助推器没有点燃过。

(2) OSCAR 10、13、40：液态燃料火箭

OSCAR 10、13 使用了德国航天公司 Messerschmitt-Boelkow-Blohm 捐赠的液态燃料火

箭。这些火箭比 P3A 上使用的固态助推器要有力得多（400N 推进力）。这些额外的推力使 AMSAT 能发射更重的卫星（更厚的屏蔽，更多电子模块等），并能够补偿转移轨道的低近地点和小轨道倾角。使用的燃料为偏二甲肼和四氧化二氮，这两种药剂都是剧毒的，因此灌注燃料需要穿防护服和呼吸过滤器。

尽管火箭引擎和几种相关的阀门都是捐献而来，燃料系统所需的管道仍需要 AMSAT 自行设计制造。有很多组件是必须的：注入阀、混合阀、压力调节器、止回阀来避免回流，爆发阀来防止进轨前系统意外点燃。两个燃料罐和高压氮瓶的建造都是很严峻的挑战。

OSCAR 10 的变轨计划包含两次燃烧。两次燃烧比一次有很明显的优势。单次燃烧变轨会让卫星的速度进入一个危险的区间，在这个区间里，如果燃烧提前终止，卫星会在下一个近地点坠入大气层。两次燃烧的另一个好处是使 AMSAT 有机会对于火箭意外的表现做出补偿，用作首次燃烧校准。第一次燃烧效果良好，只是在燃烧时间上有一点小偏差而把卫星的近地点设置得比预期高了一点。但是引擎不能再次点火，是因为在卫星改变方向的一周里高压氮系统出现了泄露，阻碍了向喷射组件注入燃料的阀门的开启。

OSCAR 13 使用了类似于 OSCAR 10 上使用的液态推进火箭。MBB 再一次同意了捐赠火箭，但这次提供的配件很少。这次任务 AMSAT 使用可用的组件设计了一个新的流动 / 存储组件，并使系统更加健壮，两次燃烧的计划再一次被使用。这次引擎燃烧的很完美。每次燃烧都像预期一般完成。OSCAR 40 装有改进过的液态燃料发动机，但出了一些问题并导致了破坏性的爆炸。

（3）其他推进系统

水燃料火箭。AMSAT 评估过使用水作为燃料的推进系统的潜在效用。这些系统的固有安全性是 AMSAT 在一些不允许使用固体燃料或化学燃料助推器的航天飞机任务中获得进轨机会的关键。“水火箭”的问题是变轨需要很长的时间。举个例子，从航天飞机中发射到抵达 Phase III 型的轨道需要大约一年。变轨时间牵涉的经济问题使水火箭对于商业卫星不实用，因此这种方式没有得到发展。但 AMSAT 需要制造长服役时间卫星，这种方法也许很适合我们的需要。有两种类型的水火箭：休斯飞机（Hughes Aircraft）公司研究出的实用火箭模型基于把水电解为氢和氧，第二种方法是产生蒸汽，再通过特殊设计的推进器喷出。蒸汽法每单位的水产生的推力比电解法要少，但系统复杂性极低，且需要的外部能量也较少。因此这种类型系统的可靠性是极高的。

电弧喷射推进器作为主推进系统的补充，OSCAR 40 携带有电弧喷射推进器（又名：离子喷射推进器）来在卫星在接近最终轨道时做位置保持和微调。使用氮作为燃料，电弧喷射能产生 100 毫牛顿的推力，远比主推进器的 400N 要少。电弧喷射的运作需要大约 1kW 来加热氮。这套系统是由斯图加特大学设计的。

6. 计算机辅助和控制分系统

在 OSCAR 5 ~ 8 上, 各种卫星组件是由硬件逻辑与遥测系统和指令系统连接的。当卫星总的复杂度提升的同时, 使用中央计算设备来替代硬逻辑系统就更简单可靠。一旦决定了使用计算机, 卫星的设计就必须再次评估来利用这一方案带来的不可思议的灵活性。地面站不再需要选址在能够发送立即指令的地方; 它们可以上传预先写好的程序。在确认了正确的接收后, 这些程序就接管了卫星, 上传的指令也在指定的时间或需要的时候执行。Phase III 卫星将太阳和地球敏感器的数据传送给计算机, 使用地球磁场的简化模型来让计算机在适当的时间驱动力矩线圈来维持正确的卫星姿态。Phase III 卫星点燃远地点推进器的工作也由计算机处理。

计算机程序控制遥测内容和格式。如果我们想用改变比例尺的方式监测一个特定的遥测通道或者是更频繁的采样, 我们只要简单地给计算机程序加几个字节即可。想要每天在 00:00 GMT 发送日常数据存储消息? 没有问题, 在方便的时候上传信息和控制程序, 消息就会按日程发送。

(1) Phase III 系列 IHU

每个 Phase III 卫星都包含由中央处理器 (CPU) 板, 随机存储器 (RAM), 多路复用器 (MUX) 和命令监测器 (CMD) 板组成的模块。整个模块也被称为集成星务管理单元 (IHU)。IHU 由一个传统的多任务计算机 (CPU 和 RAM) 与一个遥测编码器和命令解码器组成, 所以一个单独的单元就可以胜任所有的导航, 控制和遥测功能。

CPU: 20 世纪 80 年代中期 Phase IIIA 的 CPU 选用 8 位 RCA COSMAC CDP1802 微处理器的理由很简单——这是卫星设计时唯一可用的元件。由于处理器被证明强力且灵活到足以胜任后期任务更复杂的要求, 这个决定看来很正确。之后有了可用的辐射加固版本 (对辐射伤害耐受更强)。

航天用 1802CPU 设计上的一个新颖之处是它不使用任何只读存储器。由于对 ROM 的辐射伤害是对航天器寿命的巨大威胁, 这个性能非常重要。当卫星的 IHU 在命令链中发现一个特别的比特流, 就会把计算机复位。接下来上传的 128 字节将被存储到低内存的连续地址处。当 128 字节中的最后一个接收到, 处理器被自动切换到运行模式。这 128 字节中包含的引导装入程序将控制载入剩下的操作系统。

CPU 语言: CPU 执行一种叫 IPS (进程结构编译器) 的高级语言, 一种与 Forth 类似的线程化代码语言。IPS 由 Dr. K. Meinzer (DJ4ZC), 为多任务工业控制型系统开发。IPS 快速, 强大, 灵活而且内存使用上效率极高。有些人认为没买过惠普逆波兰表达式掌上计算器的人基本不能理解 IPS。在任何情况下, 使用者都不需要为解析下行遥测数据信号而学习 IPS。

RAM: 一开始的计划 (1975) 是在 Phase IIIA 上装 2KB NMOS RAM。当 Phase IIIA 发射后有条件装 16K。OSCAR 13 装载的单元有 32K 辐射加固的 CMOS RAM。这与今天的典

型含有 640K 或更过内存的个人计算机相比并不多。但前往外行星的旅行者号计划用 32K 内存执行的很好，并且内存大小并没有在任何重要的地方限制 OSCAR 13。内存的每个 8 比特字节都用 4 比特按照错误检测与纠正 (EDAC) 备份。CPU 的后台任务是持续在内存中循环来检测每个内存单元，这称为内存清洗。如果检测到错误 (辐射导致的比特翻转)，错误就会被纠正，因此内存对软错误有抵抗力 (辐射导致的比特翻转)。当 CPU 检测整个内存时每字节错误不超过 1 位时，整个过程少于 1 分钟。EDAC 电路基于汉明码。

MUXJCMD 板：CMD 单元仅用于监测上传数据。当它识别到特定的比特流时会把数据传送给 CPU。MUX 是一块电子的 64 刀开关。当它与 CPU 板上的模数转换器协同使用时，可以构成一个 0 ~ 2V 的 64 通道扫描电压计，温度由热敏电阻测量。一个没有串联电阻所导致的损耗和可靠性问题的巧妙测量电流方式是：一个对称的小交流信号通到小磁环线圈上。这个线圈的直流测量电流正常情况下为零。如果一个直流电流通过磁环中央，一个小的直流偏移会叠加在交流信号上。偏移信号的大小和流过中心的电流成比例。每个需要测量电流的电线周围都有磁环。

辐射屏蔽卫星上构成电子模块的集成电路对于高能粒子造成的辐射损伤很敏感。这个问题在 Phase III 卫星上尤其严重，因为卫星在每个轨道上要穿越范艾伦辐射带两次，而在这些带上的高能粒子密度是很严重的威胁。软错误，像仅仅是内存单元中的比特反转，不是主要的问题，EDAC 电路会处理好它们。问题是硬错误—内存单元的永久性损坏。如果内存中发生了这种故障，这些区块可被标为禁止区域。但是，如果损坏的区域太多，或者是某些关键块损坏，计算机就没救了。有一些策略可以减少卫星对这种伤害的敏感程度，AMSAT 全都用上了：使用有最佳辐射特性的芯片，每个芯片上做单独的屏蔽，在每组芯片上做屏蔽等。

OSCAR 10 对辐射伤害的敏感是公认的致命要害，在轨 3 年多之后 IHU 就损坏了。当 OSCAR 13 准备发射时，出现了对辐射伤害耐受高得多的芯片，它们被用在新的卫星上。辐射伤害不是 OSCAR 13 的限制因素。OSCAR 40 携带有多台计算机，包括以前可靠的 1802 和一个复杂的局域网。

(2) UoSAT 系列 IHU

早期的 UoSAT 卫星由执行 IPS 语言的 CDP1802 微处理器控制。OSCAR 9 和 OSCAR 11 用带 48KB 动态 RAM 的 1802 并有辅助计算机。OSCAR 9 上的备份计算机是 16 位 Ferranti F100L 配 32KB 静态 CMOS RAM。OSCAR 10 上用来做数据通信实验的是 NSC-800 配 128K CMOS RAM。UoSAT D 带有三台计算机 (1802、80C31、80C186) 和超过 4M 字节的内存。更近的 UoSAT 卫星使用与 Intel 186 系列架构类似的计算机来处理全部的卫星和通信系统控制，并用并行处理微机集成块来做图像处理。

UoSAT 系列卫星的一个主要目标是测试和评估新的硬件和系统方法。因为 Phase IIIA 没能到轨，OSCAR 9 使爱好者第一次有机会控制太空中的计算机。许多分组数据无线电卫星使用的技术就是先在 UoSAT 卫星上测试的。

(3) MicroSAT 系列 IHU

据说,甚至很严肃地说, MicroSAT 是伪装成卫星的紧凑型低功耗 IBM 计算机的复制品。MicroSAT 卫星使用 NEC CMOS V40(类似于 80C188)并装有引导装入程序的 2K 的 ROM。存储操作系统软件的 256K 内存有 EDAC, 额外的 8MB 静态 RAM 来存储消息。MicroSAT 的程序用汇编语言和 Microsoft C 写成,并用 Microsoft LINK 进行链接。

MicroSAT 上的卫星计算机控制系统代表了从早期 Phase III 和 UoSAT 卫星上 8 位 1802 执行 IPS 架构的方向上的重要改变。转变的理由很直观, MicroSAT 的主任务子系统(邮箱)的开发需要比 1802 更强大的微处理器。因此决定使用 Intel 系列中的一款,因而开发工作可以在许多爱好者能用得到的 IBM 克隆机上进行。V-40 有需要的特性。本来也可以用 1802 做总卫星控制而用 V-40 管理邮箱,但这需要卫星上有额外的电路,而且卫星控制和开发团队需要在熟悉的 Intel 微处理器语言外额外加上 IPS。把总控制交给 V-40 更简单,可以把卫星管理当作 V-40 负责的许多任务中的一个。

MicroSAT 系列卫星的一个主要创新点是引入了连接星载计算机和各种电子模块的标准航天器总线(互联方案),在过去,每个卫星都需要特殊的和极度复杂的线束。这些线束的设计和制造是为了给各种模块提供所有的连接。随着卫星变得复杂,互联所需要的线束数量快速增加,而且在更快的速率下建造难度也提升了。这对卫星的可靠性有消极影响。在 MicroSAT 上线束的功能由插到各个模块上的带状电缆实现。这种操作方法与简易局域网类似,星载计算机作为主端,各个模块作为从端。每个模块都有 AART(可寻址异步收发器)芯片和与星载计算机通讯所需的相关元件以及遥测传感器测量元件构成。

总线通信方式有几种额外的优势。以一些散布在世界各地的工程师小组,每个研究不同的卫星模块,通信总是一个问题。一个详细的总线定义极大地减小了这个困难并降低了分布式工程的难度。总线方式也使新小组加入卫星建造更容易。最后,他提供了一种设计和控制方法,可被有效用于各种复杂程度的航天器和各种类型的任务目标。

(4) 传感器

卫星导航和控制子系统包含的组件和软件需要:测量卫星的位置和朝向,调节姿态,执行遥控指令或卫星计算机的指令来控制所有的星载系统。在 OSCAR 卫星上指令接收机一般使用转发器(线性或数字)的前端部分。信号通过专用的中频通带,解调器和解码器。解码器出来的数据被送往 IHU。主动姿态控制需要传感器,因为除传感器外大多数导航和控制分系统的元素我们都讨论过,我们专注于传感器。OSCAR 13 上的传感器就是一个很好的例子。

OSCAR 13 有三组传感器来提供姿态信息:太阳敏感器,地球敏感器和顶部/底部传感器。在接下来的讨论中它对于刻画 OSCAR 13 的形状以及卫星如何绕其对称轴并指向固

定方向是有帮助的。姿态测定方法包含两个步骤，首先要以两个天体，太阳和地球，为参照获得相对方向。太阳和地球的精确位置是已知的，从数学上减少的绝对定向的数据量。这步完成后往往会带来两个解，而只有一个解是正确的。而顶部/底部传感器就用来消除歧义。

顶部/底部传感器由装在卫星顶部和底部的几块太阳能电池组成。当卫星能收到太阳光时，只有一组能被照亮。这对卫星方向给出了简单的估计，但对于在太阳地球敏感器的解中选择一个是足够的。太阳地球敏感器装在卫星两条臂的末端。

因为太阳非常亮而且基本是点光源，太阳敏感器的制作相对简单。它有两个狭缝和两个光电二极管组成。由于卫星的旋转，太阳敏感器每圈（大约每分钟 20 圈）能扫描卫星赤道上 $\pm 60^\circ$ 的区域。如果太阳在这个区域内，我们会从每个光电管获得一个短信号。这两个短信号间的时间和短信号的顺序为卫星的朝向提供了重要信息。真实情况比简单模型要复杂一些，因为有天线反射日光等所导致的额外短信号。

我们选择的第二个天体是地球。地球很暗，而且从 OSCAR 13 看来地球的直径从远地点的 18° 到近地点的 90° 之间变化。进入地球敏感器的光通过防眩光屏蔽层并由镜头聚焦到光电二极管上。光电元件的灵敏度阈值被设置为当二极管的视野从暗空间转到地球反射的太阳光时输出为改变，暂时假设地球完全被太阳光照到（当然这不可能）。在大部分轨道上由于卫星的旋转，地球敏感器都不会扫过地球。但在卫星稍早于近地点和稍晚于远地点的两段时间内，传感器能看到地球，当卫星进入这些区间后传感器将快速扫过地球。但传感器能聚焦到地球的时间会增加，并随轨道运动增加到一个稍大的最大值，再减少到零。

把这个简单模型的数据转化成卫星方向信息的数学算法并不太可怕。但是它们很复杂。最严重的问题是地球只有一部分能被照亮。因此传感器回报的是被照亮的新月形的增加和减少。另外一个不确定性是地球被部分照亮时从亮到暗的转变并不尖锐。为翻译数据，地球传感器实际上使用了两个光电二极管，每个波束宽度大约 2° 。一个点在卫星比卫星赤道高 4° 另一个低 4° 。

使用 OSCAR 13 传感器数据中的遥测值，可以用个人计算机来把卫星旋转轴的方向确定到 1° 。绝对旋转角（来确定力矩线圈的启动时机）可以精确到 0.1° 。这种精确度对于变轨机动和用力矩线圈调节姿态都足够了。

OSCAR 40 是第二个装备有 GPS 接收机来确定姿态的 OSCAR 卫星。第一个这样的卫星是 PoSAT，但爱好者不负责它的建造和操作。但 OSCAR 40 是第一个进行高椭圆轨道 GPS 实验的卫星。OSCAR 40 上的 GPS 接收机用于确定卫星轨道（20m 以内精度）并作为姿态探测系统的备份。OSCAR 40 有 8 个 GPS 天线。这个系统的信息将被转换为卫星的开普勒轨道要素并通过下行数据提供给用户。



附录 C

中国业余无线电卫星——希望一号 Hope-OSCAR-68

龚万聰 (BA1DU)

希望一号(XW-1)卫星是我国第一颗业余无线电卫星,也是我国第一颗科普卫星。该卫星于2009年12月15日在太原卫星发射中心搭载“长征二号丙”运载火箭,一箭双星成功发射入轨。同年12月19日美国业余卫星组织 AMSAT 把“希望一号”编入业余无线电卫星第68号,简称为 HO-68。H 为“希望”的英文“HOPE”的第一个字母,O 是国际上业余无线电卫星的统称“OSCAR”的第一个字母。

希望一号卫星完成了建立我国第一个业余无线电卫星业余业务空间电台的任务,填补了我国无线电通信领域的空白。

1. HO-68 卫星简介

HO-68 卫星采用非等边八边形立柱构形,星体结构由铝合金框架、承力板以及整星蒙皮构成。卫星采用被动热控方式,由体装三结砷化镓太阳能电池阵和锂离子蓄电池联合供电。卫星质量约 60kg,星体高 480mm,包络直径 680mm。HO-68 卫星的有效载荷包括 1 台业余无线电遥测信标机和 3 台业余无线电通信转发器。3 台转发器分别工作在调频中继模式、线性转发模式和数据存储转发模式。卫星还携带一台微型彩色宽视场 CMOS 摄像机和一个青少年科学实验装置。

HO-68 卫星由业余无线电爱好者提出需求和方案,由中国空间技术研究院航天东方红卫星有限公司研制。



“希望一号”卫星 QSL 卡片

HO-68 卫星主要技术指标:

- 结构: 非等边八菱柱构形, 铝合金框架和承力板;
- 质量: 60kg;
- 包络尺寸: $\Phi 680\text{mm} \times 480\text{mm}$ (不包括天线), $\Phi 680\text{mm} \times 974\text{mm}$ (包括天线);
- 热控方式: 被动式;
- 卫星舱内温度: $-20 \sim +45^{\circ}\text{C}$;
- 电源: 体装三结砷化镓太阳能电池板和 15AH 可充电锂离子蓄电池;
 - 一次电源电压: 28V;
 - 二次电源电压: 5V 和 12V;
 - 长期输出功率: 13W;
 - 短期输出功率: 31W。

HO-68 运行在太阳同步轨道, 轨道参数如下:

- 轨道高度: 1200km;
- 倾角: 100.5° ;
- 轨道周期: 109.4min;
- 降交点地方时: 上午 9:30。

2. HO-68 卫星业余无线电有效载荷

HO-68 卫星的有效载荷包括多部业余无线电空间电台, 可分为遥测信标机和通信转发器两大类。遥测信标机工作在 CW 模式, 对地传送 13 路反映卫星工作状态的遥测数据, 信标机输出功率为 200mW, 工作在 70cm 波段。

通信转发器由一台线性转发器和一台调频及数据存储转发器组成, 它们为业余无线电爱

好者建立双向无线电空间中继通信。根据卫星供电的状况，两台转发器按地面遥控指令轮流开机工作。线性转发器带宽 50kHz，输出功率为 1W，上行信道工作在 2m 波段，下行信道工作在 70cm 波段。

调频及数据存储转发器为调频话音和数据存储转发分时工作方式，共用一个 16kHz 带宽的调频无线电信道，调频话音中继通信由 67Hz 亚音频触发。数据存储转发通信采用 AFSK 调制体制，基带调制解调为 ITU-T V.23 标准，码速率为 1200bit/s。数据通信链路层基于 AX.25 协议，应用层采用 PACSAT 协议，具有上传短信和文件、下载短信和文件、下载目录等功能。调频和数据存储转发器射频输出功率为 1W，上行信道工作在 2m 波段，下行信道工作在 70cm 波段。

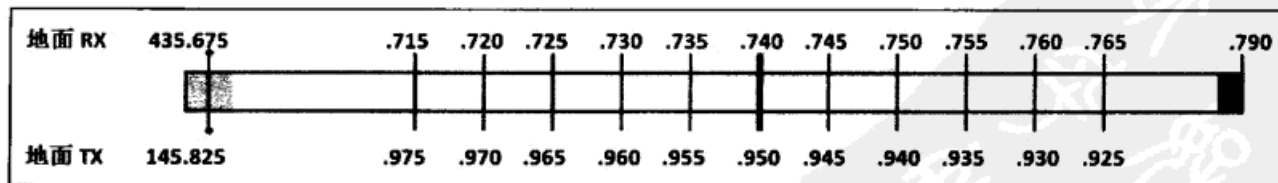
接收和发射天线分别垂直安装在星体的 -Z 和 +Z 面的承力板上，接收天线为 2m 波段，发射天线为 70cm 波段。两套天线均为由 4 根 1/4 波长振子组成的圆极化天线阵。接收天线工作在左旋圆极化方式，平均增益 -2dBi，发射天线工作在右旋圆极化方式，平均增益 -2dBi。

HO-68 卫星业余无线电呼号：BJ1SA

HO-68 卫星业余无线电频率配置：

有效载荷类型	工作模式	上行频率 (MHz)	下行频率 (MHz)	发射功率 (W)	天线极化	调制体制	通信协议等
遥测信标机	U	—	435.7900	0.2	下行：RHCP	CW	见下文
线性转发器	V/U (J)	145.9250-145.9750	435.7150-435.7650	1	上行：LHCP 下行：RHCP	透明转发	上下行频谱倒置
调频转发器	V/U (J)	145.8250	435.6750	1	上行：LHCP 下行：RHCP	FM	67Hz 亚音频触发
数据存储转发器	V/U (J)	145.8250	435.6750	1	上行：LHCP 下行：RHCP	AFSK	1200bit/s ITU-T V.23, 链路层 AX.25 协议, 应用层 PACSAT 协议

HO-68 卫星业余无线电频率配置示意图：



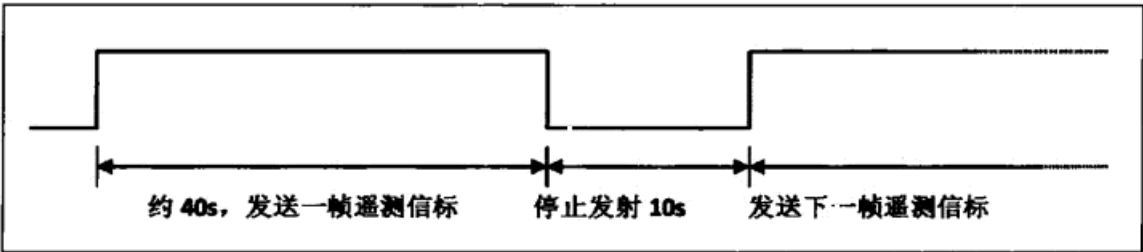
3. HO-68 卫星遥测信标机

● 简介

遥测信标机工作在 UHF 频段，发射频率为 435.790MHz，射频输出功率约 200mW。射频信号经过切换开关和移相及分配网络，与 4 根 1/4 波长辐射振子相连接，构成右旋圆极化发射天线，天线平均增益约为 -2dBi。信标机从卫星与运载火箭分离后 6s 开机，连续工作至今。

● 遥测信标发送时序

遥测信标信号每一次发送一个数据帧，发送时间约 40s，然后停止发送 10s，再发送下一个数据帧，周而复始。每个数据帧的遥测数据由星上微处理器实时更新。



HO-68 卫星遥测信标发送时序示意图

● 遥测信标信道编码和调制体制

业余无线电卫星信标信号常用的调制体制有无调制载波、等幅报和 AFSK 等方式，HO-68 卫星采用：

- (1) 等幅报 (CW) 方式调制；
- (2) 国际标准莫尔斯电码发送；
- (3) 发送速率为 15word/min；
- (4) 遥测信息数字编码见下表。

数 字	编 码
0	T
1	A
2	U
3	V
4	4
5	E

续表

数 字	编 码
6	6
7	B
8	D
9	N

因此, 无线电接收机要具有 CW 模式才能正常接收“希望一号”卫星的信标信号。

● 遥测信标帧格式及内容

遥测信标信号的每一个数据帧包括 22 组信息, 每一帧以 HO-68 卫星的业余无线电呼号“BJ1SA”开始, 接着发送两组遥测信息起始标识, 内容均为英文字母“XW”, 之后从第 4 组到第 16 组每组由 3 个英文字母或数字组成, 是卫星的遥测信息, 最后以发送两组英文字母“XW”作为遥测信息结束标识, 结束一个数据帧的发送。

发 送 顺 序	发 送 内 容	内 容 含 意	说 明
1	BJ1SA	卫星无线电呼号	按标准莫尔斯电码发送
2	XW	遥测信息起始标识	按标准莫尔斯电码发送
3	XW	遥测信息起始标识	按标准莫尔斯电码发送
4	CH1	遥测通道 1	发送本通道信息
5	CH2	遥测通道 2	发送本通道信息
6	CH3	遥测通道 3	发送本通道信息
7	CH4	遥测通道 4	发送本通道信息
8	CH5	遥测通道 5	发送本通道信息
9	CH6	遥测通道 6	发送本通道信息
10	CH7	遥测通道 7	发送本通道信息
11	CH8	遥测通道 8	发送本通道信息
12	CH9	遥测通道 9	发送本通道信息
13	CH10	遥测通道 10	发送本通道信息
14	CH11	遥测通道 11	发送本通道信息
15	CH12	遥测通道 12	发送本通道信息
16	CH13	遥测通道 13	发送本通道信息
21	XW	遥测信息结束标识	按标准莫尔斯电码发送
22	XW	遥测信息结束标识	按标准莫尔斯电码发送

● 遥测信标所发送的遥测信息

通道	参数名称	类型	数据格式		编码及算法	单位
			最大值	最小值		
CH1	功放输出开关状态	状态	000	111	111: 信标单独工作 000: 信标和转发器工作	
CH2	转发器工作状态	状态	000	111	000: 信标单独工作 001: 信标和线性转发器工作 010: 信标和调频 / 存储转发器工作 100: 软件上注	
CH3	转发器温度	数据	099	199	第一位 =0, 为负温度 第一位 =1, 为正温度 后两位表示温度的绝对值	℃
CH4	信标机输出功率	数据	000	999	$P=N$	mW
CH5	信标机供电电压	数据	000	999	$V=N/100$	V
CH6	接收机供电电流	数据	000	999	$I=N$	mA
CH7	线性转发器 AGC 电压	数据	000	999	$V=N/100$	V
CH8	转发器输出功率	数据	000	999	$P = Nx3$	mW
CH9	转发器功放供电电流	数据	000	999	$I=N$	mA
CH10	线性转发器上变频器供电电流	数据	000	999	$I=N$	mA
CH11	线性转发器供电电压	数据	000	999	$V=N/100$	V
CH12	调频 / 数据存储转发器数字部分供电电流	数据	000	999	$I=N$	mA
CH13	调频 / 数据存储转发器供电电压	数据	000	999	$V=N/100$	V

4. HO-68 卫星数据存储转发器

● 简介

HO-68 卫星调频转发器和数据存储转发器共用一个 16kHz 带宽的无线电信道。调频语音通信中继由 67Hz 亚音频触发, 数据存储和转发通信系统采用 AFSK 调制, 基带调制解调器符合 ITU-T V.23 标准, 波特率为 1200bit/s。

数据通信链路层协议基于 AX.25, 应用层协议为 PCSAT, 支持子协议包括 PACSAT File Transfer Level 0、File Broadcasting 和 Directory Broadcasting。使用 WISP MSPE 终端软件可

以通过 File Transfer Level 0 上传短信文件，通过 Directory Broadcasting 下载目录，通过 File Broadcasting 下载短信文件。

调频 / 数据存储转发器的标准输出功率为 1W，上行信道频率 145.825MHz，下行信道频率 435.675MHz。

● 物理层技术指标

有效载荷	模式	上行链路 (MHz)	下行链路 (MHz)	卫星天线极化	调制体制	通信协议
调频转发器	VU (JA)	145.8250	435.6750	上行：左旋圆极化 下行：右旋圆极化	FM	67Hz 亚音频触发
数据存储转发器	VU (JD)	145.8250	435.6750	上行：左旋圆极化 下行：右旋圆极化	AFSK	1200bit/s ITU-T V.23 AX.25 and PACSAT

● BBS 特性

项 目	特 性
广播呼号	BJ1SA-11
BBS 呼号	BJ1SA-12
码速率	上行和下行 1.2kbit/s
BBS 存储空间	128KB
同时可使用用户数	上行：最多 3 个（系统能够允许同时上传文件的用户数最多是 3 个，即最多允许 3 个用户通过 File Transfer Level 0 连接到系统，第 4 个用户的请求会被系统拒绝） 下行：不限，包括下载目录和文件
信息存储时间	5 天后自动删除
上传文件大小	普通短信文件大小限制在 512B 内（包括短信内容与短信的 PACSAT 文件头约 200B） 允许一个用户上传大于 512B 小于 48KB 的短信文件。（即：0~512B，最多 3 个用户；513B~48KB，最多一个用户；大于 48KB，不允许）

● TNC 设置

命令和设置	含 意
PACLEN 255	设置 TNC 最大数据包长度 255
ALFDISP off	关闭 TNC 在数据内自动添加换行符（0x0A）的功能

● WISP 软件设置

项 目	设 置
广播呼号	BJ1SA-11
BBS 呼号	BJ1SA-12
TNC 和 WISP 之间串行口速率	必须大于 1200kbit/s, 推荐用 9600kbit/s.
WISP 软件中 TNC 设置项的数据包长度	必须小于 TNC 设定的 PACLEN, 建议值 200B

● 疑难解答

问 题	解 决 方 法
1 上传文件困难	1. 如果不能 login, 检查链路是否正常; 2. 检查 WISP、TNC 的包长度的设置。如果 TNC 设置的包长度小于 WISP 的设置, 可能导致不能上传帧; 3. 如果是 login 需要很长时间, 并且上传速度很慢, 检查地面设备是否误打开 67Hz 亚音以及功率、频率等参数。
2 下载文件困难	检查 WISP MSPE 是否统计出 CRC 错误, 如果有, 可能是因为 ALFDISP 的值为 On, 可以通过串口设置 TNC 命令 "ALFDISP off", 关闭 TNC 自动添加换行符的行为。

5. HO-68 卫星星地无线电通信链路分析

● 遥测信标下行链路

首先来看看遥测信标链路的情况。尝试接收遥测信标, 不仅能够了解卫星的工作状态, 还可以为今后使用转发器通信做准备。

如前所述, HO-68 遥测信标机输出功率为 200mW(+23dBm), 工作在 70cm 波段。为了在卫星刚从地平线升起时就能够收到信号, 我们建议使用增益不低于 15dBi 的八木天线 (通常需要 10 个单元) 来接收。典型的 70cm 波段电台的 CW 接收机的灵敏度优于 -127dBm (10dB S/N), 在卫星离我们最远点 (在地面可视仰角 5° 时, 大约 3665km), 路径损耗为 156.5dB。当我们使用线极化天线时, 有 3dB 的极化误差损耗, 同时, 还有电离层损耗 1dB 和 2dB 其他损耗 (如电缆、连接器损耗等)。因此, 我们得到:

HO-68 CW 遥测信标下行链路
地面观察卫星的仰角 5°, 距离 3665km

卫星发射功率	+23dBm
卫星天线平均增益	-2dBi

续表

路径损耗	-156.5dB
极化误差损耗	-3dB
电离层损耗	-1dB
其他损耗	-2dB
地面八木天线增益	+15dBi
地面接收机收到的信号强度	-126.5dBm

地面接收机收到的卫星信标信号的强度高于其可用灵敏度。

在卫星离我们最近点（1200km），路径损耗为 146.8dB，我们得到：

XW-1 CW 遥测信标下行链路

地面观察卫星的仰角 90°，距离 1200km

卫星发射功率	+23dBm
卫星天线平均增益	-2dBi
路径损耗	-146.8dB
极化误差损耗	-3dB
电离层损耗	-1dB
其他损耗	-2dB
地面八木天线增益	+15dB
地面接收机收到的信号强度	-116.8dBm

可见，在卫星过顶时，只要用一个不太大的八木天线或高增益的鞭状天线，就可以很容易地接收 HO-68 卫星的信标信号。

● 转发器下行链路

两个转发器的最低输出功率均为 1W(+30dBm)，工作在 70cm 波段，卫星发射天线平均增益为 -2dBi。

卫星离我们最远时（在地面可视仰角 5° 时，大约 3665km）电波传播路径损耗是 156.5dB，我们得到：

XW-1 调频转发器下行链路

地面观察卫星的仰角 5°，距离 3665km

卫星发射功率	+30dBm
--------	--------

续表

卫星天线增益	-2dBi
路径损耗	-156.5dB
极化误差损耗	-3dB
电离层损耗	-1dB
其他损耗	-2dB
简易手持式八木天线增益	+10dBi
地面接收机收到的信号强度	-124.5dBm

典型的 UHF 频段 FM 对讲机的接收灵敏度通常优于 -122dBm (12dB 信纳比)，在地面可视仰角 5° 时，对讲机收到的卫星信号的强度略低于其可用灵敏度，因此对于 FM 转发器地面需使用增益较高 (13dBi 以上) 的天线或在卫星仰角升高后再进行通联。

对于线性转发器通信，由于主要工作在 SSB 和 CW 模式，收发信机的接收灵敏度通常优于 -127dBm (10dB S/N)，因此可满足链路的要求。

在卫星离我们最近点 (1200km)，路径损耗为 146.8dB，我们得到：

XW-1 调频转发器下行链路	
地面观察卫星的仰角 90° ，距离 1200km	
卫星发射功率	+30dBm
卫星天线增益	-2dBi
路径损耗	-146.8dB
极化误差损耗	-3dB
电离层损耗	-1dB
其他损耗	-2dB
简易手持式八木天线增益	+10dBi
地面接收机收到的信号强度	-114.8dBm

因此，当卫星过顶时使用双频段对讲机和简单的鞭状天线，我们就能够接收 HO-68 转发器的信号。

● 转发器上行链路

对于 2m 波段上行链路，卫星在最远处时 (在地面可视仰角 5°)，路径损耗为 146.9dB，卫星转发器接收机的灵敏度实测优于 -123dBm (12dB SINAD)，卫星接收天线平均增益为 -2dBi。因此，地面使用简单的手持八木天线，我们得到：

XW-1 调频转发器上行链路

地面观察卫星的仰角 5° ，距离 3665km

地面对讲机发射功率	+37dBm
卫星天线增益	-2dB
路径损耗	-146.9dB
极化误差损耗	-3dB
电离层损耗	-1dB
其他损耗	-2dB
简易手持式八木天线增益	+6dB
卫星接收机收到的信号强度	-111.9dBm

在卫星离我们最近点 (1200km)，路径损耗为 137.2dB，我们得到：

XW-1 调频转发器上行链路

地面观察卫星的仰角 90° ，距离 1200km

地面对讲机发射功率	+37dBm
卫星天线增益	-2dB
路径损耗	-137.2dB
极化误差损耗	-3dB
电离层损耗	-1dB
其他损耗	-2dB
简易手持式八木天线增益	+6dB
卫星接收机收到的信号强度	-102.2dBm

所以，我们可以使用双频段对讲机和简单的手持八木天线，通过 HO-68 卫星的转发器进行可靠的卫星中继通信。我们甚至可以尝试使用对讲机上的橡胶鞭状天线进行通信，根据以上分析的结果也是可用的，只是通信的时间会短一些。

6. HO-68 卫星业余无线电通信活动

HO-68 卫星为全世界业余无线电爱好者增加了一个新的卫星通信平台，为全国青少年提

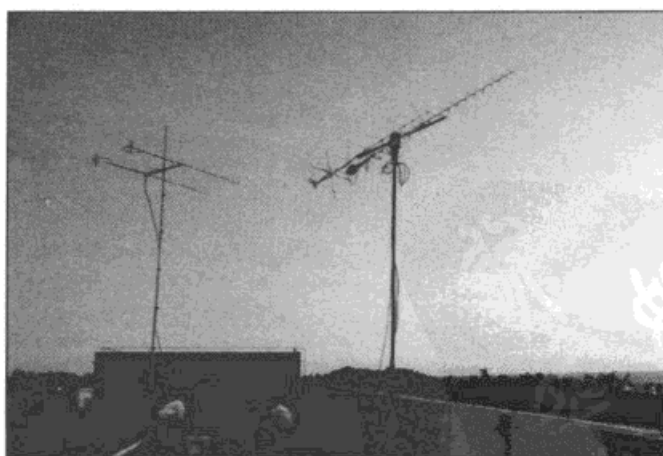
供了一种新的科学技术体验手段。HO-68 卫星已经被全球几十个国家和地区的业余无线电爱好者使用，全球数十万业余无线电爱好者成功地接收到星上的无线电信标信号，并使用转发器进行双向通信，受到了国际业余卫星界的好评。

中国无线电运动协会空间通信工作组在卫星发射前后安排了多年的系列科普活动，在中国科技馆建立了希望一号卫星业余无线电通信体验基地，2010 年“六一”儿童节期间，在中国科技馆举行了“六一的问候”主题活动，通过 HO-68 卫星让全国少年儿童体验业余无线电卫星通信；在 2010 年元宵节开展了“两岸四地共希望”活动，北京、南京、广州、香港、澳门、台北的青少年参加了本次活动，通过 HO-68 业余无线电空间电台进行通联问候，增进了两岸四地民众的相互了解；从 2010 年起每年举办全国青少年业余无线电卫星通信锦标赛，众多青少年选手利用 HO-68 卫星进行通信比赛。HO-68 卫星的应用不仅为业余无线电爱好者带来了乐趣，同时也取得了良好的社会效益。

- 樊绍民（BA1EO）在向中学生演示和讲解业余无线电卫星通信



- 业余无线电爱好者团队设立三亚和南宁监测站



HO-68 卫星发射入轨点在印度尼西亚西南部上空，离我国大陆最近的海南三亚有 4000 多千米的直线距离，为了在 HO-68 火箭分离后第一时间跟踪到卫星，接收星上的业余无线电信标，广东的业余无线电爱好者志愿人员在海南三亚设立了监测站。他们携带精良的无线电设备，在我国海南三亚的南部海边搭建了高水平的业余无线电卫星监测站。该监测站与设在太原卫星发射中心的监测站建立了电话热线。当希望一号卫星从运载火箭分离后三亚监测站第一时间接收到了业余无线电信标信号，并实时传送到太原卫星发射指挥中心。

与此同时，业余无线电爱好者在广西南宁设立了备份监测站，卫星发射当晚，在希望一号业余无线电首通活动中，与朔州特设电台 BT3WX 的业余无线电爱好者和青少年学生进行了空中互动。



● HO-68 卫星首次业余无线电通联活动

北京时间 2009 年 12 月 15 日晚上，中国首颗业余无线电卫星希望一号进行了首次通联。从晚上 8 点 54 分开始，位于山西省朔州市的业余无线电特设电台 BT3WX 的业余无线电爱好者和青少年学生们与泰国及中国的香港、澳门、三亚、南宁的无线电爱好者进行了语音通话，信号十分清晰。



● “两岸四地共希望” 希望一号卫星业余无线电通信活动



南京会场



北京会场



台北会场

● 中国科技馆希望一号卫星业余无线电通信站

2010年5月31日上午，胡锦涛主席来到位于中国科技馆二楼大厅的希望一号卫星业余无线电通信站，看望在那里参加希望一号卫星应用实验活动的少年儿童们，祝贺他们六一节快乐！



中国科技馆希望一号卫星业余无线电通信站

- 希望一号卫星业余无线电通信全国锦标赛

比赛由国家体育总局、教育部、中国科协、共青团中央和全国妇联主办，从2010年开始每年举办一届。



- 2011年美国代顿业余无线电节上爱好者们正在接收HO-68卫星信标信号





附录 D 英制 - 国际单位制换算表

本书在翻译过程中遵照了原版英文书中的数据和英制单位，为了方便读者对单位的理解，特将英制单位与我国使用的国际单位制单位（法定计量单位）的换算表列出，请读者参考。

英制—国际单位制换算表

英制	国际单位制
	长度
1 英寸 (in)	25.4 毫米 (mm)
1 英尺 (ft)	30.5 厘米 (cm)
1 英里	1.61 千米 (km)
	面积
1 平方英寸 (in ²)	6.45 平方厘米 (cm ²)
1 平方英尺 (ft ²)	929 平方厘米 (cm ²)
1 平方英里	2.59 平方千米 (km ²)
	体积
1 立方英寸 (in ³)	16.4 立方厘米 (cm ³)
1 立方英尺 (ft ³)	0.0283 立方米 (m ³)
	重量
1 磅 (pound)	0.45362 千克 (kg)

