



# 射电天文 手册

2013年版  
无线电通信局





# 射电天文手册

第三版

2013年版

无线电通信局

封面照片：由6个相同的22米天线组成的CSIRO澳大利亚致密阵，位于Paul Wild天文台。它是利用地球自转进行孔径综合的望远镜阵。

图片版权所有：David Smyth。

© 国际电联2015

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何形式或手段复制本出版物的任何部分。

## 第三版引言

### ITU-R 7D工作组

### (射电天文) 主席

推出《射电天文手册》第三版，我倍感荣幸，也非常高兴。

本手册的目的不是成为射电天文学方面的参考书，而是主要关注射电天文与频率协调相关方面的内容，即对无线电频谱的使用进行管理，从而把不同无线电通信业务间的干扰降到最低。射电天文不涉及在划分给它操作的频段上发射无线电波的情况，因而不会对其它业务造成有害干扰。另一方面，由于接收到的宇宙信号通常极其微弱，其它业务的传输可能对这些信号造成干扰。

本手册包括十二章和五个附录，以频率协调为目的，向读者介绍了作为无线电通信业务之一的射电天文业务。手册从射电天文与社会的前言开始，简要介绍射电天文对社会的作用和益处，这些作用和益处常常延伸到天文学的范畴之外。手册随后谈及多个领域，如射电天文特性、观测的优选频段、特殊射电天文应用、易受其它业务无线电频率干扰（RFI）的弱点，以及与其它业务共用无线电频谱的相关问题。第三版手册加入了更多章节，包括关于消减RFI影响的技术、无线电宁静区（RQZ）的建立和特性、寻找地外理性生命（SETI）以及地面雷达天文学方面的问题。手册增加了新的附录来解释射电天文使用的单位和dB标度，还增加了一份全面的缩略语列表。

第二版《射电天文手册》发布至今已有近十年时间。在此期间，国际电联举办了三届世界无线电通信大会（WRC-2003、WRC-2007和WRC-2012）。

与此同时，通信业务出现了爆炸式发展，无线业务如今已在我们这个多联通的社会里实现了普及。在此期间，射电天文领域的技术发展实现了极宽频段的观测，这些频段经常超出了国际电联划分的范围。这些发展对射电天文的保护提出了挑战，因而必须探索新的方法。消减RFI的新技术还在不断发展中，通过在地球上设立RQZ，从而为射电天文提供一个特殊的区域，可以在最大可能减少干扰的情况下开展射电天文业务。这些发展已包括在国际电联新起草和广泛探讨的ITU-R报告中。

以2013年投入运行的南美ALMA天文台为例，射电天文现在也在275GHz以上的频段进行观测。这些频段不在国际电联的正式划分范围之内，但WRC-2012在对无源业务使用的这些频段进行阐述时，并未排除有源业务的发展。已有研究显示，业务间共用在这种高频下会相对容易。

就在WRC-2012之前，ITU-R 7D工作组（WP 7D）开始对《手册》进行修订，这项工作持续了两年多。WP 7D是ITU-R第7研究组（科学业务）内负责射电天文、SETI和雷达天文的工作组。在对《手册》进行必要的修订和扩展的同时，为保护射电天文业务，WP 7D还对相关的ITU-R建议书和报告进行了修订。《手册》第三版成功纳入了工作组成员的这些工作成果。

我想为下列人员开展的大量工作向他们致谢，没有他们的参与，《手册》不可能顺利完成。我特别感谢WP 7D的下列成员（按字母排序）：

- W. Baan博士（荷兰）、S. H. Chung博士（韩国）、A. Clegg博士（美利坚合众国），
- M. Davis博士（美利坚合众国）、T. Gergely博士（美利坚合众国）、A. Jessner博士（德国），
- G. Langston博士（美利坚合众国）、B. Lewis博士（美利坚合众国）、H. Liszt博士（美利坚合众国），
- M. Ohishi博士（日本）、P. Thomasson博士（联合王国）、W. van Driel博士（法国）。

其他参与编写的人员有：对甚长基线干涉仪（VLBI）部分进行大量重写的J. Romney博士（美国）、负责VLBI大地测量部分的J. Lovell博士（澳大利亚）以及修订太阳天文学部分的K. Tapping博士（加拿大）。ITU-R秘书处，尤其是第7研究组顾问Vadim Nozdrin先生和Elizabeth Mostyn-Jones带领的秘书处提供了大量帮助。最后我想衷心感谢第7研究组主席Vincent Meens博士和负责《手册》相关工作的副主席John Zuzek博士，感谢他们在这项工作期间提供的持续鼓励和支持。

我向所有参与编写的人员表示感谢，并预祝ITU-R编写的《射电天文手册》获得圆满成功。

ITU-R 7D工作组主席  
Anastasios Tzioumis

## 序言

《射电天文手册》由ITU-R第7研究组（科学业务）7D工作组的专家在7D工作组主席A. Tzioumis博士（澳大利亚）的带领下编写完成。

射电天文学在基础物理和宇宙学问题的研究中发挥着关键作用。许多现象无法在电磁频谱的其它部分中研究。仅举几个例子：中性氢原子的发射线；对宇宙学研究极其重要的宇宙微波背景辐射及其角结构；与射电星系相关的同步辐射的巨大区域；在光学频率被尘埃掩盖的恒星形成区域。利用无线电频率，有可能获得最高的角分辨率，并可对角位置、谱线及其多普勒频移进行最精确的测量。为此，射电天文远远不仅只是对传统光学手段的补充，它在天文和天文物理学很多领域开展的研究中发挥着主导作用。

此外，与任何基础科学一样，射电天文同时也在促进着其他分支学科的发展。低噪声接收机以及使我们能够用单一天线捕获具有不同偏振信号的天线的研发，正是射电天文学的功劳。在射电天文开发的消除无线电回波的方法正在被成功地应用于WiFi类移动通信系统。今天被应用于各种系统的无线电导航理论的基础，也是在射电天文获得发展和确认的。处理海量射电天文数据的需求，导致了自动化数据处理技术的重大进展，包括并行数据处理方法和新程序设计语言的开发。在医疗领域，射电天文导致了引进X光诊断和计算机控制X线断层扫描术。

上述所有这些都显示，对射电天文使用的频谱在国际范围内进行认可和保护，具有重要意义。本《手册》作为信息来源，为读者提供了无线电频谱使用管理方面的有用信息，以便把对这项重要业务的干扰降到最低。

无线电通信局  
主任  
弗朗索瓦·朗西





## 目录

	页码
第三版引言 ITU-R 7D工作组（射电天文）主席 .....	iii
前言 射电天文与社会 .....	1
0.1 天文学简介 .....	1
0.2 射电天文学的作用 .....	1
0.3 经济和社会价值 .....	4
0.3.1 引言 .....	4
0.3.2 射电天文研究的经济和社会价值 .....	5
0.4 太阳射电活动监测 .....	9
0.4.1 引言 .....	9
0.4.2 太阳射电活动监测概述 .....	9
0.4.3 影响和社会价值 .....	10
0.5 射电天文学的发展趋势 .....	12
0.6 结论 .....	12
第一章 引言 .....	13
1.1 无线电通信部门和世界无线电通信大会 .....	13
1.2 《无线电规则》和频率划分 .....	14
1.3 作为无线电通信业务的射电天文业务 .....	15
1.4 射电天文的频率划分问题 .....	16
第二章 射电天文业务的特点 .....	18
2.1 射电天文业务（RAS） .....	18
2.2 宇宙射电辐射的来源和性质 .....	18
2.3 连续谱辐射 .....	19
2.3.1 连续谱辐射的时变特性 .....	20
2.3.2 连续谱辐射的测量 .....	24
2.4 谱线辐射 .....	27
2.4.1 谱线类型 .....	27
2.4.2 谱线的测量 .....	28
2.5 现代实践 .....	30
2.6 结论 .....	31

	页码
第三章 射电天文观测首选频段.....	33
3.1 总则 .....	33
3.1.1 地面射电天文观测 .....	33
3.1.2 空间射电天文观测 .....	34
3.2 首选的连续谱频带.....	35
3.2.1 低频观测 .....	36
3.2.2 连续谱观测的高频带 .....	37
3.3 谱线观测的频带.....	37
第四章 射电天文观测的易受干扰性.....	42
4.1 引言 .....	42
4.2 计算干扰电平过程中的基本考虑.....	42
4.2.1 干扰有害程度的判据 .....	42
4.2.2 天线响应方向图 .....	43
4.2.3 平均时间（积分时间） .....	44
4.2.4 因干扰导致的时间损失率 .....	45
4.3 射电天文系统灵敏度和有害干扰门限值.....	45
4.3.1 理论考虑 .....	45
4.3.2 灵敏度和有害干扰电平的估算 .....	46
4.4 干涉仪和天线阵列对无线电干扰的响应.....	48
4.5 脉冲星 .....	54
4.6 达到的灵敏度.....	54
4.7 关于干扰的讨论.....	55
4.7.1 干扰电平 .....	55
4.7.2 来自天体的干扰 .....	55
4.7.3 地球静止卫星上发射器的特殊考虑因素 .....	56
4.7.4 滤波 .....	57
4.7.5 能够破坏射电天文接收器或使其饱和的干扰电平 .....	57
4.8 蒙特卡罗分析.....	57
附件 1 ITU-R S.1428建议书中的旁瓣模型 .....	59
第五章 与其它业务共用射电天文业务频段.....	61
5.1 概述 .....	61

5.1.1 射电天文业务 (RAS) 的保护标准 .....	61
5.2 与单一发射机共用所需的隔离距离 (见ITU-R RA.1031建议书) .....	63
5.3 在视距内共用 .....	64
5.4 与具有地面发射机的业务共用 .....	65
5.5 与移动业务进行共用 .....	65
5.6 低于40GHz射电天文频段内的共用 .....	66
5.6.1 1 330-1 427 MHz频段 .....	68
5.6.2 4 800-5 000 MHz频段 .....	68
5.6.3 22.01-22.21和22.21-22.5 GHz频段 .....	68
5.7 40 GHz以上射电天文频段的共用 .....	69
5.7.1 60至275 GHz的共用 .....	69
5.7.2 275 GHz以上的共用 .....	69
5.8 与深空研究的共用 .....	72
5.9 分时 .....	72
5.9.1 分时和频率共用协调 .....	73
第六章 其它频段发射机对射电天文的干扰 .....	74
6.1 引言 .....	74
6.1.1 《无线电规则》中的定义 .....	74
6.1.2 附加定义 .....	74
6.1.3 其它频段发射机的干扰机制 .....	75
6.2 来自有源业务的无用发射限值 .....	76
6.2.1 杂散发射域内的限值 .....	76
6.2.2 OoB发射域中的限值 .....	77
6.2.3 用来保护射电天文频段的有源业务无用发射限值 .....	77
6.3 射电天文接收机的性能 .....	79
6.3.1 带边干扰的过滤 .....	79
6.3.2 非线性效应和互调 .....	81
6.3.3 线性 .....	82
6.3.4 滤波和数字化 .....	82
6.4 其它频段业务发射机的干扰 .....	83
6.4.1 通过邻近频段和谐波机制可能对射电天文造成干扰的业务 .....	83

6.4.2	向数字TV的过渡及其对射电天文业务未经保护使用地面TV广播频段的影响 .....	83
6.4.3	卫星传输的干扰 .....	87
6.5	宽带调制的无用发射 .....	92
6.5.1	宽带调制的使用 .....	92
6.5.2	减少无用发射的脉冲成形 .....	93
6.5.3	宽带调制的干扰示例 .....	93
6.5.4	示例: IRIDIUM (HIBLEO-2) MSS系统的无线电干扰 .....	94
6.6	结论 .....	97
第七章	特殊技术、应用和观测地点 .....	98
7.1	引言 .....	98
7.2	包括空间VLBI的VLBI .....	99
7.2.1	空间VLBI .....	99
7.2.2	采用VLBI的大地测量学应用 .....	102
7.3	太阳-地球拉格朗日点L <sub>2</sub> 上的射电天文 .....	103
7.4	在月球屏蔽区开展射电天文观测 .....	104
7.4.1	月球屏蔽区 .....	104
7.4.2	在月球进行观测的首选频率范围 .....	105
7.4.3	月球屏蔽区的利用规则 .....	106
7.5	低大气吸收台址 .....	106
7.5.1	南极洲 (Antarctica) .....	107
7.5.2	智利的Cerro Chajnantor .....	107
7.5.3	夏威夷的Mauna Kea .....	107
7.5.4	亚利桑那州的Graham山 .....	107
7.6	脉冲星观测及作为时间标准的应用 .....	107
7.6.1	作为标准时钟的脉冲星 .....	108
7.6.2	作为参考坐标参照体的脉冲星 .....	108
7.7	太阳监测 .....	108
第八章	干扰的缓解 .....	111
8.1	引言-目标 .....	111
8.2	RFI源的特征及其影响 .....	111

	页码
8.3 RFI缓解方法 – 分层次缓解.....	112
8.4 积极主动方法 – 改变RFI环境.....	113
8.5 预检测和后检测.....	113
8.6 预相关 .....	114
8.6.1 基于天线的数字处理 .....	114
8.6.2 自适应（时间的）噪声抑制 .....	114
8.6.3 空间滤波和零点控制 .....	115
8.7 相关阶段.....	115
8.8 后相关处理（成像前或期间） .....	116
8.9 望远镜的应用 – 战略.....	116
8.10 结论 .....	117
第九章 无线电宁静区.....	118
9.1 引言 .....	118
9.1.1 无线电宁静区的定义及一般要求 .....	118
9.1.2 监管的作用 .....	118
9.2 发展RQZ时应做出的考虑.....	119
9.2.1 地理方面 .....	119
9.2.2 频率 .....	119
9.2.3 RFI对RAS观测的影响 .....	119
9.3 电磁环境.....	119
9.3.1 有意辐射体 .....	120
9.3.2 无意辐射体 .....	120
9.3.3 干扰信号的传播 .....	121
9.4 实现RQZ的方法.....	121
9.4.1 接收端方法 .....	121
9.4.2 发射端方法 – 管理 RQZ .....	122
9.5 建立RQZ的影响.....	124
9.5.1 RQZ的维护 .....	124
9.5.2 长期考虑 .....	124
第十章 利用射频观测搜寻地外文明（Seti） .....	126
10.1 引言 .....	126

	页码
10.2 SETI信号的可检测性 .....	127
10.3 信号强度.....	127
10.4 接收系统的灵敏度.....	128
10.4.1 最低可测信号功率.....	129
10.5 天线指向.....	131
10.6 信号识别和干扰抑制.....	132
10.7 需要搜索的候选频段.....	133
第十一章 地基雷达天文学.....	135
11.1 引言 .....	135
11.2 灵敏度问题.....	137
11.3 操作模式和带宽需求.....	137
11.4 雷达天文学设施.....	138
附录1 划分给射电天文的频段表 .....	140
附录2 射电天文台的登记 .....	144
附录3 射电天文学单位 .....	146
附录4 dB表的实际使用.....	149
附录5 首字母缩略语表 .....	151

## 前言

### 射电天文与社会

#### 0.1 天文学简介

天文学的研究对象是地球大气层之外天体的形成、演化、动力学以及其它特性，这些天体包括太阳及其行星、彗星、恒星、星系、空间中的弥漫物质以及宇宙本身。在好奇心的驱使下，天文学一直在寻求人类能够提出的最大问题的答案，例如“宇宙是如何开始的（或宇宙有开端吗）？”、“宇宙有多大？”、“宇宙的年龄是多少？”以及“宇宙如何终结（或宇宙会终结吗）？”作为一门解释我们及我们所在的行星在宇宙中位置的科学，天文学对于整个人类具有非常重要的文化意义。现在的许多发现，如黑洞、类星体等已经经常出现在人们的日常对话中。

从直观实际的角度而言，天文学为历法、守时系统等人类进步奠定了重要基础。实际上，很多日常的数学，例如三角函数、对数和微积分等都是天文研究的成果。此外，天文学还为统计学提供了很多依据。

天文学家在整个可用的电磁频谱范围内开展观测，观测范围远远超过了视觉或“光学”区域。每个频率范围都拥有独特的观察视角，且通常需要该频率范围专用的望远镜和探测器。射电天文学家研究的是在无线电频谱范围内特定频率上发射或吸收能量的天体：在地面上，研究工作可以在13 MHz至2 000 GHz范围内任何一处大气层完全透明的区域内开展。

除了为天文学本身做出实质性贡献，射电天文业务（RAS）还给其它科学技术领域带来了重大影响，形成了一系列源于自身活动的衍生产物。例如，RAS确定了电信行业特别关注的无线电波的大气吸收特性。RAS的各项开创性需求一直不断推动低噪接收器的开发工作。同样，RAS还在不断为卫星通信行业等其它业务的开发工作提供技术基础。RAS对于计算能力的强大需求推动了众多最早期电子计算机的发展，而它对于越来越高的灵敏度的追求，也为馈源系统和大型可控天线的设计做出了重大贡献。实际上，RAS对性能更佳仪器设备的不断需求一直推动着电子学、机械工程和计算机科学等众多领域的进步。

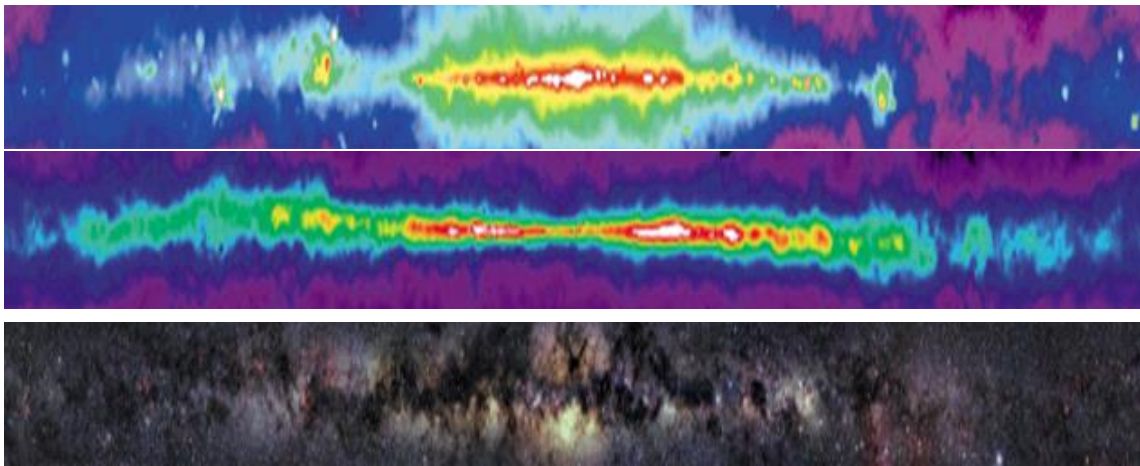
#### 0.2 射电天文学的作用

宇宙的一些组成部分只能借助其在无线电频率方面的特征进行研究。特别是宇宙中最为丰富的物质成分 – 中性氢（HI），它只能通过其在1 420 MHz频率处的谱线观测。值得注意的是，一旦绘制出HI在我们所在银河系中的分布情况（参见图0.1），便可以最终确定银河系的中心，清楚地绘制银河系的旋臂，而我们的位置则被确定为位于一个外侧的旋臂上。这些都是与人类息息相关的银河系环境的所有基本信息。射电观测可以对过去的光学工作进行必不可少的补充，这是因为在光学波长，银河中心会被星际尘埃所遮挡，然而，通过容易测量的HI发射线的多普勒频移，则可以确定银河系沿视线方向的分布情况。通过绘制我们所在

银河系的连续辐射，一旦确定了银河系中心的准确位置，便显示出该中心恰好是一个极强的射电源，近期的近红外（NIR）工作已经证明该处是一个超大质量的黑洞。这个典型的例子说明，射电天文既是整体天文研究必不可少的部分，同时又可以为电磁频谱范围内其它波长处的观测结果的补充数据。

图 0.1

银河中心位于居中位置的银河系中央平面。上图展示了480 MHz频率处的射电连续结构。中图展示了1 420 MHz频率处的中性氢原子累积发射。下图则展示了光学波段的中央区域及其暗尘结构。



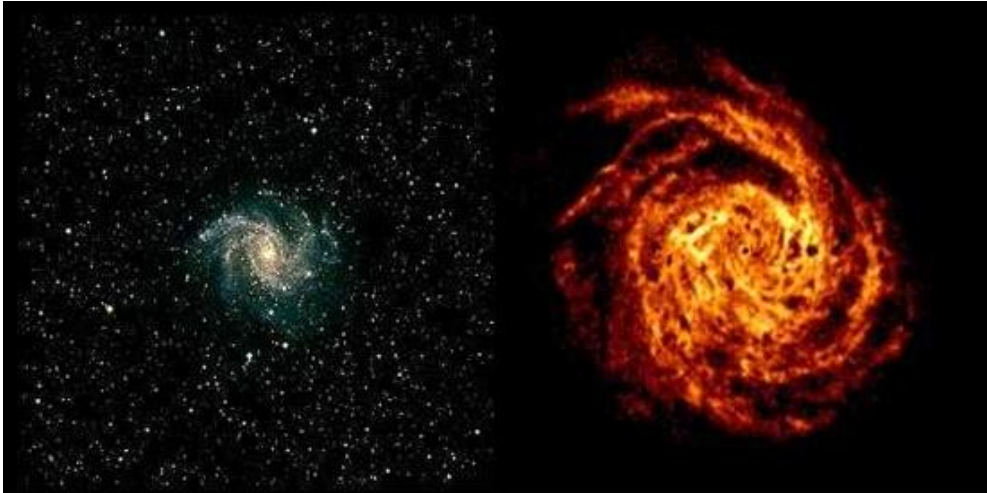
Radio-Astro\_01

从光学照片中可以看到，除了我们所在的银河系外，太空中还存在大量其它星系。由于HI是这些星系中数量丰富的组成成分之一，因此很容易在银河系附近的星系中探测到HI，并且可以相应地研究每个星系的退行速度和内部运动。这样一来，便可以了解它们在太空中的三维分布情况，并准确地估算它们的质量。然而，光学和NIR设备用于研究星系的多种特性，同时需要无线电技术来研究它们内部的气体分布情况。图0.2通过从尺寸对比的角度比较了光学图像中看到的附近亮星系与HI发射谱所展现的更大星系结构，很好地说明了这一点。然而，115.271 GHz频率的一氧化碳（CO）观测结果则显示出完全相反的结果，观测显示，CO主要向中心位置集中。HI和CO所展示的分布图之间的差别是恒星中的氢发生核燃烧的结果，燃烧过程会产生碳（C）、氧（O）等质量较重的元素，这些元素会在星际空间中消散。鉴于在星系中心区域内，恒星的密度是最大的，这一现象亦适用于它们的衍生产物。



图 0.2

NGC 6946星系可见光（左图）及1 420 MHz频率处中性氢<sup>1</sup>（HI）谱线发射（右图）相同尺度的正向图。通过中性氢发射显示的大尺度旋臂结构远远大于光学图像，揭示了星系的动力学特性。在许多位置（特别是分布图中的“空洞”）的高速气体喷流与正在进行的恒星形成相关。射电数据来自荷兰的Westerbork综合孔径射电望远镜



Radio-Astro\_02

通过早期开展的不同无线电频率处的天空连续谱巡天，已发现了许多射电源：随后便展开了一场寻找这些射电源的光学对应体的竞赛。在这些最显著的惊人发现中，有一项便是在某些星系的两侧近乎等距的存在成对的射电源。这意味着，光学图像所示的这些星系中存在着与这些星系相关、但又与之距离很远的巨大射电发射区域。随着设备技术不断进步且研究活动逐步推进到较高频段，现在已经明确这些发射区域是从星系核发射出的高相对论性喷流的残余部分。而这也是类星体的一个特征，所谓类星体，现在已确认为在其宿主星系中心位置处不断吸积质量的超大质量黑洞。相对论性喷流是现代天文学里经常出现的一个话题，其研究往往需要用到无线电技术，原因在于人们现在还未完全理解相对论性喷流背后的物理原理，而且只要致密天体发生活跃的吸积质量过程，无论是该物体是一个超大质量黑洞、恒星大小的黑洞、中子星或甚至是普通恒星的简并内核，都会发生相对论性喷流。

在我们将宇宙作为一个实体进行了解的过程中，射电天文学家做出了重大的贡献。其中最早的贡献当属1964年发现近乎各向同性的宇宙微波背景（CMB），这一发现赢得了1978年的诺贝尔奖，这是该奖第二次授予射电天文学家。在30至300GHz频率间的天空连续谱观测显示，CMB具有2.73 K的亮温度。CMB源自“大爆炸”之后立即充满整个宇宙的电离气体的热辐射；也就是从那时起，宇宙开始处于对于无线电辐射的不透明状态。CMB是人们

---

<sup>1</sup> Boomsma, R., Oosterloo, T. A., Fraternali, F., Van Der Hulst, J. M., Sancisi, R., 《天文与天体物理学报》，490, 555（2008年）。

能够观测得到的最早的“古老”信号。伴随着这一发现，“大爆炸”理论成为一种公认的宏观宇宙演化理论，排除了宇宙学中的稳态宇宙论。1992年，使用卫星搭载仪器开展的一项CMB全天巡天，探测到了地球/太阳/星系相对于CMB的运动带来的多普勒效应以及CMB的亮温度存在微小的点对点变化（仅有百万分之几）。这些里程碑式的测量结果赢得了2006年的诺贝尔奖。到目前为止，通过大幅提高用于描述宇宙特性的宇宙学参数的精确度，并提供独立证据证明宇宙的扩张速率在不断提高（这一点是最初未预料到的），在微小结构方面取得的更加灵敏的测试结果已经开启了精确宇宙学的全新纪元。未来的卫星发射任务将有望探测出CMB的偏振特性。现在，我们把话题从宏观转向非常小的中子星。

在中子发现不久之后，1934年人们即预测了中子星的存在。1967年，探测到快速发射脉冲的射电源（脉冲星），这一发现赢得了1974年的诺贝尔奖，这是诺贝尔奖首次授予射电天文学家。脉冲星所带来的重大机遇之一是它如同基础物理学的空间实验室。一组飞快旋转、周期以毫秒计的特定脉冲星可被作为高度准确的时钟使用。其中一些脉冲星围绕某一伴星做轨道运动，当有一个准确的时钟围绕伴星近轨运行时，无论该星是中子星、白矮星还是较为普通的恒星，都可以计算得出精确的轨道数据和脉冲星质量，并且可以对广义相对论理论的多项预测进行广泛测试。利用广义相对论，描述了双星系统中发现的首颗脉冲星的轨道演化，为引力波辐射的存在提供了首个证据，相关工作获得了1993年诺贝尔奖。1992年，首颗太阳系外行星的发现便是根据其对脉冲星计时解决方案的影响而确认的。

中子星所适用的物理学原理会随其质量而变，因此，脉冲星的质量越高，用于描述其核物质的方程式便越复杂。大多数脉冲星的质量都接近1.4个太阳质量（钱德拉塞卡极限）。很显然，人们对于发现质量为两个或更多个太阳质量的天体拥有浓厚的兴趣，这是因为此类天体可能会受到其核心处多种奇异物质物质的影响，所以仅它们的存在便意味着不可能有描述它们的状态方程。现在还没有其它手段能够对可适用的物理学进行测试。同样，以其它方式无法验证的物理学可以通过一种非常罕见的脉冲星 – 磁星的观测数据进行测试。磁星拥有我们完全无法在实验室里制造出来的强磁场。在一个不同的前沿研究领域，目前正在开展一项覆盖面极广的全球性活动，以期通过整个天空中毫秒脉冲星的计时观测结果，直接探测到纳赫兹频率范围内的引力波。

## 0.3 经济和社会价值

### 0.3.1 引言

通过简单对比其他用途量化成本和效益的方式，很难评估无线电频谱用于科学研究及其应用的经济价值。同时，还必须考虑到射电天文对经济的衍生影响。射电天文学家进行的技术创新已在使整个社会受益的多种应用中得到广泛实施。例如，射电天文接收机研究的衍生成果（见第0.3.2.1段），在专业的电信设备以及批量生产的消费者应用软件中均有应用。同样也很难估计最初来源于射电天文成像技术的医学成像算法的经济和社会效益（见第0.3.2.4段）。

### 0.3.2 射电天文研究的经济和社会价值

射电天文学的发展取决于接收机和数字技术的进步。通常，射电天文设备使用最先进的技术，天文学家在最大限度实现这一目标中发挥着积极的作用。下文各小节举例介绍了已纳入具有其他社会价值应用的射电天文研究活动。

#### 0.3.2.1 电信技术

##### 接收机系统

射电天文系统包括高增益天线、低噪声接收机、固态振荡器和倍频器。参量放大器、低温冷却的砷化镓场效应晶体管放大器、HEMT放大器和SIS混频器等的开发都受到射电天文学需求的促动或影响。这些发展已使得接收机可以再在极宽带宽且温度低至2 K 状态下工作。目前，在一些频率实现的噪声温度已接近技术上可能达到的量子极限。一些最尖端的深空电信系统使用这些技术，其本地振荡器按照原子频率标准实现亚皮秒单位的时间同步。这些标准用作地面和空间导航系统守时系统的支撑体系。

##### 保型原理

设计具有高精度反射面的超大型可动抛物面天线的主要障碍是重力变形，当天线从一个位置移向下一个位置时，重力会改变天线的形状。这一问题已在1967年借助保型原理得到解决<sup>2</sup>。根据这一原理设计的天线在重力作用下沿抛物面逐渐变形，焦点位置也会发生相应的变化。只要确保接收机及其馈源跟踪不断变化的焦点位置，就可最大限度减小重力变形和随之发生的信号损失的影响。目前所有大型抛物面反射天线都采用这种保型设计。在毫米波长工作时，这一点至关重要。

##### 天线技术

射电天文学家是首先使用圆偏振喇叭馈源的。随后卫星发射机使用这种技术，通过同一喇叭馈源独立发送两种偏振信号，节省了整体重量和空间。

#### 0.3.2.2 干涉测量技术

射电天文学家发展了干涉测量方法，来提高角分辨率，同时作为成像技术。然后，他们利用这种方法制作射电天空的数字化单像素巡天图。第7章介绍了这种技术，这项技术在天文学整个电磁（EM）波谱以及纤维光学、工程计量学、光学计量、海洋学、地震学、量子力学、核与粒子物理学、等离子体物理学和遥感等领域已变得十分重要。

---

<sup>2</sup> Von Hörner, S.: “大型可动天线的设计（Design of large steerable antennas）”，《天文学杂志》（The Astronomical Journal）第72期（1967年），第35页。

射电天文学家也是最早开发从图像中移除（大部分）设备和环境影响的图像重建和净化技术的。这些方法用于地面和星载设备的巡天，以及由卫星地球探测业务（EESS）用于地球探测。

20世纪后半叶，无线电干涉测量系统已广泛用于协助飞行器的自动着陆。事实上，该系统最初是由射电天文实验室开发，而后才公开销售的。目前同一技术已用于手机用户定位，以便紧急服务机构向事故现场提供快速响应，以及提供有针对性的营销和其他位置相关服务。Wi-Fi无线网络是操作系统的一个突出例子。

## Wi-Fi 应用

反射是在计算机终端之间建立无线连接的主要难题，原因是接收机收到发射的信号时会产生一系列的回声。这个问题对射电天文学家来说是众所周知的，他们开发了信号处理技术来克服大气中反射现象造成的类似问题。无线局域网在不同频率发送数据，这些信号以与射电天文相同的方式在接收机重新调制。

## 导航

随着时间的推移，天文学对地面和空间导航做出重要贡献。水上导航无线电六分仪的发展实现了在阴雨天准确定位。最近无线电干涉测量技术一项应用，是关于多点定位的手机紧急定位，它是以附近天线杆收到的信号强度为基础。通过准确计算一物体发射的信号到达三个或以上接收机（TDOA）的时差，可以对该物体精确定位这，亦可通过测量三个或以上发射机发射信号的TDOA用于定位接收机。

### 0.3.2.3 计算技术

射电天文学家开发了最先进的数字技术来相关和记录望远镜数据。现代的大功率（并行处理）计算机阵列用来处理干涉测量网收集的海量数据。多波束同时合成、RFI实时消减和复杂射电源结构的重建是现代处理能力的示例。事实上，实时相关来自四大洲天线干涉数据所进行的射电天文数据处理，已被用作开发宽带数据网络能力的测试案例。

## 计算机语言 FORTH

射电天文学显著的衍生成果是美国国立射电天文台（NRAO）于20世纪70年代初开发的计算机语言FORTH（或Forth）。Forth的首个应用就是用于NRAO一台望远镜的控制和数据处理。现在Forth语言用于多种应用，如联邦快递人员携带的首款手持电脑，目前在新版本中仍继续使用。其他应用包括卫星跟踪软件和用于航天飞机上由加拿大制造、50英尺长六个关节机械臂的模拟软件。这已用于卫星部署和恢复操作，以及帮助宇航员完成维修任务（如维修和升级哈勃空间望远镜）<sup>3</sup>。

---

<sup>3</sup> 欲了解有关Forth使用的更全面的信息，可参见：<http://www.forth.com/index.html>。

#### 0.3.2.4 医疗技术

射电天文学家开创了实现从一维扫描重建两维图像、从两维扫描重建三维图像的数学方法<sup>4</sup>。这些图像重建技术已纳入现代CT（计算机断层扫描）、PET（正电子放射断层造影）扫描和磁共振成像。远距离宇宙天体的射电观测主要是测量这些射电源的温度。通过对这项技术进行调整，可用于以非侵入的方式测量人体组织的温度。

CT是一种医学成像方法，利用数字计算机可将围绕单个旋转轴拍摄的大量两维X射线图像生成一个物体内部的三维图像。

深层组织微波图像出现的恶性肿瘤是温度异常的区域，可很容易地检测到。微波热成像用于检测乳腺癌，真阳性检出率为96%。

#### 皮肤癌

天文学家研究恒星与星系的主要挑战之一是从混杂的信号中提取有意义的信息。由于射电天文学家是最早处理数字数据的天文学家，他们开发了用于从随机的噪声背景中选出微弱信号的算法。这些算法帮助其他天文学家精确找到许多微弱的X射线源，并以定量的方式分析它们的结构。

这些技术也适用于背景噪声中隐藏了重要数据的许多其他情况。在德国宇航局的支持下，射电天文科学家在与医生的一次合作中开发了用于皮肤癌的早期识别系统。通过皮肤颜色的微小差别，就可检测和测量与最恶性的皮肤癌恶性黑色素瘤相关的不规则细胞生长。

#### 数字化射线摄影

数字成像技术也适用帮助测量星系团的X射线发射，测量的数据对天体物理学家发展，以及宇宙学和宇宙早期演化相关的理论非常重要。

而后这项技术还用于设计数字射线摄影系统，以改进医院射线超声检查的功效、灵活性和成本效益。通过消减X射线和其他图像采集程序中胶片的费用，降低了医院和急诊室运营成本。利用这项技术，以标准方式进行的射线超声检查，使得现在的身体图像存于计算机内存而不是胶片上。医生（和/或患者）可立刻查看图像，方便的通过互联网以高保真图像传给远程专家。

#### 0.3.2.5 时间与频率标准

出于需要，甚长基线干涉测量（VLBI）团体发展了非常稳定和精确的时间标准和授时方法，授时方法的不确定度为 $10^{-16}$ 分之几秒。这些系统后来被商业开发，现用于卫星导航、航天通信和国防等目的。通过为国际测地与天体测量（IVS）服务的VLBI维护工作，全球卫

---

<sup>4</sup> Bracewell, R.N. 和 Riddle, A.C.: “射电天文扇形波束扫描转换（Inversion of fan beam scans in radio astronomy）”，《天体物理学杂志》（*Astrophys. Journal*），第150期，第427页。

星导航业务（RNSS）系统（GPS、Glonass、Galileo）的时间和协调系统与地球和宇宙相关联。

精确的人造时钟迎来了安全导航的时代。国际时间局不断探索制造更加精确的时钟，目前通过综合世界各地原子钟数据确定时间。但射电天文学家开展的毫秒脉冲星计时观测，是对国际原子时标准长期稳定性进行独立检查的最佳方式。计时观测是利用最稳定的脉冲星进行的，以最大限度减少沿视距方向星际介质电子成分长期变化的任何影响，而且最大限度地减少单个脉冲星的异常表现。也可通过对比双星系统中毫秒脉冲星的计时观测结果与系统轨道参数的符合程度，独立地检查国际原子时标准的长期稳定性。

### 0.3.2.6 地球探测

利用射电天文干涉方法开发的无源遥感技术，现在已用于测量地球大气温度以及确定其它表面特性，如水蒸气的分布、云水含量、降水量以及一氧化碳等其它杂质的含量。

根据热微波辐射监测森林火灾基于相同的技术原理。

### 0.3.2.7 测地学

虽然开发VLBI技术的目的是收集有关天体详细结构和位置的数据，但该技术亦用于许多其他用途。因此，精准测量的遥远类星体和射电源的VLBI位置可为人类提供最精确的空间参考坐标系。利用天体作为参考点，地面VLBI就可测量望远镜在地球上的固有运动，如由于大陆漂移或断层构造板块滑移造成的运动。这些测量结果有助于估计发生地震的可能性。目前已成立了国际甚长基线干涉测地与天体测量服务组织（IVS），提供支持测地、地球物理和天体测量研究和操作的服务<sup>5</sup>。地面VLBI技术和精确的多普勒跟踪亦用于太阳系内高精度空间导航任务。因此，在ESA惠更斯号探测器进入土星卫星Titan（土卫六）大气层时就对其位置进行了精确跟踪。

### 0.3.2.8 采矿技术

第0.3.2.4段所述的成像技术亦可直接用于石油和矿藏的地下矿床勘探。地震仪阵在一系列小型的表层爆炸后进行测量，可以类似的方式对获得的数据进行处理。

### 0.3.2.9 雷达天文学

雷达天文学不同于射电天文学，前者涉及无线电波的发射和接收。由于双向传播损耗的限制，雷达天文学主要用于太阳附近空间的天体研究。然而，这是唯一可用来探测小规模空间碎片的方法。雷达天文学的典型应用，就是探测和跟踪靠近地球或可能对地球产生影响的近地天体（NEO）（陨石和小行星），它提供了研究这些天体的最全面的手段。在此方面，雷达天文学提供了行星尺度的灾害预测和预防服务。此外，雷达可探测地球周围

---

<sup>5</sup> 见：<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/html>.

轨道中的空间碎片，从而使得卫星运营商可确保其航天器避开可能的碰撞。这也是研究小于 1 cm 空间碎片密度的唯一途径。

雷达天文成像技术（近场）还用于民用及军事应用方面的在轨航天器成像。

## 0.4 太阳射电活动监测

### 0.4.1 引言

太阳射电活动监测是射电天文学一个特别分支，在空间天气学研究中发挥着积极作用。它促进了空间天气预报工作，针对可能影响人类活动的太阳爆发事件及时告警。由于易受到太阳行为的影响，我们开始将“空间天气学”作为一门新的学科进行研究，即通过测量电磁辐射和太阳等离子体的活动研究近地空间状况。从中长期来看，太阳变化对气候的影响与火山作用和人类行为同等重要。从短期来看，由于太阳事件，特别是日冕物质抛射（CME）可能对空间、空中和地面技术基础设施造成的破坏，空间天气的作用也非常重要。在太阳活动极大期，CME 每天发生一次或更加频繁。

如果结合地基射电频谱仪与来自卫星的补充数据，就可在日冕物质抛射达到地球之前提早获得有关其质量、能量以及传播速度和方向的估算结果。从这些测量结果中，可以推断出干扰的严重性及其可能抵达地球的时间，从而可能消减对人类各种技术，如电信、星载导航系统、空间活动（卫星和载人飞行任务）、航空和电网等的不利影响。太阳活动亦可造成电力变压器逐渐老化、长距离管道的腐蚀，还会产生许多其他不利影响。巨型太阳耀斑是另一种低频随机发生的自然灾害，其影响也可能非常严重。如果不消减这类事件的影响，可对依赖于技术的人类社会造成严重的全球性混乱。1989年3月就发生了此类事件，大型耀斑造成超过 $10^9$ 美元的损失。现在，除非在其抵达地球之前采取适当行动，巨大太阳耀斑可能会造成更加巨大的经济损失。实际上，有人估计这类事件造成的损失可达 $2$ 至 $3 \times 10^{12}$ 美元，恢复时间需要 $2$ 至 $3$ 年，因为需要更换的许多设备部件（例如修复电网）太过昂贵，不可能储存备件。这种无法控制的风险突出了早期预警系统的重要性，这些系统依托持续进行太阳监测的设施，其中包括地基太阳射电望远镜。

监测太阳活动的方式有很多，其中一种就是计算太阳黑子数。射电测量具有下列优势：可在地面自动化观测，很少需要或不需人工干预，价格低廉。此外，有可能在很长的一段时间保持数据的校准、质量和一致性。

### 0.4.2 太阳射电活动监测概述

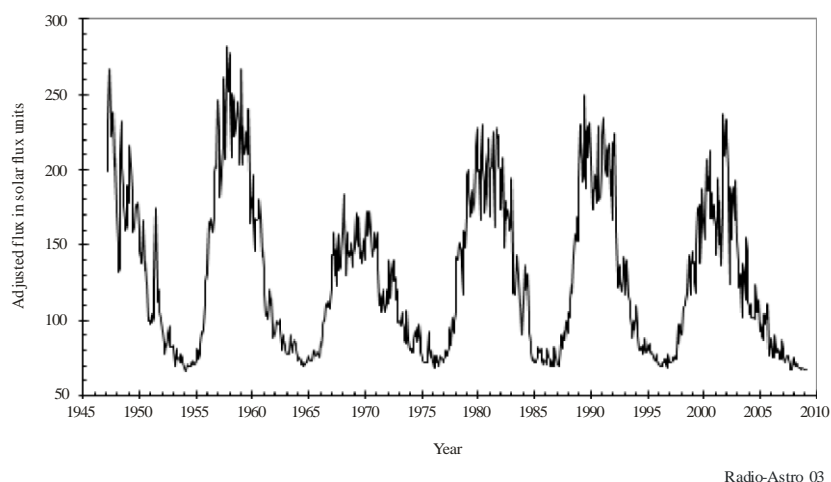
太阳的射电测量结果是太阳活动水平和性质的直接指标，亦可代替难以或无法准确和长期连续测量的其他参数。太阳流量监测设备是专门设计的射电望远镜，其天线足够小，可以同样的灵敏度“看到”整个太阳圆面，而接收机具有非常高的线性动态范围，来准确测量太阳流量。

相关研究显示， $2.8 \text{ GHz}$ （ $10.7 \text{ cm}$ ）的太阳射电流量与最近从空间平台获得的 UV 和 X 射线流量数据以及太阳风的一些参数高度相关。所有这些能量流量在加热上层大气中发挥直

接作用，而且由于自 20 世纪 90 年代起才开始获得空基测量数据，且无法保证未来长期的连续性，鉴于航天卫星的使用寿命有限，预测卫星的大气阻力以及轨道维护中使用的是 2.8 GHz 流量指标。2.8 GHz 频率最初是“偶然”选择的，尽管在厘米波段，太阳射电辐射缓慢变化或 S 成分中在约 10 厘米波长处有一个宽的波峰。然而，这只是太阳上各种过程产生的 0.5 至 10 GHz 连续辐射的一个样本。为了更好地了解辐射源，并改进长期“气候”替代性指标，有必要测量若干不同频率的流量。目前正在计划在欧洲、北美和日本使用新的流量测量设备以实现这一目标，但绝对测量只能在可用的 RAS 频段进行。

图 0.3

1947 年以来加拿大国家研究委员会观测的 2.8 GHz 太阳射电流量的年平均均值



### 0.4.3 影响和社会价值

太阳射电流量数据可做出贡献的主要领域分为两大类：环境和技术/基础设施。

#### 0.4.3.1 环境应用研究/监测

太阳射电辐射可用作所有对垂直温度结构和环境产生影响的辐射流量和高度在~80 km 以上大气（电离层）其他参数的替代指标。这些参数是使用各种环境传感器测量的，但为了形成建模环境，需要量化太阳驱动源。例如，将 2.8 GHz 太阳射电流量作为（经验型）输入，对一百公里以上的大气密度进行建模。

#### 0.4.3.2 技术/基础设施使用

在偶然的情况下，太阳辐射（特别是 VHF 频段的太阳辐射）的强度足以增加无线电系统（通信）的噪声电平从而降低系统性能。

### 太阳能对卫星产生的影响

卫星在充满太阳发射的高能粒子的环境中工作。就像航天器上电荷积聚产生的效应，这些粒子可导致电子设备暂时或永久性损坏，也可能创造扰乱卫星操作的假命令。低地球轨道



卫星也受到大气阻力增大的限制，大气阻力可改变其位置，提高其轨道衰减率。一些指标，如2.8 GHz的太阳射电流量，可以显示太阳活动的整体水平，用来预测上层大气的加热和膨胀程度以及对卫星轨道产生的影响。

## 电离层效应

由于太阳的作用，地球大气形成电离层，因此太阳活动的变化会导致电离层发生变化，如增强通信能力，或如果太阳X射线大幅提高D区电离作用的程度，则会导致持续若干小时的全面停电。由于电离层是非常重要的通信介质，预测电离层状况也非常重要：国际电联利用太阳射电数据判断当前电离层状态，并帮助预测短期可能的演化。

商用航空器在越过极地的长途航线中使用HF频段，原因是在高纬度地区（ $>82^\circ$ ）没有VHF频段的基础设施，而且地球同步卫星带接近地平线。由于在高纬度地区电离层扰动特别常见且非常棘手，需要对太阳射电活动进行测量，以预测极地电离层的状况，以便为航空公司提供充分的提醒，必要时调整飞行计划。

## 对地面系统的地磁效应

地球磁场的快慢波动都源于太阳风的速度和密度的变化，特别是太阳耀斑和CME期间喷射的等离子体团的影响。这些波动使电力线、管道、电话线和铁路轨道等长的金属结构中产生电流。电力线中产生的电流导致变压器运行状态偏移，如果变压器负载过大，会导致铁芯饱和，线圈过热。但诸如1989年3月13日的大型磁暴会产生更大的电流，导致变压器立即发生故障，就像加拿大魁北克实际发生的情况一样，造成配电网崩溃达九个多小时。由于此次基础设施故障造成的工业生产损失的经济影响约达 $10^9$ 美元。

图 0.4

因1989年3月13日太阳活动烧坏的配电网变压器



Radio-Astro\_04

铁路轨道中产生的电流可能会干扰信令系统和列车位置传感。产生的电流还会使管道金属中的杂质和焊接处产生小的潜在差异，从而加快阴极腐蚀。

管道可跨越几千公里，常遭遇不利地形和恶劣的气候，那里的检查和维护成本可能非常高，发生故障造成的损失可能更大，而且还会伴随严重的环境后果。因此，需要根据地磁活动建立检查和维护模型。

## 0.5 射电天文学的发展趋势

目前射电天文学的发展趋势是提高所有频率的灵敏度。由于许多频率上的现有接收机正濒临量子极限，目前倾向于不断增加天线接收面积和扩大观测带宽。现有的望远镜正在更新，以满足宽带接收机（频率从1至8 GHz）的要求，进行连续谱和谱线观测。目前国际上也在开展一些工作，以制造新一代、天线接收面积显著增大的射电望远镜。

例如：

- 1) 平方公里阵（SKA）项目的目标是建立一个天线总接收面积达一平方公里、基线达3000 km、在100 MHz至25 GHz频率范围工作的巨大射电干涉网；
- 2) 荷兰和邻近国家的低频阵（LOFAR）是天线接收总面积为100 000 m<sup>2</sup>、基线达1000 km、在30至250 MHz频率范围工作的射电干涉网；
- 3) 阿塔卡玛大型毫米波/亚毫米波阵（ALMA），包括64个在30至850 GHz频率范围工作的天线阵，它安装在安第斯山脉海拔5千米的高原上。

## 0.6 结论

射电天文学帮助我们发现了许多不可预测的全新无线电现象，如宇宙微波背景辐射、星际电离气体和等离子体以及脉冲星、类星体和黑洞。它还提供了许多验证基本物理理论（如广义相对论）的手段，同时还提供了其他手段难以实现的开展基础物理学研究的天然实验室。

射电天文业务使用的频谱具有相当大的社会和经济价值，尽管难以量化其带来的好处，原因是这些好处往往由整个社会共享，通常伴随于其他技术发展的应用中，而且往往经过非常长的时间才能实现，难以预见。RAS发展的技术在各种领域，如医疗诊断、电信、时间和频率标准、地球探测、计算、导航、地球物理学和采矿等，得到广泛应用。

许多RAS活动在国际层面开展，因此频谱相关问题必须在全球范围内加以考虑，片面的决定会对相关的频率使用和可能的测量结果产生全球性的影响。

太阳磁场的不稳定性可能产生强大的太阳耀斑，并导致日冕物质抛射事件的发生，直接导致许多电子技术和地球上的基础设施性能变差或遭到破坏，造成巨大的经济损失。60年来，从地面对太阳射电辐射进行的监测，提供了监测太阳活动一种可靠、连续和经济的手段。它是一种成熟的、已熟练掌握的技术，提供对于瞬发事件的及时预警。

## 第一章

### 引言

#### 1.1 无线电通信部门和世界无线电通信大会

本手册主要关注射电天文学与频率协调相关方面的内容，即通过达成不同无线电业务间的相互协议，以规则的方式使用无线电频谱，避免相互干扰。在国际范围内，频谱使用的规则由联合国专门机构国际电信联盟（国际电联）予以制定。

无线电通信部门（ITU-R）是国际电联的一部分，成立于1993年3月1日；它取代了国际无线电咨询委员会（CCIR）及其秘书处，后者直至当时一直行使类似的职能。ITU-R包括世界和区域级的无线电通信大会、无线电通信全会、无线电规则委员会、无线电通信研究组、无线电通信顾问组和由一名选举产生的主任带领的无线电通信局。

国际电联的《无线电规则》为频谱的规划使用奠定了基础，它是世界无线电通信大会（WRC）的结晶，该大会以前名为世界无线电行政大会（WARC），每隔数年举行一次。大会的宗旨是推出新的频谱使用要求，使之在尽可能广的范围内，获得与会国代表共同接受。每届WRC的成果以条约的形式体现，由与会的各国主管部门签署。每届WRC还为下届大会制定议程，并制定有关决议，决议常常呼吁研究组就未来议题开展研究。如同国际法的大多数领域一样，规则的执行并不容易，而且很大程度上仰赖于参与者的友好。每届WRC之前有大会筹备会议（CPM），就技术、操作和规则方面的事宜制定报告，提交大会审议。

无线电通信研究组（SG）由无线电通信全会设立。它们负责研究无线电通信技术、操作和规则/程序方面的问题，并制定有关的建议书草案。ITU-R研究组研究的领域包括不同业务的首选频段、不可接受的干扰门限电平、不同业务的共用问题、所需的发射限值等。它们也在自身的能力范围内，为CPM的议题报告草案提供输入意见。不同研究组进一步组成工作组（WPs）和任务组（TGs）以解决某些具体问题。ITU-R研究组目前（2013年）的架构如下：

第1研究组 频谱管理

第3研究组 无线电波传播

第4研究组 卫星业务

第5研究组 地面业务

第6研究组 广播业务

第7研究组 科学业务

除此之外，词汇协调委员会（CCV）与规则和程序问题特别委员会（SCRPM）负责就所有小组共同涉及的事宜开展工作。

更多有关ITU-R的信息以及有关研究组和工作组及其工作和文献的详细信息可见于ITU-R网站：<http://www.itu.int/zh/ITU-R/Pages/default.aspx>。

负责射电天文业务的7D工作组是ITU-R第7研究组（科学业务）内的四个工作组之一。第7研究组所包括的工作组还负责空间操作、空间研究、无源和有源遥感、气象以及时间信号和频率标准领域。寻找地外理性生命（SETI）、在地球表面开展的雷达天文业务以及空间研究业务的分支，在空间开展的射电天文业务也在WP 7D射电天文工作的范围之内。

研究组和工作组定期举行国际会议，通常每年两次，有来自许多不同国家的代表团参加。任务组在有限的一段时间内设立，实施具体任务，它们根据自身需要每隔一段时间开会。研究组及其工作组的工作方法在ITU-R第1号决议中有具体说明。通常，研究组和工作组需要对分派给它们的适当课题进行回应。对这些课题的回应通常以ITU-R建议书或报告的形式体现。

ITU-R建议书提供了技术、操作和规则/程序方面的信息主体，这些信息已获得参与的主管部门同意。这些信息也用来提供输入意见，编制成回应WRC具体议题的文献，研究组的许多工作成果也由此纳入《无线电规则》中。除此之外，ITU-R的建议书和报告自身也常常被视为频谱用户的权威指南。ITU-R建议书尤其如此，尽管它们不具备强制性的特点，但却得到广泛遵守，并定期进行修订和发布。第7研究组建议书和报告中有关射电天文的大部分重要材料构成了本手册的基础。

## 1.2 《无线电规则》和频率划分

WRC为《无线电规则》中定义的约40种无线电业务进行国际频率划分。参加WRC的有来自世界各地190多个国际电联成员主管部门的代表、许多电信和信息技术领域的公司以及公认的科学机构和国际组织。只有具有国际电联成员资格的主管部门可以提交提案并具有投票权，但其它组织可能通过其它手段对议项成果施加影响。对WRC如何运作以及射电天文学家如何参与有更全面的说明，参见Gergely [2012]。

为划分频谱，全世界被分为三个区域：1区包括欧洲、非洲和北亚；2区包括北美和南美；3区包括南亚和澳大利亚。对任一个具体的频段而言，不同区的划分情况可能并不相同。两种或两种以上的业务常常共用频段。一般而言，业务划分可能是主要业务或次要业务。主要业务可以对次要业务造成干扰，但是不允许次要业务对同一频段上的主要业务造成干扰。频率划分的情况包括在《无线电规则》的第5条中。多数划分都显示在划分表中，但也有其它一些划分载于划分表有编号的脚注中。

在一个国家内，频谱划分的事宜由政府机构处理，不同国家主管部门的划分可能大不相同。在许多国家，无线电频谱的行政管理是更大型机构工作内容的一部分，工作包括的其它领域可能还有邮政和电话业务、交通、贸易等。这些机构在确定WRC上主张的国家立场的工作中，发挥着主要作用。加入WRC条约的主管部门对该国境内的频谱持有主权，而且其

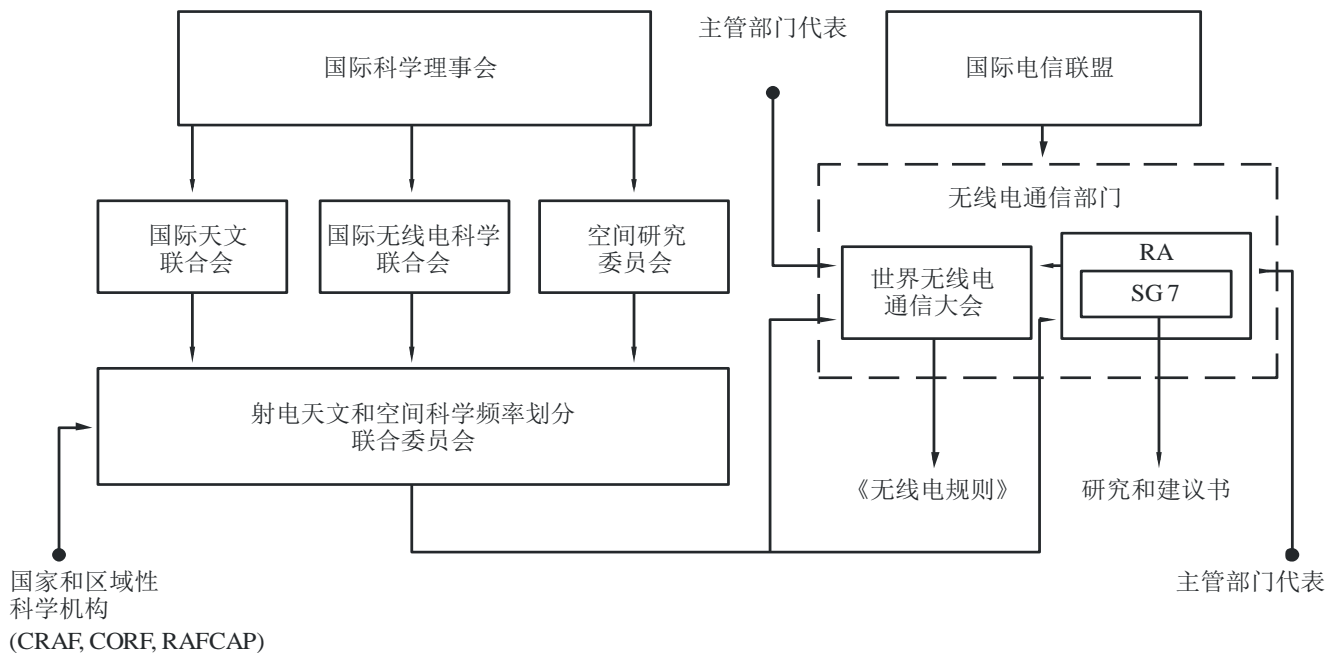
操作可以与国际规则有所不同，前提是不会因此在其它主管部门的领土内造成有害干扰。在制定《无线电规则》的过程中，许多主管部门都曾要求某些频段的例外，以满足该国的特定需求。

### 1.3 作为无线电通信业务的射电天文业务

在1959年世界无线电行政大会（WARC-59）上，射电天文首次正式认定为一种无线电通信业务。当时，在国际科学联合会理事会（ICSU）的支持下，由三个科学协会组成了一个委员会，即射电天文与空间科学频率划分联合委员会（IUCAF），作为在无线电频谱科学应用领域的代表。这三个创始协会是国际天文联合会（IAU）、国际无线电科学联合会（URSI）和空间研究委员会（COSPAR）；三个协会都是IUCAF的成员。IUCAF作为公认的国际组织参与WRC，但没有投票权。射电天文学家通过本国机构或IUCAF使无线电通信部门审议其关注的议题，或使其议题纳入WRC。除IUCAF外，国家和区域委员会（如美国科学院的无线电频率委员会（CORF）、欧洲射电天文频率委员会（ESF-CRAF）和亚太射电天文频率委员会（RAFCAP））也对射电天文学家的共同参与起到了促进作用。图1显示了参与射电天文频率协调工作所涉机构间的一些组织联系。

图 1.1

射电天文业务（RAS）频率协调所涉国际机构间的组织联系



RA: 无线电通信全会  
SG 7: 第 7 研究组

Radio-Astro\_11

名称（按字母顺序）：

CORF 无线电频率委员会

COSPAR 空间研究委员会

CRAF	射电天文频率委员会
RAFCAP	亚太射电天文频率委员会
IAU	国际天文联合会
ICSU	国际科学理事会
ITU	国际电信联盟
IUCAF	射电天文和空间科学频率划分联合委员会
RA	无线电通信全会
SG 7	第7研究组
URSI	国际无线电科学联合会
WRC	世界无线电通信大会

在《无线电规则》的第1条第1节中，射电天文定义为基于接收宇宙无线电波的天文学。在频率划分表中，为射电天文提供最大保护的频段是以射电天文作为主要业务进行划分、且只与其它无源（没有发射）业务共用的频段。提供次一级保护的频段是以射电天文作为主要业务进行划分、但与一种或多种有源（发射）业务共用的频段。如果是以射电天文作为次要业务进行划分，则提供的保护程度更低。

对于许多频段，有关保护的规定是在《无线电规则》的脚注里，而非直接出现在划分表中。脚注分几种。对于专门划分给无源业务的频段，《无线电规则》第5.340款脚注指出，频段内禁止一切发射。当划分表中的频段只有一部分是给射电天文时，使用的是其它脚注。当频段或频段的一部分不是划分给射电天文、但依然用于重要的天文物理观测时，使用的又是另一种形式的脚注。在为其它业务进行频率指配时，这些脚注可以督促主管部门采取所有可行的措施保护射电天文业务。尽管这种脚注并不提供法律保护，但当需要与其它业务进行协调时，事实证明它们常常对射电天文业务颇有价值。划分给射电天文业务的频段列于本《手册》的附录1中。

#### 1.4 射电天文的频率划分问题

射电天文的某些特性不同于使用无线电频谱的大多数业务。射电天文是一种无源业务，只关注数据的接收。少数其它业务，如卫星地球探测，也使用无源遥感。

射电天文的信号非常微弱，它的功率流量密度比多数其它业务要低许多个数量级（数十个分贝（dB））。射电天文所需的高灵敏接收系统极易受到干扰。这种弱点加上宇宙信号的特点，使得情况更不乐观。多数宇宙信号是以随机噪声的形式出现，不具备可使之区别于其它信号的调制特性。与有源业务共用频段的难度很大，通常只有当同一频段的射电天文天线和发射天线不直接在视线之内时，才有可能实现共用。更深一层的问题是，在其它频段运行的有源业务会在射电天文频段产生无用发射。随着宽带数字调制、超宽带和扩频技术的使用不断增多，这一问题越发显著。人们广泛使用没有执照的无线设备，如智能手机、平板电脑或手提电脑，这些设备易于携带或放置在射电望远镜附近区域，也使这个问题更加严重。由于这些对射电天文的潜在威胁，只遵守频率划分规定不足以保障射电天文观测不受干扰。

射电天文工作者不能任意选择工作频率。他们研究的许多宇宙信号是以谱线的形式出现，覆盖有限的频率范围。这些谱线在特定频率上生成，与原子或分子在不同能级之间的跃迁相关。因此，为观测这些谱线，划分的必须是它们的特定频率。过去，当其它业务没有如此频繁地使用无线电频谱时，曾为许多重要的谱线做过划分。人们持续探测到新的重要谱线，而其中许多不在已有的划分频段内。对于遥远星系的谱线，由于星系存在相对地球的大尺度运动，通常在射电天文频段内观测到的频率可能发生多普勒频移而转到频段外。因此，无线电频谱的所有部分实际上都有潜在的科学价值。但是，由于有源业务的频率划分，许多频率上的观测受到严重限制，或甚至无法进行。在某些情况下，通过为射电望远镜选择适当地点，或选择适当的观测时间，可以把干扰降到最低。对射电天文进行附加划分虽有必要，但由于多种原因难以实现。每届WRC都会制定下届大会的议程草案和再下一届的临时议程。因此，即便在最理想的情况下，也需要较长的提前期并持续开展工作，才能形成大会的有关议题。主管部门在提交未来议题的提案时，通常倾向于选择与其国家利益最迫切相关的提案，所以其它业务可能更受重视。即便有在该领域存在科学利益的主管部门支持射电天文的有关议题，这样的主管部门在国际电联相对较少，而国际电联要达成共识才能形成决定。

由于射电天文学家很难与有源业务共用频率，而且也无法任意选择频率，因此在频率划分和规则的系统里为射电天文找到一席之地并不容易。但是，无源业务受到重视，主要是因为划分给射电天文的一系列频段使众多重要的科学发现成为可能，也因为这些划分的频段继续对业务的存在发挥关键作用。

## 参考资料

Gergely, T. [2002] World Radiocommunication Conferences in “Spectrum Management for Radio Astronomy; proceedings of the IUCAF summer school held at Green Bank, W. VA, June 9-14, 2002, Eds. B.M. Lewis and D.T. Emerson, Charlottesville, VA.

## 第二章

### 射电天文业务的特点

#### 2.1 射电天文业务 (RAS)

射电天文及射电天文业务指基于接收宇宙无线电波的天文学，具体定义见《无线电规则》(PR) 第一条、第13款和第58款的规定。这些宇宙辐射的总量构成了通信工程中的宇宙背景噪声。作为一项无源业务，射电天文在划分的频段内并不发射无线电波，因此使用划分的频段时不会干扰其他业务。另一方面，与人造传输信号相比，宇宙射电辐射极其微弱，因此射电天文观测极易受到其他无线电业务的干扰。目前，射电天文使用1 MHz到约1 000 GHz频率的电磁波谱，这一范围主要是现有技术的局限决定的。理论上，全部无线电频谱对射电天文业务都均有科学价值。

1932年，Karl G. Jansky发现了来自地球以外的无线电波[Jansky,1935]，标志了射电天文学的诞生。如今射电天文学已成为观测天文学一个完备、重要的分支。在太阳系中，射电天文提高了我们对太阳（如等离子体射电辐射的物理过程）、行星和行星际空间的了解。在更大尺度上，宇宙射电辐射的多频研究使我们对星际气体云及其中恒星的形成过程、星际磁场、星系结构和演化以及整个宇宙的宇宙学参数有了更多认识。另一方面，原子和分子在固有频率的发射谱线向我们揭示了星际气体云的构成、运动和物理特征。射电天文获取的许多知识都是只能从无线电波长中读取的独一无二的信息。例如，中性氢原子是宇宙早期的元素，只能通过它在1 420 MHz的射电谱线进行探测，并且只能通过测量该辐射的强度和多普勒频移来研究其分布和运动。

在研究宇宙射电源时，射电天文学家测量电磁辐射的所有特性。这些特性包括强度、频率、偏振、方向（在天空中的位置）以及这些参数随时间的变化。宇宙射电辐射通常在地球上具有低功率流量密度。大多数辐射是随机噪声。例外的情况包括a) 脉冲星极其规律的脉冲发射；b) 小直径射电源的行星际和电离层闪烁；c) 一些恒星的不规则爆发（包括太阳）；d) 一些射电源在数月尺度上的变化，包括与伽马射线爆发相关的影响；以及e) 与木星相关的变化。观测射电源的最佳时机通常取决于自然现象，如射电源在天空的位置和地球的自转等。与有源（发射）业务相比，射电天文学家无法改变接收信号的特性和发射功率，也不能将信号编码提高其探测能力。关于射电天文探测仪器、主要成就、天体物理学解释等方面的综述文章，请参阅Burke and Graham-Smith (2002)。

#### 2.2 宇宙射电辐射的来源和性质

一些独特的机制会产生宇宙射电辐射。任何温度高于绝对零度的物体都会发射热辐射。热等离子体、中性气体（星际气体云、恒星的炽热包层等）和固体尤其会产生热辐射。此外，宇宙微波背景辐射被认为是宇宙演化初期炽热气体残留的热辐射。另一方面，非热辐射主要指相对论电子在磁场作用下沿螺旋轨道运动时产生的同步加速辐射，这包括回旋同步加



速辐射、电子回旋脉泽辐射以及等离子体波辐射。最后，原子和分子的能态发生跃迁时也会产生谱线辐射。

在频率领域，这些过程产生两种特性的辐射，即宽带连续谱辐射和窄带谱线辐射。

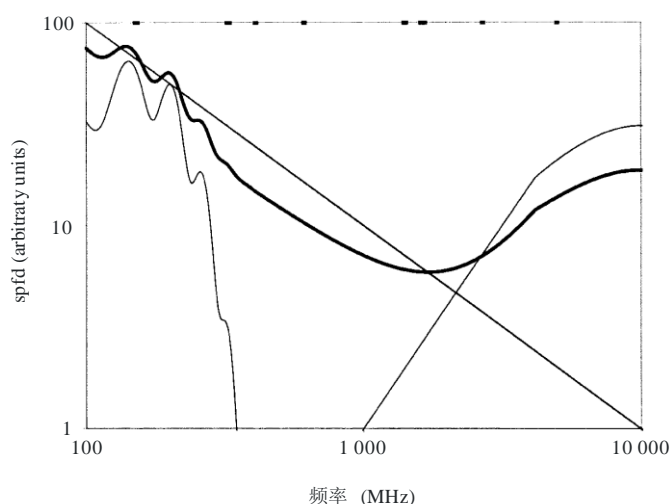
### 2.3 连续谱辐射

多种射电发射源能发射连续谱辐射：即在大部分射电频谱上延展相对平缓的辐射。总体而言，与热辐射源相比，非热辐射源的强度与频率之间的相关程度表现不同。这种相关性可能受到辐射源与观察者之间气体和尘埃的影响。对天空的连续谱观测显示，在宇宙广泛的背景上，叠加了许多分立的射电源。宇宙几乎各向同性的背景亮温度为2.73 K，它来自于宇宙气体首次对于射电发射不透明时的热辐射。这种频率在30至300 GHz辐射的细微角结构，使人们可以了解宇宙的密度和其他参数。测量这些参数时需要探空气球和卫星搭载的辐射计 [Smoot et al., 1992; Bennet et al., 2003; Planck collaboration et al., 2011]和具有干燥大气环境的地面台址 [Pryke et al., 2002]，以便将地球大气的干扰降至最低。宇宙射电背景中还包含与我们银道面相关的强烈脊形辐射，辐射的峰值来自银河系中心的方向。在一些方向，辐射爆发会穿越银道面。一般而言，银河系辐射通常是非热辐射，但是界定银道面的银脊也包含来自等离子体气体的热辐射。

天空中许多方向的连续谱辐射是不同物理机制组合的结果：如图2.1中的频谱所示。需要在多个频率上观测才能得到这一频谱，进而估算涉及的辐射机制的组合，从而确定辐射源内部和周围的物理环境。

图 2.1

一个射电源的连续谱



频谱功率流量密度 (**spfd**) 在图中为频率的函数。左边曲线代表等离子体辐射，左上角至右下角的斜线代表同步加速辐射，右边曲线代表热辐射。粗线代表观测到的光谱。不同辐射源的四种辐射相对强度变化很大。为射电天文划分的频谱（最高至**10 GHz**）见本图最上端标注。

Radio-Astro\_21

大多数在银道面外分立的射电源都位于银河系外部。经光学手段确定，这些射电源主要是位于天空中分布较为随机的遥远星系和类星体中的非热辐射源。这些辐射源的射电观测得到如下模型：具有大质量中心物体的活动星系核（ANG），中心物体可能是一个黑洞，周围被吸入气体并向外喷射高能粒子喷流的吸积盘环绕，这些高能粒子与磁场相互作用，生成射电发射的广阔区域。下射电发射。另一方面，银道面外几度范围内的大部分天体都属于银河系，这些天体包括与电离氢区（HII区）相关的热辐射源，或者恒星（包括太阳），或者行星以及与超新星遗迹（恒星爆炸后物质膨胀延展形成的天体）相关的非热辐射源。人类已经观测到来自电离氢区和超新星遗迹的射电发射。

观测银河系外和银道面上的射电源（包括背景和超新星遗迹）所获得的非热辐射通常呈部分线偏振。这种辐射是同步加速辐射。由于电子固有偏振方向与磁场偏振方向垂直，当电子在磁场中旋转（并因此加速）时，会产生线偏振辐射。因此，宇宙射电辐射中的偏振预示着相关磁场存在极强的规律。对超新星遗迹偏振辐射的研究，揭示了超新星遗迹与周围星际磁场之间的相互作用。但是，电子固有偏振方向经常与观测到的方向不同，因为电子在经过辐射源和地球之间的多个磁场时，偏振方向会受到磁场中电子的影响产生法拉第旋转。由于法拉第旋转与频率的平方成反比，可在一定频率范围上使用偏振观测对法拉第旋转进行测量。因此，法拉第旋转研究成为研究星际介质中电子密度和磁场的有力手段。

一些天体物理学感兴趣的现象只能在30 MHz或更低的频率下观测，例如银河系前景电离气体吸收连续辐射、射电星系和类星体内的自吸收，以及星系群中稀薄等离子体发射的低频辐射等。

### 2.3.1 连续谱辐射的时变特性

连续谱发射随时间变化是一种相对常见的现象。这种变化可能呈现为不同的形式：持续时间从数亚纳秒到数小时不等的爆发、重复周期在若干毫秒到若干秒之间的脉冲发射、几个星期或几个月才发生一次的非周期性变化或者是周期性的正弦变化。

太阳是多种射电能量短期爆发的一个典型天体。太阳爆发帮助人们了解了许许多多与之相关的等离子体物理学过程的重要知识[McLean和Labrum, 1985年]。在低于300 MHz的频率范围内，这些爆发最为强烈。此外，太阳大气层内扰动引起的爆发会在其持续时间内随频率增高而逐渐增强。人们在其他恒星也曾观测到相关的射电和光学耀斑，同时，太阳的行星之一木星也是一个强爆发源，木星爆发偶尔会在30 MHz以下的频率发生[Roberts, 1963年]。

除了来自盘区的恒定热发射和上述爆发，木星还有一种特殊的辐射变化形式，这是因为木星的磁层有范艾伦带。这些范艾伦带产生了偏振的非热同步加速发射，且该发射具有极高的亮度并集中朝向木星赤道带。由于木星的磁轴偏离其旋转轴，因此，从地球上观测到的木星非热发射的强度和偏振方向会随木星旋转而发生正弦变化。

带有强磁场的白矮星通常会在高达若干GHz的频率上发生强烈射电耀斑，这一现象有助于研究其大气层中的等离子体。

地球的电离层和太阳系的行星际介质，可能会导致观测到的小角径源的射电发射以最高可达若干赫兹的频率闪烁。根据该闪烁的特性，可以得出发射源的大小、不均匀性的详细情

况以及行星际介质的运动情况。虽然有一些脉冲星也可以观测到闪烁现象，但这种闪烁是由星际介质，而非行星际介质造成。

部分射电源（特别是类星体）的射电发射会以若干星期为周期发生变化。通过光学手段证认的天体，例如超新星和新星，以及X射线发射源的射电发射会随其光学亮度的变化而发生改变。

天体物理学领域内最有趣的脉冲辐射源也许当属脉冲星。人们在1967年发现了脉冲星极为规律的脉冲发射[Hewish等人, 1968年]。脉冲星是一种几乎完全由中子（即极端凝聚态物质）构成的恒星，大部分已知的脉冲星都位于我们所在的银河系，它们的脉冲周期在1毫秒到8秒间不等。脉冲星的脉冲周期是由其旋转情况决定的，而脉冲的持续时间则取决于观测者视线方向与脉冲星旋转轴之间的角度，该时间通常为脉冲周期的百分之几。脉冲发射通常可在30 MHz-3 GHz的频率范围内观测到，但需要采用脉冲平滑技术：经常需要若干个小时的积分时间才能确定脉冲星的平均脉冲轮廓。一些脉冲星的脉冲带有固有的线性偏振特性。在其穿过星际介质到达地球的路径中，所有的脉冲均发生色散，其偏振方向也会因法拉第旋转而发生改变（见第2.3.2段）。通过测量色散和法拉第旋转的相应数据，可以确定沿视线方向的电子密度、磁场强度。同样，借助在若干年里测量得出的脉冲到达时间，可以得出脉冲星在天空中的位置和运动情况（自行情况）。脉冲星，特别是毫秒脉冲星的长期稳定性数据有助于在未来将其作为时间业务的标准时钟使用（见第7章）。目前，观测人员们正在开展一项有关毫秒脉冲星计时的全球协作项目，他们希望这一尖端项目能够最终帮助他们直接探测到引力波辐射。

脉冲星的表面磁场强度估计在 $10^4$ - $10^9$ 特斯拉（T）的范围内，而对于极其特别的磁星而言，其表面磁场强度甚至会达到 $10^{10}$ T。强大的磁场和快速的旋转速度导致了强大的电场，并在中子星周围形成了致密的、携带强电流的相对论性等离子体。强烈的相干射电发射只是磁层中能量散耗的衍生产物，虽然也可以清楚地探测到，但其能量却只占等离子体总能量损耗的很小一部分（ $10^{-4}$ - $10^{-6}$ ）。这种不同寻常的电磁场条件与宇宙中的其它电磁场截然不同，而且也无法在地面实验室中获得。然而，脉冲星却可以作为测试该领域内物理学原理的理想实验台，人们在四十多年来仍未完全理解其射电发射过程的事实证明，这一领域内还有许多研究有待完成。虽然射电发射最容易在30 MHz-1.5 GHz的频率范围内观测到，但是许多脉冲星在40 GHz频率处仍有数百微央斯基（ $\mu$ Jy）（ $100\mu$ Jy =  $-300$  dB(Wm<sup>-2</sup>Hz<sup>-1</sup>））的平均流量。采用大口径天线，甚至到90GHz仍可探测到。在确定平均脉冲轮廓时，一般使用锁相脉冲平均技术，同时积分时间从数分钟到数小时不等。观测平均流量为 $S_{min}$ 的周期性脉冲发射，所使用的射电望远镜探测灵敏度可通过以下公式计算得出[Lorimer和Kramer, 2005年]：

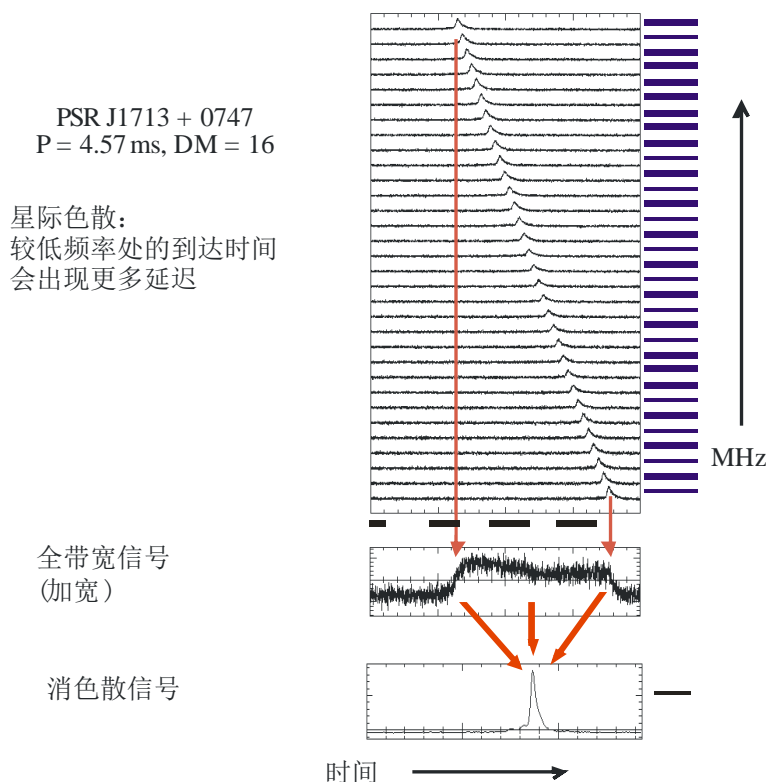
$$S_{min} = \frac{kT_{sys}}{G\sqrt{n_p}\Delta t \cdot \Delta\nu} \sqrt{\frac{W}{P-W}}$$

其中， $G$ 为天线增益， $n_p$ 为平均偏振数值， $\Delta t$ 为积分时间， $\Delta\nu$ 为观测带宽， $P$ 为脉冲周期， $W$ 为脉冲宽度。因此，对于任何平均水平的发射，窄脉冲（ $W \ll P$ ）的探测门限值与负载循环 $\eta=W/P$ 的平方根成正比。同时，峰值流量是 $\eta^{-1}=P/W$ 的因数，其强度大于平均流量。

因此，峰值窄脉冲的探测门限值与 $\eta^{-1/2}$ 成正比，且大于平均强度相同的更窄脉冲的探测门限值。

图 2.2

### 星际介质造成的脉冲色散 (L波段)



Radio-Astro\_22

非常稀薄的星际等离子体造成的色散会导致射电脉冲畸变，同一脉冲在高频率处的到达时间会早于低频率处，该延迟与频率的平方成反比。由于距离较长的原因，畸变在大多数频带都非常强烈，甚至会在若干MHz的带宽中使得脉冲轮廓失真。因此，在探测到脉冲轮廓之前必须对信号进行消色散处理。

一些脉冲星的射电脉冲具有线偏振的特性。在其穿过星际介质达到地球的过程中，这些脉冲会发生色散，其偏振方向也会因法拉第旋转而改变（见第2.3.2段）。通过测量色散和法拉第旋转的相应数据，可以了解电子密度和沿视线方向到脉冲星的磁场。

借助在若干年里测量得出的脉冲到达时间，可以提供脉冲星在天空中的位置和运行信息（自行情况）。在存在伴星的情况下，还可以确定中子星的轨道运行情况。人类发现的首颗太阳系外行星便是在一颗脉冲星的环绕轨道上找到的。因其脉冲射电发射的高度稳定性和可预测性，脉冲星成为测试广义相对论的理想工具。围绕其它中子星和白矮星近轨运行的脉冲星可发射引力波是广义相对论的预测之一，而这一预测已经通过脉冲计时测量数据得到确认。现在，人们正在使用脉冲星的计时测量数据，以及通过测量散布天球四周的许多脉冲星

的脉冲到达时间之间的微小差别，开展更多广义相对论方面的测试，并将广义相对论的预测与其它引力理论的预测进行比较。借助这一方法将有可能探测到长波长的引力波。

对于最稳定的脉冲星而言，其长期计时准确度现已精确到0.1微秒，其计时稳定性也已接近最好的原子时标准。由于脉冲星所具有的计时稳定性，未来有可能会把这些脉冲发射源作为标准时钟用于各类时间业务（见第7章）和深空探测自主导航。

现在已经探测到的2 000多颗脉冲星中有绝大多数都位于我们所在的银河系。脉冲星的搜寻工作主要由射电天文台完成，搜寻工作的目的很多，其中之一便是发现围绕其它致密天体（例如其它中子星、脉冲星甚或黑洞）做轨道运动的脉冲星。在搜寻脉冲星时要记录来自特定方位的射电噪声，然后寻找该噪声的周期性变化，其变化周期从数毫秒到数秒不等。

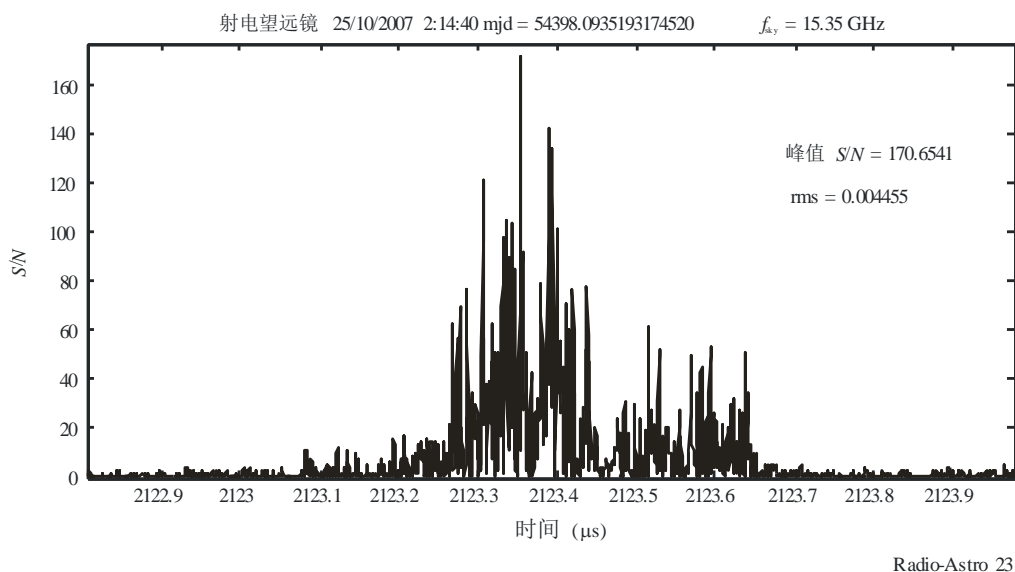
### 脉冲星的瞬态和短时间变化

来自同一颗脉冲星不同脉冲的单独脉冲轮廓也不尽相同，尽管脉冲星的平均轮廓在许多年内都保持不变，几乎等同于它的“指纹”。单独的脉冲变化可能很小，也可能很大，对于每颗脉冲星而言都会不同。在脉冲最强的情况下可以观测到所谓的巨射电脉冲，其峰值流量可比平均流量高 $10^6$  -  $10^8$ 倍。

图 2.3

#### 蟹状星云脉冲星在15.35 GHz频率处的巨射电脉冲[Jessner等人，2010年]

峰值流量为6800央斯基（Jy）（100米口径天线亮温度~9000 K）。记录显示的总持续时间为1.2微秒。



巨脉冲具有强烈偏振，其峰值发射周期以亚纳秒为单位。巨脉冲的发射机制相当于普通脉冲星射电发射的极端形式，但人们现在还无法充分了解这两种发射机制。在探测和分析巨脉冲时，射电天文学家使用了采样率极高的瞬态记录仪，这种记录仪具备可在噪声中采集持续时间较短强信号的触发机制

并非所有脉冲星发射的脉冲都能被探测到。星际闪烁（类似于夜空中的恒星闪烁，但星际闪烁却是由于星际介质的变化引起的）会对脉冲星的射电发射进行调制，同时，形成等离子体效应也会与频率密切相关。现在研究脉冲星闪烁，是为了更好地了解不同尺度上星际介质的电子结构和密度分布。

然而，一些脉冲星的发射却极不规律。其中有一些脉冲星会偶尔停止发射脉冲（脉冲消失），但在有些情况下，脉冲星会在突然重新发射脉冲之前静默许多天。人们曾在观测旋转的射电暂现源（RRATS）时发现了此类行为的一种极端情况。RRATS属于一种强发射源，但其随机爆发只能持续数秒，且每天只能观测到一次或两次。探测和分析此类天体需要使用在没有任何脉冲干扰的射电频段内工作的大型天线。

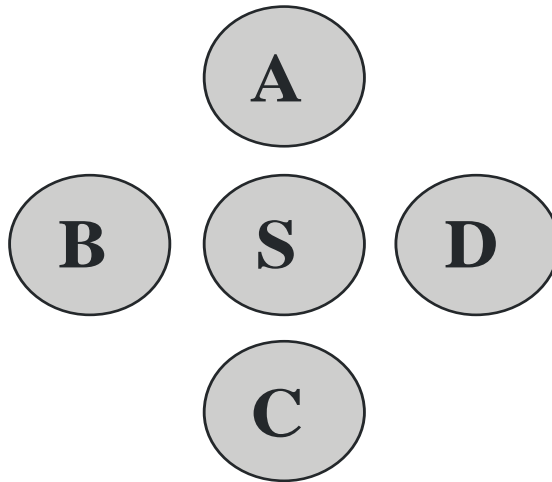
### 2.3.2 连续谱辐射的测量

为了确定连续谱发射与频率的相关性，必须在多个频率处开展测量工作。按照大约倍频的间隔开展测量足以满足要求，因为连续发射的频谱通常比较平滑，但是对于测量脉冲星色散、法拉第旋转以及自吸收光谱而言，采用更近频率间隔才比较适宜。在每个频率处开展测量工作时，使用的相对带宽越大，测量灵敏度便越高，其中比较理想的相对带宽值为10%，2%则是最小值。为连续谱测量划分的RAS频段将在第3章中讨论。

在高于100 MHz的频率处开展的大部分射电发射源的观测工作，需要使用抛物面反射面的天线，即抛物面天线。此类天线可以作为单台使用，也可以组成天线阵列。使用单台抛物面天线射电望远镜的限制因素在于其角分辨率，这是由射电望远镜的半功率波束宽度决定的。例如对于银河、太阳、月球以及某些附近星系的射电发射，此类射电望远镜只能有效地绘制出所观测方向至少若干个天线波束宽度的夹角的天空结构：。通常的观测程序是首先将观测区域划分成一系列的类似光栅网格的扫描区域，其间隔不得超过波束宽度的一半，或者将区域划分成一个点网格，各点之间的间距也不得超过波束宽度的一半。对天区成图需要花费较长的时间，且其隐含的假设前提是射电源与环境不会在观测的这段时间内发生变化。一般情况下，安排测量程序时要确保观测点在扫描过程中标高不变。因此，望远镜旁瓣的地面辐射效应便会在扫描过程中保持不变，并且更易消除。然而，在许多情况下，单望远镜的波束宽度要大于被观测的射电源。在这种情况下，开展测量工作时，要确定来自待测源方向的辐射属性（例如强度、偏振），并将其与附近天空区域的辐射进行比较。在理想的情况下，绘制图像的区域是射电源周围且包括射电源在内的区域，这样一来便可以估算出超出背景的发射。然而，在时间不允许的情况下，只能如图2.4所示测量射电源。在大多数情况下，被测量的特性不会在观测期间发生重大的变化，并且可以对每个方向上的特性按时间予以平均。接收机输出信号在短时标内的变化如图2.5所示。接收到的全部辐射中来自射电源的辐射可以通过以下公式估算得出： $S = (A + B + C + D)/4$ ，公式中的字母分别代表在图2.4中不同指向方向处接收到的平均功率水平。

图 2.4

单天线的典型指向方向

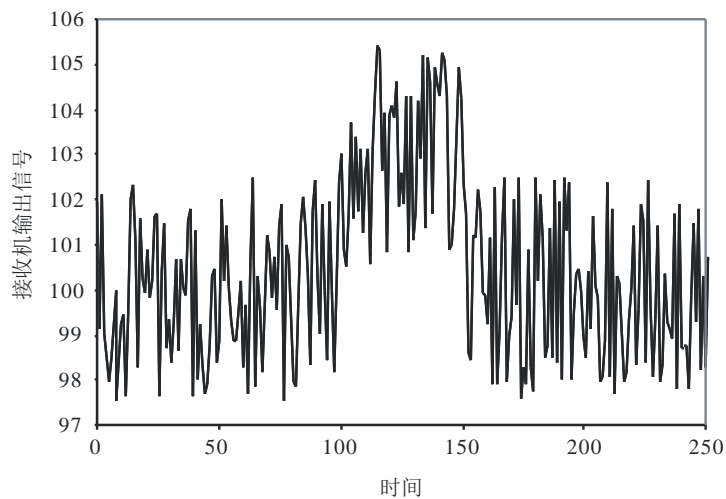


当天线波束指向S点时，测量位于天线波束中的射电源所采用的典型过程。在指向该方向时，除了射电源之外，天线还能“看到”来自天空背景的发射、通过天线旁瓣进入的地面发射以及可能是方向和时间的函数的无用发射。S点周围的A、B、C、D四个点都位于附近天空。在天线波束方向图中，这些圆圈代表-10 dB 或更低的信号功率。

Radio-Astro\_24

图 2.5

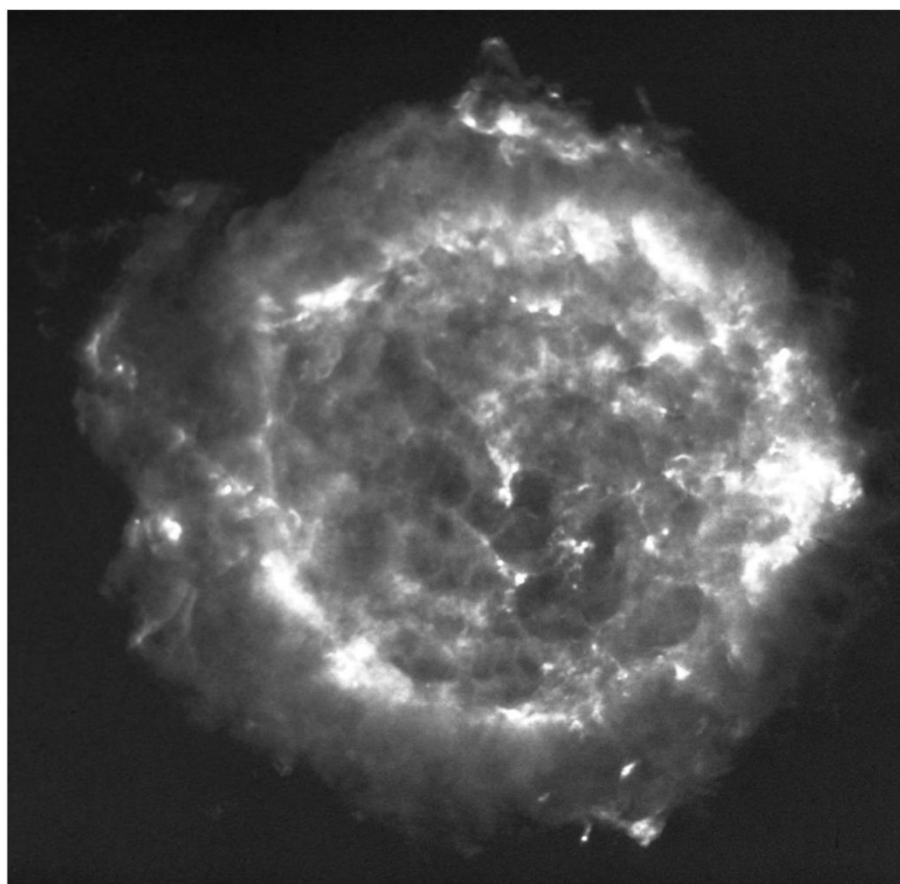
单天线观测过程中接收机输出信号实例



在类似图2.4所示观测的部分过程中，接收机输出信号(纵向坐标)是时间(横向坐标)的函数。该记录的左侧部分对应位置B,中间部分对应位置S,右侧对应位置D。在该记录中，积分时间只有几秒钟。在此之后，可以根据每个位置处观测的时间对数据进行平均处理，而来自多组指向方向的结果可以进一步地平均，以得到理想信噪比(S/N)。

Radio-Astro\_25

如果使用两个或两个以上的天线组成的天线阵列作为成图或成像工具，其成图范围大致相当于组成阵列的单个天线的半功率波束宽度，其分辨率相当于天线阵列的半功率波束宽度。阵列中的每组天线对可起到空间滤波器的作用，用于测量图像中单个傅立叶分量的振幅。如果阵列中拥有足够数量的天线，且天线按照二维构型排列，那么便可以在单次观测的较短时间内，获得为成图所需足够数量充足的傅立叶分量。一些天线阵列（例如位于加拿大多米尼恩射电天体物理天文台的综合孔径射电望远镜）采用了线性排列，因此要依靠地球的旋转才能从不同的方向扫描射电源。此类天线阵列会采用固定的天线间隔进行持续时间约为12小时的观测，然后再采用不同的天线间隔进行更多观测，以便为绘制图像收集充足的信息。每经过12个小时的观测之后，天线才会被转移至新的位置。直到射电源的所有观测数据都进行了处理，天线阵列的综合天线波束才成形，并与形成的图像的像素尺寸相当。图2.6展示了一个综合图的实例。该射电图像是通过位于新墨西哥州，由27个天线组成的甚大阵，在5 GHz频率处观测得到的。



通过由27个天线组成的甚大阵（VLA），在5 GHz频率处观测到的连续谱射电图像。观测对象是射电源——仙后座A，它是约300年前爆炸的一颗超新星的遗迹。其主要结构的角径为4角分（约为月球直径的1/7），角分辨率约为0.6角秒。在超新星的爆炸过程中，大质量恒星的外层高速喷射而出，但在遇到星际气体之后速度开始下降，同时，以更慢的速度向外膨胀的恒星深层物质正在不断分解，形成了类似于气泡的结构。在光波波长内，使用最大型的望远镜也只能看到若干微弱的暗条。图像由NRAO/AUI提供。

Radio-Astro\_26



借助天体射电发射的详细结构和空间分布，可以深入了解射电发射的形成机制。除了需要考虑到一些特殊情况（例如射电源被月球或其它行星遮掩）之外，进行特别详细的成图还需要扩展天线阵列的间距。例如，对于角分辨率可达到若干角秒的天线系统而言，其尺寸必须达到100000波长左右。因此，借助甚长基线干涉测量（VLBI）技术，利用其中间隔距离为数千公里的天线，便可以实现最高达到 $\sim 10^{-4}$ 角秒级别的角分辨率。由此所产生的分辨率，比目前在任何其它电磁频谱范围内所能达到的最高角分辨率高一个数量级。实际上，国际天文联合会在位置测量方面所采用的国际天体参考系统，便是根据利用VLBI观测方法，通过测量200多个银河系外射电源确定的，这些射电源的位置精度达到0.5毫角秒[Ma等人，1998年]。由于VLBI阵列中的所有天线必须在相同频率工作，且阵列中的单个的天线可能位于不同的国家或地球轨道上，因此，有必要在全球范围内保护射电天文频段。

## 2.4 谱线辐射

星际气体云的谱线辐射是原子和分子在彼此碰撞中损失或获得能量而产生的，或是原子和分子在附近恒星的激发下产生。对于包含特定原子或分子的星际云而言，谱线辐射会导致星际云中原子或分子能量状态的跃迁，并且会生成一系列分立谱线。谱线的相对强度、频率和宽度由其物理状态决定，并取决于分子类型、密度、温度和速度分布。在部分情况下，谱线强度会因脉泽作用而大幅提高。脉泽多发生在恒星形成区和恒星演化晚期的星周包层。当星际云的原子或分子有选择地吸收背景连续谱射电源的辐射时，也可以透过星际云观测到谱线。

尽管谱线的固有（静态）频率由特定的原子/分子以及跃迁情况共同决定，但观测到的谱线也会根据原子/分子的径向速度（即原子/分子在视线方向相对于观测者的移动）发生多普勒频移。在速度较大的情况下，观测到的频率相对于固有值会发生大幅偏离，甚至经常有可能超出划分给射电天文的频段的频率下限。1420 MHz频率处观测到的中性氢谱线的多普勒频移，尤其会帮助我们了解我们所在的银河系以及许多河外星系的旋臂结构和旋转情况。

### 2.4.1 谱线类型

射电天文学家已经观测到了若干种类型的谱线。1951年，人们首次发现了中性氢原子（HI）（21厘米波长）在1420 MHz频率附近的超精细能级的自旋反转跃迁[Ewen和Purcell，1951年]。这一发现是天文学的一个重大里程碑，因为随后对该谱线的全天观测，提供了第一幅关于我们所在的银河系的真实旋涡结构的整体图像。我们现在已经了解到，中性氢原子在大部分星系中数量丰富，这决定了该谱线在帮助研究星系中星际气体方面具有极其重要的意义。然而，距离较远星系的较大退行速度，导致它们的HI发射通常会发生多普勒频移，其频率会低于1400-1427 MHz这一受保护的射电天文频段的频率下限。实际上，人们在较低的300 MHz频率处也观测到了中性氢的吸收谱线。

1963年，人类首次探测到分子谱线（1.6 GHz频率处的羟基OH）。在又经过了若干年之后，人们才发现了其它的分子，但是自那时起，人们观测到了来自125种不同星际分子及其同位素的10000多次能量跃迁。Lovas[2004年]曾列出了在0.7至350 GHz频率范围内观测到的

所有跃迁。实际上，只有一部分分子谱线能够受到《无线电规则》的保护，但是对于天体物理学具有最高重要性的分子谱线（见第3章）应该予以保护。

分子谱线会在若干种星际气体云中产生，其中包括弥散低密度云；孤立的冷暗星云，这些星云中通常含有其状态在地球上不稳定的分子；以及包含电离氢（HII）区、炙热的年轻恒星和正在形成中的恒星的巨型致密分子云。这些云的质量占银河系总质量的很大一部分，但是，在这些云中的分子只占其质量的一小部分，大部分质量仍来自原子氢。脉泽谱线是一种仅有少数分子能够产生的特殊谱线。这种谱线是由背景连续谱辐射放大形成的，且在银河系中比较强烈，拥有极窄频带，且通常是偏振的。人们对此类谱线有特殊的兴趣，原因在于它们能够指向星际云内恒星形成的高密度区域，而且部分此类谱线可能还与演化晚期的恒星膨胀包层有关。在一些星系中，可在原子核附近发现宽带超强的脉泽发射（巨脉泽）。通过研究我们银河系内的谱线，可以得出有关分子云、恒星演化进程以及银河系旋涡结构和化学演化的信息。现在，利用灵敏度和角分辨率已有所提高的更新天线阵列，人们还在可以研究其它星系的上述属性。在研究距离较远的星系时，一般会用到数量最为丰富的分子谱线，即氢和一氧化碳的谱线。在对天文射电源的分子谱线进行观测之后，人们会在实验室中模拟这些分子谱线的环境以便人工合成这些分子：其中一个例子便是碳链分子HC<sub>7</sub>N，氰基己三炔[Kroto等人，1978年]。此项实验室工作的一个有趣的连带成果便是发现了球形碳分子C<sub>60</sub>，又称巴克敏斯特富勒烯[Kroto等人，1985年]。

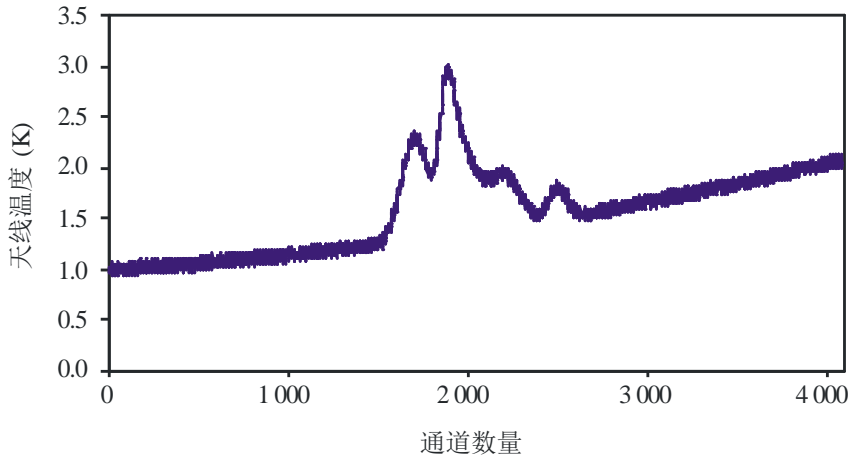
当氢、氦、碳等原子的电子从较高能量状态跃迁到较低能量状态时，它们的原子会发射复合线。这一过程通常会发生在离子和电子重组之后。1964年，苏联的天文学家率先发现了射电复合线[Sorotchenko等人，1964年]。炽热、电离的气体区域会生成分布于整个无线电频谱范围内的许多复合线[Lilley和Palmer，1968年]；其中部分谱线位于为连续谱观测划分的RAS频段，少数谱线位于原本为其它谱线（例如HI或OH谱线）的特定观测划分的RAS频段。有关复合线的强度和形状的观测结果可以帮助我们确定引发该谱线的物理条件。最为明亮的复合线源自氢原子在相邻能量级之间的跃迁，它们的强度通常相当于热连续谱强度的百分之几。

## 2.4.2 谱线的测量

谱线观测者会把接收机通带划分为大量宽度相等的频率通道，划分工作一般通过中频（IF）信号的数字处理过程实现。图2.7展示了单天线观测中的典型输出信号。由于宇宙气体云中原子或分子的固有窄带谱线发射总会因云的运动而发生多普勒致宽，因此可以利用其强度和频率范围推断云内物质的运动和质量。但是未校准的谱线数据会因接收机通带内的平坦度偏差、天线/馈源系统内的驻波以及背景辐射缺乏均匀度而失真。为了消除这些效应，通常会在一个略微不同的中心频率处重复观测工作，以去除通带内的坡位和波纹效应，以及在天空中的附近位置重复观测以去除背景发射。对于在整个天空内分布广泛的HI发射而言，完全消除天线旁瓣所接收辐射的影响是很困难的，需要详细掌握全方位的天线方向图，并了解一些被天线旁瓣偶然观测到的宇宙气体的分布情况。

图 2.7

中性氢原子谱线的接收机输出信号轮廓实例



图中纵坐标是与天线温度成比例的接收机输出信号，横坐标为谱线通道数量。确定的通道带宽谱线宽度相匹配。受云内发射物质沿天线视线方向的运动影响，单频谱线展宽为图中所示轮廓。该倾斜基线是各种仪器效应以及可能的背景辐射综合作用的结果，上述各类效应会在后续的数据处理过程中予以校准。

Radio-Astro\_27

观测到的谱线轮廓或作为频率函数的强度变化，会因原子/分子相对于观测者的径向速度而发生偏离固有静止频率的多普勒频移。星云内的湍动会使谱线轮廓展宽。如果径向速度

$v_r$  小于光速  $c$ ，那么它与相对频移  $\frac{\Delta f}{f}$  的关系为：

$$v_r = -c \frac{\Delta f}{f}$$

在此需要注意的是，退行速度的符号为正号，因此会导致频移符号为负号，即频率不断降低，该现象通常被称为“红移”。由于银河系内的较差自转会使得银河系天体的观测径向速度发生  $\pm 300 \text{ km/s}$  的变化，速度数据会有效地提供一个沿着视线方向的第三维度，对天空中物质的投影分布情况予以补充。此外，部分谱线发射（例如脉泽发射）的偏振还会帮助我们了解这些星云内的磁场。

对于分子云而言，在某一特定频率处的轮廓强度取决于该频率处的温度、柱密度和光学深度。如果谱线结构与发生跃迁的能量等级超精细分裂相关，那么便可经常从中推断出上述参数；除此以外，还可以通过比较相同分子的不同能量跃迁确定这些参数。通过研究其数量不那么丰富的星际同位素（例如研究  $^{13}\text{CO}$  而非  $^{12}\text{CO}$ ），来消除由于光学厚发射造成的模糊时，后面这种技术尤为有效。

射电谱线尤其适合精确测量多普勒频移，因为在射电频率的测量，可以轻松实现较高的准确度。把22 GHz频率处，对作轨道运动的水脉泽源进行的多普勒测量结果，与针对其位置所做的高角分辨率VLBI测量结果结合在一起，可以直接确定出星系NGC4258的距离，即 $7.2 \pm 0.3 \text{ Mpc}$ <sup>6</sup>。这是首次在完全不依靠任何其它天文测量结果的情况下，直接测量得出银河系外天体的距离[Herrnstein等人，1999年]。

每个频谱仪通道都对应一个特定的多普勒频移范围，因此当使用天线阵列进行谱线观测时，在每个通道内都要绘制一副单独的图像。在许多情况下，多普勒频移可以看做是距离，据此，人们可以得到一个数据立方体，而非数据平面图，该数据立方体代表了发射源物质在一个立体空间内的分布情况。

为了达到必要的灵敏度以获得具有天体物理学意义的结论，观测工作通常要持续许多小时。同时，在足以容纳发生多普勒频移的谱线和谱线发射毗邻的比较频段的带宽内，要确保没有任何有害干扰。

## 2.5 现代实践

射电天文学家们从众多技术进步中获益匪浅。这些技术进步正在逐渐提高现有接收机的中心频率，并不断降低其系统温度，增加其带宽。目前，数字终端已经得到广泛普及，数据采集也都由计算机完成。这些均有助于缩短观测的积分时间。此外，在对输出信号进行平均以达到期望灵敏度之前，还可以对这些输出信号进行检查，以发现严重的无线电干扰（RFI）。数据流量方面的进步，以及比以往任何时候都实惠的数据存储成本，使得较大数据集得以保存下来，供后期比以往复杂得多的算法进行处理。这些众多进步的一个最大受益人便是开展VLBI观测的天文学家。现在，这些天文学家可以同时使用位于北美、南美、欧洲和南非等地的望远镜，并通过光纤网络获得实时数据并进行处理数，并且几乎可以实时获得最终图像。在过去十年中，VLBI观测工作使用的带宽已经翻了数倍，观测灵敏度也相应得到提高。与现在不同的是，过去的VLBI观测结果都是存储在磁带中，用于在接下来的几个月中进行处理：然而，自从20世纪60年代以来，单天线谱线观测者已经不必再忍受这种慢节奏的工作方式。

技术进步还改变了人们偏好的连续谱观测模式：现在，更好的方案通常是采用一种数字频谱仪，在获得连续谱测量结果之前能够识别频谱中的严重RFI并将之消除。与之类似的是，当前接收机具有越来越大的带宽，使得使用接收机的观测者可以采用一种自身具有保护机制免受RFI干扰的观测模式，在划分给RAS的频段之外开展观测工作。其他观测者则可以利用陷波滤波器（有时可使用高温超导型滤波器）抑制接近其选定带通的无用信号，同时还可以利用较高的频谱分辨率，针对一些人为的窄带特征采用删除技术。虽然如此，RAS仍然需要划分频段，以便在确保准确校准数据的同时，将谱线观测中RFI造成的模糊度降至最低水平。

---

<sup>6</sup> 1兆秒差距（Mpc）=  $3.26 \times 10^6$ 光年。

## 2.6 结论

射电天文学在宇宙基础物理学和天文学研究中具有不可或缺的作用。许多当前研究的现象根本无法在其它电磁频谱范围内观测到，例如中性原子氢的谱线发射，对于宇宙学具有根本性重要意义的微波背景辐射及其角结构，与射电星系相关的大片同步加速发射区域以及被星际尘埃笼罩、根本无法在光波波长观测到的恒星形成区域等等。除此之外，射电手段还能为我们提供最高的可实现角分辨率、最准确的角位置以及最为准确的多普勒频移。因此，射电天文绝不是传统光学技术的简单附属品，相反，它在众多天文学和天文物理学领域中具有领先的发现作用。

## 参考文献

- BENNET, C. et al. [2003] "The Microwave Anisotropy Probe (MAP) Mission", *Astrophysical Journal*, Vol 583 (1), p. 1–23.
- BURKE, B. F. and GRAHAM-SMITH, F. [2002] *An introduction to radio astronomy*, 2nd ed., Cambridge University Press.
- EWEN, H. I. and PURCELL, E. M. [1951] Observations of a line in the galactic radio spectrum. *Nature*, Vol. 168, p. 356.
- HERRNSTEIN, J. R., MORAN, J. M., GREENHILL, L. J., DIAMOND, P. J., INOUE, M., NAKAI, N., MITOSHI, M., HENKEL, C. and RIESS, A. [1999] A geometric distance to the galaxy NGC4258 from orbital motions in a nuclear gas disk. *Nature*, Vol. 158, p. 539.
- HEWISH, A., BELL, S. J., PILKINGTON, J. D. H., SCOTT, P. F. and COLLINS, R. A. [1968] Observations of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, Vol. 217, p. 709-713.
- JANSKY, K. G. [1935] A note on the source of interstellar interference. *Proc. IRE*. Vol. 23, p. 1158-1163.
- JESSNER, A. et al. [2010] Giant pulses with nanosecond time resolution detected from the Crab pulsar at 8.5 and 15.1 GHz, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 524, id.A60
- KROTO, H. W., KIRBY, C., WALTON, D. R. M., AVERY, L. W., BROTON, N. W., MACLEOD, J. M. and OKA, T. [1978] The detection of cyanohexatriyne in Heiles's cloud 2. *Astrophys. J.*, Vol. 219, L133-L137.
- KROTO, H. W., HEATH, J. R., OBRIEN, S. C., CURL, R. F. and SMALLEY, R. E. [1985]  $C_{60}$ : Buckminsterfullerene. *Nature*, Vol. 318, p. 162-163.
- LILLEY, A. E. and PALMER, P. [1968] Tables of radio frequency recombination lines. *Astrophys. J.*, Suppl. Series, Vol. 16, p. 143-174.
- D. LORIMER, D. and KRAMER, M [2005]: *Handbook of Pulsar Astronomy*, CUP, Cambridge (U.K.).
- LOVAS, F. J. [2004] Recommended rest frequencies for observed interstellar molecular microwave transitions – 2002 revision. *J. Phys. and Chem. Ref. Data*. Vol. 33, p. 117-335.
- MA, C, ARIAS, E. F., FEY, A. L., GONTIER, A.-M., JACOBS, C. S., SOVERS, O. J., ARCHINAL, B. A. and CHARLOT, P. [1998] The international celestial reference frame as realized by very long baseline interferometry. *Astron. J.*, Vol. 116, p. 516-546.

MCLEAN, D. J. and LABRUM, N. R. [1985] *Studies of the sun at metre wavelengths*. Cambridge University Press.

Planck Collaboration et. al [2011] Planck early results. I. The Planck Mission, *Astron. and Astrophys*, Vol. 536, 1

PRYKE, C., HALVERSON, N. W., LEITCH, E. M., KOVAC, J., CARLSTROM, J. E., HOLZAPFEL, W. L. and DRAGOVAN, N. [2002] Cosmological parameter extraction from the first season of observations with the degree angular scale interferometer. *Astrophys. J.*, Vol. 568, p. 46-51.

ROBERTS, J. A. [1963] Radio emission from the planets. *Planet and Space Sci.*, Vol. 11, p. 221.

SMOOT, G. F. and 27 co-authors [1992] Structure of the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophys. J.*, Vol. 396, L1-L5.

SOROTCHENKO, R. L., BORODZITCH, O. S., DRAVSKIKH, Z. V. and KOLBASSOV, V. A. [1964] Proc. of the XIIth General Assembly of the International Astronomical Union, Hamburg, Germany.

## 第三章

### 射电天文观测首选频段

#### 3.1 总则

##### 3.1.1 地面射电天文观测

地面射电天文的观测频率选择取决于观测的现象和地球大气（对流层和电离层）。当频率低于30 MHz时，电离层对观测的影响非常明显；测量显示，地面观测的最低可用频率为1.5 MHz（见第3.2.1节）；大多数观测在20 MHz以上的频率进行。对流层特别是其中的氧气（O<sub>2</sub>）和水蒸气（H<sub>2</sub>O）会吸收辐射，从而对观测造成影响。这些分子共振造成的衰减如图3.1所示。大气中CO、NO和NO<sub>2</sub>等其他成分的影响可以忽略。虽然一些星系射电发射是在几十兆赫兹（即十米波长）首次发现，但射电天文在更高频率上进行观测已取得长足发展。

抛物面天线获得的高角分辨率、低噪声前置放大器的发展以及高频段不断取得的观测发现都促进了高频段观测的进步。射电天文学家已经开始使用100 GHz 以上的频率，目前观测使用的最高频率已经达到1 000 GHz。阿塔卡玛大型毫米波/亚毫米波天线阵（ALMA）已于2010年<sup>7</sup>投入使用。ALMA位于智利阿塔卡马沙漠，能够在30至950 GHz频率范围观测，空间分辨率高达0.01角秒。科学家希望ALMA能够揭示行星形成区域的细致结构、星系的形成与演化、宇宙和生命起源的关系以及天文学的其他前沿领域。

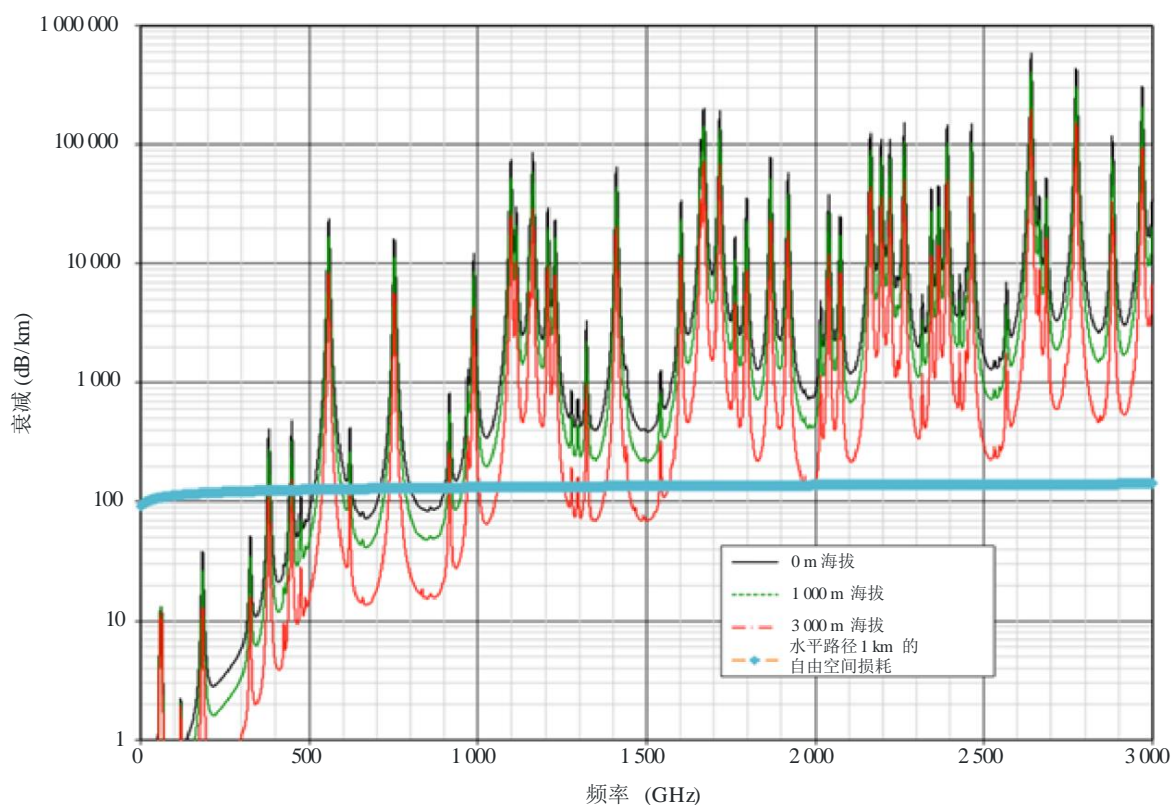
除了在高频率上的新发现外，还存在一些只能在更低频率上观测的天文现象，如银河系电离区域的自由-自由吸收，银河系外射电源的自吸收，以及星系团稀薄等离子体的低频发射机制。

---

<sup>7</sup> <http://www.almaobservatory.org/>

图 3.1

四个不同高度上水平路径1公里的大气衰减。  
作为参考，图中绘出了水平路径1公里的自由空间损耗



Radio-Astro\_31

### 3.1.2 空间射电天文观测

空间观测是射电天文学相当新的领域。目前已经开展了多个空间射电天文观测项目，如 COBE、SWAS、ODIN、HALCA、WMAP 和 PLANCK 卫星。

COBE、WMAP 和 PLANCK 卫星探测并绘制宇宙微波背景辐射的各向异性。PLANCK 卫星（见图 3.2）在 30 至 857 GHz 探测获得的宇宙微波背景辐射分布，确定了宇宙的年龄为 138 亿年，并揭示了一个重要事实：普通原子（也称重子）仅占宇宙的 4.9%，暗物质（不是由原子构成的物质）占 26.8%，而作为“宇宙常数”的暗能量占宇宙的 68.3%，是宇宙加速膨胀的原因。

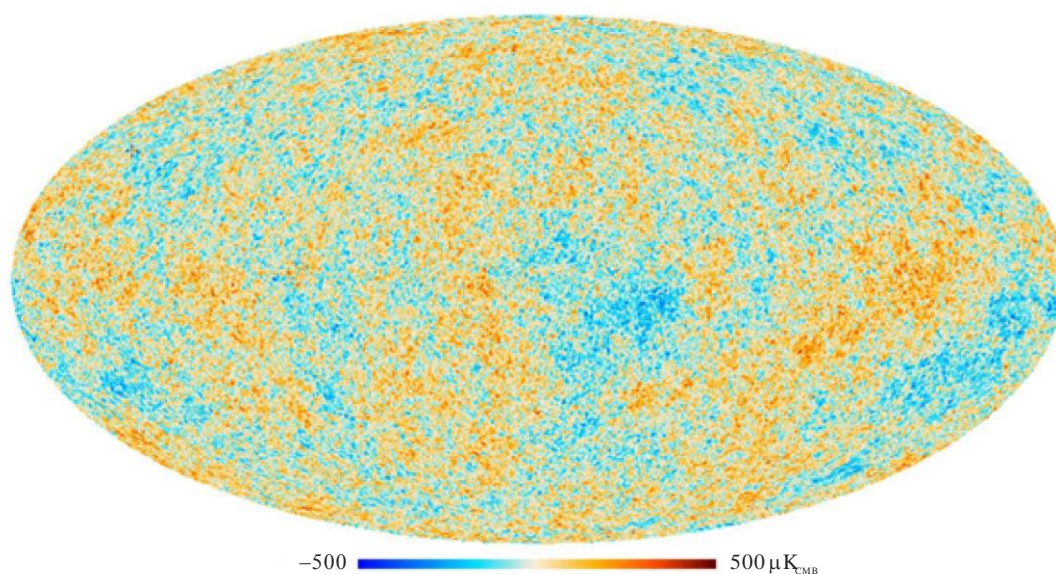
SWAS 和 ODIN 卫星观测频率从 100 GHz 至约 500 GHz，旨在测量 H<sub>2</sub>O、O<sub>2</sub> 的丰度，以及其他无法在地球表面观测的谱线。

HALCA 卫星与地面射电望远镜共同在 1.4、1.6 和 5 GHz 上完成首次空间 VLBI 实验。由于宇宙中不存在大气吸收，空间射电天文可在地面无法观测的频率范围上进行观测，因此具有十分重要的意义。



图 3.2

PLANCK卫星采用15.5个月观测数据绘制的详细的全天空早期宇宙图像



Radio-Astro\_32

PLANCK卫星采用15.5个月观测数据绘制的详细的全天空早期宇宙图像。该图像反映了宇宙在137.7亿年中的温度涨落（如图中的颜色差异），这些涨落对应了形成星系的种子。科学家使用多频数据从图像中消除了银河系的信号。图中的温度范围为 $\pm 500 \mu\text{K}$ 。

来源：ESA和Planck合作组织<sup>8</sup>

### 3.2 首选的连续谱频带

射电天文中连续谱观测的目的之一是确定辐射频率的详细变化，进而确定对应的物理机制。虽然在一些情况下需要更近的间隔，但一般而言，在频谱中各倍频程中的观测可以达到这一目的。频带选择应从地面上可用的最低频率延伸至最高频率，即约10 MHz至1 000 GHz。

正如在第4章中所示，对于连续谱观测，可探测的最小信号与带宽的平方根成反比。因此，在没有干扰的情况下，带宽越宽，使用的大多数天文设备的灵敏度和效率就越高。对于有灵敏度要求的观测，2%是最小带宽，10%是理想带宽。

表3.1列出了275 GHz下为射电天文业务划分的，适合连续谱观测的频带（另见ITU-R RA.314建议书表3）。

---

<sup>8</sup> <http://www.esa.int/Planck>

表 3.1

275 GHz以下划分给射电天文业务，适合连续谱观测的频带

频带 (MHz)	带宽 (%)	频带 (GHz)	带宽 (%)
13.360-13.410	0.37	10.6-10.7	0.94
25.550-25.670	0.49	15.35-15.4	0.33
37.5-38.25	1.98	22.21-22.50	1.30
73-74.6 <sup>(1)</sup>	2.17	23.6-24.0	1.68
150.05-153 <sup>(2)</sup>	1.95	31.33-31.8	1.58
322-328.6	2.03	42.5-43.5	2.33
406.1-410	0.96	76-116	41.67
608-614 <sup>(3)</sup>	0.98	123-158.5	25.22
1 400-1 427	1.91	164-167	1.81
1 660-1 670	0.60	200-231.5	14.60
2 655-2 700	1.68	241-248	2.87
4 800-5 000	4.08	250-275	9.52

<sup>(1)</sup> 第2区（主要）划分，第1区和第3区建议保护。

<sup>(2)</sup> 第1区（主要）划分，澳大利亚和印度。

<sup>(3)</sup> 第二2区（主要）划分，非洲广播区（606-614 MHz）、中国（606-614 MHz）和印度。在第1区（除非洲广播区外）和第3区，该频段作为次要业务划分。

各频带上对射天文的保护程度不同，在一些情况下，保护程度不足以使射电天文学家充分使用频带。一些频带与有源（发射）业务共用；第5章将讨论共用频带引起的问题。

在充分保护的情况下，表3.1列出的一些频带满足频率覆盖的最低要求（2%带宽）。但值得注意的是，在低频范围（76 GHz以下）使用最广泛的频带中，只有1 414 MHz频带满足最低带宽要求。76 GHz以上频率范围的情况差别较大，因为2000年世界无线电通信大会扩大了射天天文业务的划分频带，其中4个频带超过10%的带宽标准。

### 3.2.1 低频观测

在50 MHz以下进行射电天文观测时，将面临不会在高频观测中出现的问题。能够提供高角分辨率的设备寥寥无几：天线口径需达到数公里才能使角分辨率高于1度。一些低频射电天文观测发展了干涉仪，以克服空间分辨率的问题。在13 MHz以下，没有为射电天文划分频段，这是由于广播等世界通信业务广泛使用低频发射并通过电离层反射传播，因此很难在地球上找到隔绝干扰信号的射电天文观测台址。低频观测会受到地球电离层的影响，这种影响在一天的不同时间点、一年的不同时间段以及太阳活动影响下会发生变化。只有当F区域的电子密度足够低，使电离层能够被穿透，同时在公里范围内密度相对均匀，闪烁现象对天线的干扰水平最低时，才能成功进行观测。10 MHz以下的少数观测是在塔斯马尼亚进行

的，得益于地理位置的优势，这里较少受到电离层的限制和其他信号干扰。1960年代早期进行的观测显示，地面射电天文测量的可用极限频率为1.5 MHz。

### 3.2.2 连续谱观测的高频带

在20 GHz频率以上，频带选择是为了在最大程度上避免大气中氧气（O<sub>2</sub>）和水蒸气（H<sub>2</sub>O）的吸收效应。连续谱的观测频带必须在30、90、150、240、410、470、670和850GHz附近大气吸收效应最小的区域选择。因此，除了选择上的限制外，可用的采样间隔非常充分。目前，划分给射电天文的频带最高仅至275 GHz；选择包含重要谱线的频带时所采用的原则，决定了许多频带上的频率范围选择，特别是在高频。值得注意的是，275-323 GHz、327-371 GHz、388-424 GHz、426-442 GHz、453-510 GHz、623-711 GHz、795-909 GHz和926-945 GHz已被确定为由主管部门开展射电天文业务的频带。进入21世纪，有源业务在宽带通信上对高频带的需求日益增加。2012年世界无线电通信大会通过对脚注5.565的修订---“有源和无源业务均可使用1 000-3 000 GHz范围内的所有频率”。ITU-R RA.2189号报告汇报了275至3 000 GHz范围内频率共用的研究结果，结论认为在275-3 000 GHz范围内，射电天文和有源业务共用频率不会产生问题，原因如下：

在地面上，设想两种近乎最坏的情况，275-1 000 GHz范围内的地面链路必须在高海拔位置通过大型天线以最大功率运行，天线直接指向望远镜方向，才可能使到达望远镜的信号对射电天文观测造成有害影响。在1 000 GHz以上，干扰源应在1公里范围内，以最大功率运行并直接指向望远镜，可使信号超过干扰门限值；多数情况下，如此近距离的链路应在射电天文台自身的控制下，或者会与受影响的天文台进行非正式的本地协调。

若考虑机载发射器的干扰，由于干扰源的小波束宽度和高倾斜路径导致大气衰减增大的因素，飞机必须在射电望远镜正上方飞过才能产生干扰。以275 GHz发射的发射器从天文台上方7 000米或更高的位置通过一次不会超过ITU-R RA.769建议书规定的干扰电平。飞机~1/5公里的航向偏差原则上不会产生能够观测到的干扰。

对于来自卫星的干扰，在投射的波束大小、相对速度和自由空间损耗的共同作用下，卫星发射与ITU-R RA.769建议书预测的干扰门限值之间存在相对恒定的差别。假设由于大气衰减没有造成其他损耗，卫星从望远镜正上空飞过，2 000秒积分时间内的平均信号电平比干扰门限值低18或以上dB。即使地球同步卫星的信号电平也不足以产生干扰。

### 3.3 谱线观测的频带

谱线观测必须在相关原子或分子光谱发射的特定频率上进行。表3.2和3.3（另见ITU R RA.314建议书表1和表2）列出了1000 GHz以下具有最重要天文研究意义的谱线。此外，ITU-R RA.1860建议书 - 1-3 THz范围内射电天文测量首选频带，包含了1 000至3 000 GHz范

围内最重要的天文谱线列表。这些谱线基于国际天文联合会（IAU）的建议，从微波频谱<sup>9</sup>中已探测到的或预测的数千条谱线中选出。IAU会定期更新具有最重要意义的谱线名单，IAU会刊和ITU-R RA.314建议书和RA.1860建议书均会收录这些修订。

由于发射区域相对于地球上观测者的视向速度，产生谱线的多普勒频移现象。表3.2和3.3列出的谱线所要求的带宽，由这些谱线静止频率的多普勒频移确定。考虑到银河系内的视向速度，大多数分子的速度范围为±300 km/s。这相当于静止频率发生±0.1%的多普勒频移。但是，随着观测到来自其他星系发射的谱线越来越多，这些星系具有更高的退行速度，导致表格中列出的一些谱线的建议最低观测频带已经向更低的频率扩展。目前已经探测到许多来自河外星系的谱线，在这种情况下，未来修订谱线表时需要视情况修改建议的最低频带。

《无线电规则》频率划分表已经确认，表3.2中列出的许多谱线对射电天文业务具有意义。在一些情况下，已经确认的带宽至少和表3.2列出的相当，但是频率划分的状态并不是主要划分，提供的保护也有限。这种情况对更长的波长就更为明显。由于各向同性天线旁瓣的孔径 $\lambda^2/4\pi$ ，已经从30 GHz的10 mm<sup>2</sup>提高至300 MHz的10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>。对于遥远星系发射的一些可观测谱线，如OH（1 612, 1 720 MHz）、CH（3 263, 3 335 and 3 349 MHz）、H<sub>2</sub>CO（4830 MHz）以及H<sub>2</sub>O（22.235 GHz），划分的带宽并不足以用于观测。对于表3.2中没有列出的数千条可探测谱线，大部分都没有受到保护。随着有源业务对频谱的占用越来越多，许多谱线的观测可能最终会被放弃。对于靠近或在卫星发射业务分配的频段中的谱线，这种情况更可能发生。

表 3.2

275 GHz以下频率中最重要的射电天文谱线

物质	静止频率	建议最低频带	注 <sup>(1)</sup>
氘(DI)	327.384 MHz	327.0-327.7 MHz	
氢(HI)	1 420.406 MHz	1 370.0-1 427.0 MHz	(2), (3)
羟基(OH)	1 612.231 MHz	1 606.8-1 613.8 MHz	(4)
羟基(OH)	1 665.402 MHz	1 659.8-1 667.1 MHz	(4)
羟基(OH)	1 667.359 MHz	1 661.8-1 669.0 MHz	(4)
羟基(OH)	1 720.530 MHz	1 714.8-1 722.2 MHz	(3), (4)
次甲基(CH)	3 263.794 MHz	3 252.9-3 267.1 MHz	(3), (4)
次甲基 (CH)	3 335.481 MHz	3 324.4-3 338.8 MHz	(3), (4)
次甲基 (CH)	3 349.193 MHz	3 338.0-3 352.5 MHz	(3), (4)

<sup>9</sup> Splatalogue – 天体光谱数据库<http://splatalogue.net/>; 科隆分子光谱数据库<http://www.astro.uni-koeln.de/cdms>; NIST为观测到的星际分子微波跃迁建议的静止频率 <http://physics.nist.gov/cgi-bin/micro/table5/start.pl>。

表 3.2 (续)

物质	静止频率	建议最低频带	注 <sup>(1)</sup>
甲醛 (H <sub>2</sub> CO)	4 829.660 MHz	4 813.6-4 834.5 MHz	(3), (4)
甲醇(CH <sub>3</sub> OH)	6 668.518 MHz	6 661.8-6 675.2 MHz	(3)
氦( <sup>3</sup> He <sup>+</sup> )	8 665.650 MHz	8 657.0-8 674.3 MHz	(3), (6)
甲醇 (CH <sub>3</sub> OH)	12.178 GHz	12.17-12.19 GHz	(3), (6)
甲醛(H <sub>2</sub> CO)	14.488 GHz	14.44-14.50 GHz	(3), (4)
亚环丙烯基自由基 (C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> )	18.343 GHz	18.28-18.36 GHz	(3), (4), (6)
水蒸气 (H <sub>2</sub> O)	22.235 GHz	22.16-22.26 GHz	(3), (4)
氨 (NH <sub>3</sub> )	23.694 GHz	23.61-23.71 GHz	(4)
氨(NH <sub>3</sub> )	23.723 GHz	23.64-23.74 GHz	(4)
氨(NH <sub>3</sub> )	23.870 GHz	23.79-23.89 GHz	(4)
一氧化硫 (SO)	30.002 GHz	29.97-30.03 GHz	(6)
甲醇(CH <sub>3</sub> OH)	36.169 GHz	36.13-36.21 GHz	(6)
一氧化硅(SiO)	42.519 GHz	42.47-42.57 GHz	(3)
一氧化硅(SiO)	42.821 GHz	42.77-42.86 GHz	
一氧化硅(SiO)	43.122 GHz	43.07-43.17 GHz	
一氧化硅(SiO)	43.424 GHz	43.37-43.47 GHz	
一硫化二碳 (CCS)	45.379 GHz	45.33-45.44 GHz	(6)
一硫化碳(CS)	48.991 GHz	48.94-49.04 GHz	
氧气 (O <sub>2</sub> )	61.1 GHz	56.31-63.06 GHz	(5), (6), (7)
氘化水(HDO)	80.578 GHz	80.50-80.66 GHz	
亚环丙烯基自由基 (C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> )	85.339 GHz	85.05-85.42 GHz	
一氧化硅(SiO)	86.243 GHz	86.16-86.33 GHz	
甲酰基离子 (H <sup>13</sup> CO <sup>+</sup> )	86.754 GHz	86.66-86.84 GHz	
一氧化硅 (SiO)	86.847 GHz	86.76-86.93 GHz	
乙炔基自由基(C <sub>2</sub> H)	87.3 GHz	87.21-87.39 GHz	(5)
氰化氢 (HCN)	88.632 GHz	88.34-88.72 GHz	(4)
甲酰基离子(HCO <sup>+</sup> )	89.189 GHz	88.89-89.28 GHz	(4)
异氰化氢 (HNC)	90.664 GHz	90.57-90.76 GHz	
二亚胺氮鎓离子 (N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> )	93.174 GHz	93.07-93.27 GHz	
一硫化碳 (CS)	97.981 GHz	97.65- 98.08 GHz	(4)
一氧化硫 (SO)	99.300 GHz	99.98-100.18 GHz	
丙炔(CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H)	102.5 GHz	102.39-102.60 GHz	(5)
甲醇(CH <sub>3</sub> OH)	107.014 GHz	106.91-107.12 GHz	
碳氧化物 (C <sup>18</sup> O)	109.782 GHz	109.67-109.89 GHz	
碳氧化物 ( <sup>13</sup> CO)	110.201 GHz	109.83-110.31 GHz	(4)
碳氧化物 (C <sup>17</sup> O)	112.359 GHz	112.25-112.47 GHz	(6)
氰基自由基(CN)	113.5 GHz	113.39-113.61 GHz	(5)
碳氧化物 (CO)	115.271 GHz	114.88-115.39 GHz	(4)
氧气 (O <sub>2</sub> )	118.750 GHz	118.63-118.87 GHz	(7)
甲醛 (H <sub>2</sub> <sup>13</sup> CO)	137.450 GHz	137.31-137.59 GHz	(6)
甲醛 (H <sub>2</sub> CO)	140.840 GHz	140.69-140.98 GHz	

表 3.2 (完)

物质	静止频率	建议最低频带	注 <sup>(1)</sup>
一硫化碳 (CS)	146.969 GHz	146.82-147.12 GHz	
一氧化氮 (NO)	150.4 GHz	149.95-150.85 GHz	(5)
甲醇 (CH <sub>3</sub> OH)	156.602 GHz	156.45-156.76 GHz	
水蒸气 (H <sub>2</sub> O)	183.310 GHz	183.12-183.50 GHz	
一氧化碳 (C <sup>18</sup> O)	219.560 GHz	219.34-219.78 GHz	
一氧化碳 (C <sup>13</sup> O)	220.399 GHz	219.67-220.62 GHz	(4)
氰基自由基(CN)	226.6 GHz	226.37-226.83 GHz	(5)
氰基自由基(CN)	226.8 GHz	226.57-227.03 GHz	(5)
一氧化碳 (CO)	230.538 GHz	229.77-230.77 GHz	(4)
一硫化碳 (CS)	244.953 GHz	244.72-245.20 GHz	(6)
一氧化氮 (NO)	250.6 GHz	250.35-250.85 GHz	(5)
乙炔基自由基(C <sub>2</sub> H)	262.0 GHz	261.74-262.26 GHz	(5)
氰化氢 (HCN)	265.886 GHz	265.62-266.15 GHz	
甲酰基离子(HCO <sup>+</sup> )	267.557 GHz	267.29-267.83 GHz	
异氰化氢(HNC)	271.981 GHz	271.71-272.25 GHz	

- (1) 若未列出注<sup>(2)</sup>或<sup>(4)</sup>, 频带限值为对应 $\pm 300$  km/s 视向速度的多普勒频移值 (与银河系的谱线辐射一致)。
- (2) 频率划分需要向比1 400-1 427 MHz更低的频率延伸, 从而可以观测遥远星系中HI的更大多普勒频移。
- (3) 当前的国际频谱划分不是主要业务, 且/或不能满足带宽要求。参见《无线电规则》了解更多信息。
- (4) 由于这些谱线频率还被用来观测其他星系, 因此列出的带宽包括对应高达1 000 km/s视向速度的多普勒频移。应注意到, 在向500 MHz 红移的频率中已经观测到 HI, 而在退行速度高达50 000 km/s的星系中已经发现了最丰富分子的一些谱线, 对应的频率降低为17%。
- (5) 与这些分子相关的多个谱线间隔很近, 列出的频带宽带可以观测所有谱线。
- (6) 谱线频率不在任何射电天文的划分频带中, 或在《无线电规则》第5条中提及被射电天文采用。
- (7) 这些谱线只能在地球大气外进行观测。

表 3.3

275至1 000 GHz频率中最重要的射电天文谱线

物质	静止频率 (GHz)	建议最低频带 (GHz)	注 <sup>(1)</sup>
二亚胺氮鎓离子 (N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> )	279.511	279.23-279.79	
一硫化碳 (CS)	293.912	292.93-294.21	
水合氢离子 (H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> )	307.192	306.88-307.50	
氘化水(HDO)	313.750	313.44-314.06	
一氧化碳(C <sup>18</sup> O)	329.330	329.00-329.66	
一氧化碳( <sup>13</sup> CO)	330.587	330.25-330.92	
一硫化碳(CS)	342.883	342.54-343.23	
一氧化碳(CO)	345.796	345.45-346.14	
氰化氢(HCN)	354.484	354.13-354.84	
甲酰基离子(HCO <sup>+</sup> )	356.734	356.37-357.09	
氧气(O <sub>2</sub> )	368.498	368.13-368.87	
二亚胺氮鎓离子(N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> )	372.672	372.30-373.05	(2)
水蒸气(H <sub>2</sub> O)	380.197	379.81-380.58	(2)
水合氢离子(H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> )	388.459	388.07-388.85	
一氧化硫(CS)	391.847	390.54-392.24	
氧气(O <sub>2</sub> )	424.763	424.34-425.19	
一氧化碳(C <sup>18</sup> O)	439.088	438.64-439.53	
一氧化碳( <sup>13</sup> CO)	440.765	440.32-441.21	
一氧化碳(CO)	461.041	460.57-461.51	
氘化水(HDO)	464.925	464.46-465.39	
碳(CI)	492.162	491.66-492.66	
氘化水(HDO)	509.292	508.78-509.80	
氰化氢(HCN)	531.716	529.94-532.25	(2)
一硫化碳(CS)	538.689	536.89-539.23	(2)
水蒸气(H <sub>2</sub> <sup>18</sup> O)	547.676	547.13-548.22	(2)
一氧化碳( <sup>13</sup> CO)	550.926	549.09-551.48	(2)
水蒸气(H <sub>2</sub> O)	556.936	556.37-557.50	(2)
氨( <sup>15</sup> NH <sub>3</sub> )	572.113	571.54-572.69	(2)
氨(NH <sub>3</sub> )	572.498	571.92-573.07	(2)
一氧化碳(CO)	576.268	574.35-576.84	(2)
一硫化碳(CS)	587.616	587.03-588.20	(2)
氘化水(HDO)	599.927	599.33-600.53	(2)
水蒸气(H <sub>2</sub> O)	620.700	620.08-621.32	(2)
氯化氢(HCl)	625.040	624.27-625.67	
氯化氢(HCl)	625.980	625.35-626.61	
氯化氢(HCl)	636.532	634.41-637.17	
一硫化碳(CS)	661.067	658.86-661.73	
一氧化碳( <sup>13</sup> CO)			
一氧化碳(CO)	691.473	690.78-692.17	
氧气(O <sub>2</sub> )	715.393	714.68-716.11	(2)
一硫化碳(CS)	734.324	733.59-735.06	(2)
水蒸气(H <sub>2</sub> O)	752.033	751.28-752.79	(2)
氧气(O <sub>2</sub> )	773.840	773.07-884.61	(2)
氰化氢(HCN)	797.433	796.64-798.23	
甲酰基离子(HCO <sup>+</sup> )	802.653	801.85-803.85	
一氧化碳(CO)	806.652	805.85-807.46	
碳(CI)	809.350	808.54-810.16	
一硫化碳(CS)	832.057	829.28-832.89	
氧气(O <sub>2</sub> )	834.146	833.31-834.98	
一硫化碳(CS)	880.899	877.96-881.78	
水蒸气(H <sub>2</sub> O)	916.172	915.26-917.09	(2)
一氧化碳(CO)	921.800	918.72-922.72	(2)
一硫化碳(CS)	929.723	926.62-930.65	
水蒸气(H <sub>2</sub> O)	970.315	969.34-971.29	(2)
一硫化碳(CS)	978.529	977.55-979.51	(2)
水蒸气(H <sub>2</sub> O)	987.927	986.94-988.92	(2)

(1) 频带限值为对应± 300 km/s 视向速度的多普勒频移值（与银河系的谱线辐射一致）。

(2) 这些谱线只能在地球大气外进行观测。

## 第四章

### 射电天文观测的易受干扰性

#### 4.1 引言

在几乎所有的情况下，射电天文测量到的辐射的振幅都符合高斯概率分布。除了窄带谱线发射之外，天体辐射与来自地球及其大气层的热噪声辐射，或接收机自身产生的噪声，拥有相同的统计特征。除此之外，宇宙射电发射还非常微弱。在射电天文观测过程中，接收机的射频（RF）和中频（IF）频段的信噪比（S/N）通常在-20 dB至-60 dB之间，这意味着观测的发射源功率比来自大气、地面和接收机电路的无用噪声功率低 $10^{-2}$ 至 $10^{-6}$ 倍。大部分通信系统的S/N与之大致相同或更高。由于射电天文信号的强度比其它业务信号更加微弱，射电天文观测非常容易遭受无线电干扰，除了脉冲星之外，宇宙信号一般不具备能够将其与噪声或众多形式的干扰信号区别开来的调制特性。

虽然射电天文观测的S/N极低，但观测工作仍能得出有意义的测量结果，这是由于其它无线电业务的相关信息通常会因发射属性（即调制）而不断变化，但射电天文测量结果却通常是发射信号的平均。当使用探测器测量接收机IF级的总噪声功率时，探测器的输出功率会在许多秒钟之内（在部分情况下是在许多小时内）进行平均，因此，测量值的统计涨落会大幅减小。现在已经可以探测到总噪声电平中约相当于平均噪声电平 $10^{-8}$ 的微小变化，这需要至少对 $10^{16}$ 个独立样本进行平均。能够体现出射电天文观测高灵敏度的一个实例，便是使用普朗克卫星（Planck Collaboration等人，2011年）测绘宇宙背景辐射的角结构，目前普朗克卫星正在ITU-R RA.1417建议书中提到的太阳与地球的拉朗格日L2点运行。现在已经测量到的温度涨落范围约为背景温度（2.8 K）的 $10^{-6}$ ，比装载在卫星上的接收器系统噪声温度低75 dB或更多。取得该高灵敏度观测结果的代价，便是无法了解任何信号特征在短时间内的变化信息，这些信息会在平均过程中丢失，而平均对于降低噪声起伏是必不可少的。这些微弱涨落的发现[Smoot等人，1992年]，帮助人们了解当今宇宙大尺度结构的起源，并获得了2006年的诺贝尔物理学奖，这是诺贝尔奖第四次授予射电天文研究工作。

作为一项有历史意义的注解，本章提到的干扰门限电平分析方法最早述于前CCIR 224-1号报告附件[Oslo, 1966年]。该报告中的干扰门限电平，连同后续的修订和增补，为射电天文的频率协调提供了依据，并收录在ITU-R RA.769建议书附件1和本章表4.1和4.2中。

#### 4.2 计算干扰电平过程中的基本考虑

##### 4.2.1 干扰有害程度的判据

在实际操作中，因干扰信号的存在，而导致的接收机输出功率电平增加，从而无法形成一个足以校准并从测量得出的功率中扣除的常数。除了信号发射固有的调制变化之外，经过长距离传播的干扰信号，也会因大气层和影响路径损耗的其它因素的各类变化而发生较大的振幅涨落。行驶中的汽车车载移动电台发射的信号，会随发射机和射电望远镜之间的路径变



化而发生改变。即使干扰的功率流量密度（*pf*d）值保持不变，接收到的功率电平也会在射电望远镜跟踪观测源的运动中，在发射机方向呈现出不断变化的旁瓣电平。在干扰电平较低的情况下，干扰具有起伏叠加效应，这些起伏通常无法与系统噪声或在部分情况下天文信号造成的起伏区分开来。然而，在一般情况下，干扰造成的接收机的输出功率起伏不会像完全的随机噪声那样随积分时间的增加而被平均。

判断干扰信号是否达到有害级别的强度判据，定义为无用发射造成的测量误差，比仅由于系统噪声造成的误差多10%时的电平。计算干扰的常用做法是，首先假设该干扰电平会造成接收机输出功率增加，且增加值等于系统噪声引起的输出功率起伏的均方根（*r.m.s.*）的10%。然后考虑采用一种典型的测量方法，首先将天线指向射电源，其次偏离射电源的位置再进行测量以便测量出天空背景功率电平，最终比较两次测量结果的差值。假设在测量射电源的过程中存在干扰，但在背景电平的参考测量过程中不存在，或者相反，就像在测量间歇通信信号过程中可能遇到的情况一样，那么，如果接收机输出端的干扰电平等于噪声电平*r.m.s.*的10%，测量射电源功率过程中的总误差就会增加10%。因此，可以想象出来，在显示射电源强度测量结果图中，误差棒的长度会增加10%，强度测量结果也许还可以绘制成其它天文参数的函数。此外还需要注意的是，在不存在干扰的情况下，测量结果不确定性的*r.m.s.*增加10%便相当于观测时间减少20%。在这种情况下仍有可能得出有用的测量结果，但数据的准确性却会大幅降低。

#### 4.2.2 天线响应方向图

开展射电天文观测通常会用到大型高增益天线或天线阵列，以便达到必要的敏感度和空间角分辨率。射电望远镜可能会由单个大型天线或包含多个天线的阵列构成。天线的波束宽度一般在若干角秒到若干度之间，因此干扰源落入主波束的概率通常很小，以至于我们只需要考虑通过天线旁瓣进入的干扰。ITU-R SA.509建议书（空间应用和气象系列）给出大型抛物面天线的旁瓣建议模型，该模型是在大量大型天线的实验数据基础上得出的。的了。该建议模型适用的天线具有以下属性：天线直径与波长之比大于100，在2 GHz和30 GHz之间的频率范围内运行，从相对主波束轴处测量得出的角度 $\varphi$ 大于1°。旁瓣增益会随角尺度 $\lambda/D$ 的级别而变，其中 $\lambda$ 代表波长， $D$ 代表天线口径的宽度。计算旁瓣增益（ $G$ ）包络的模型可通过以下公式表示：

$$\begin{aligned}
 G &= 32 - 25 \log \varphi && \text{dBi} && \text{对于 } 1^\circ < \varphi < 47.8^\circ \\
 G &= -10 && \text{dBi} && \text{对于 } 47.8^\circ < \varphi < 180
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

干扰信号的影响明显取决于与天线主波束轴（视轴）之间的入射角，因为模型中的旁瓣增益就是作为该角度的函数，在+32至-10 dB之间变化。然而，在第4.3段中却有必要计算特定旁瓣电平的有害干扰门限电平，为此，我们设定旁瓣增益为0 dBi。对于等式（4.1）中的旁瓣模型而言，旁瓣增益为0 dBi（即等于各向同性辐射器的增益）所对应的情况是信号与主波束轴之间的角度为19.1。需要注意的是，如果我们根据旁瓣增益等于0 dBi时的接收功率计

算pfd或spfd的门限值，那么，如果干扰是通过增益大于0 dBi的旁瓣接收，即 $\varphi$ 的数值小于 $19.1^\circ$ ，则该门限值则会大于射电天文接收机的干扰门限值。这样一来，如果电平达到门限值的信号入射方向落在半角角度等于 $19.1^\circ$ 且以主波束轴为中心轴的圆锥体范围内，那么接收到的功率将超过有害干扰的判据功率。该圆锥体的立体角弧度 $\Sigma$ 等于 $2\pi(1 - \cos \varphi)$ 。在 $19.1^\circ$ 的圆锥体范围内接收到干扰的概率，粗略计算的结果就等于 $\Sigma$ 除以高于水平面的球面度 $2B$ ，该位置可能接收到干扰信号的。其中，当 $\varphi = 19.1^\circ$ 时， $\Sigma/2B = 5.5\%$ 。对于相对较新的天线设计而言，建议采用旁瓣增益为 $29 - 25 \log \varphi$ 的旁瓣模型（见ITU-R S.580建议书等）。在这种模型中，旁瓣增益为0 dBi时对应的 $\varphi$ 为 $14.5^\circ$ ，那么 $\Sigma/2B$ 的数值便为3.2%。但是，另外一种旁瓣模型（见ITU-R S.1428建议书）所采用的旁瓣增益为 $34 - 30 \log \varphi$ ，当增益为0 dBi时，对应的角度为 $13.6^\circ$ ，相应的 $\Sigma/2B$ 数值便为2.8%。ITU-R RA.1513建议书规定，干扰电平超过有害门限值的可容许累计时间百分比上限为5%，其中，来自同一网络的干扰超过有害门限值的时间百分比不得超过2%（见第4.2.4段）。上文讨论的三个 $\Sigma/2B$ 数值（5.5%、3.2%和2.8%）合理符合相应的图像，因此可以证明，在计算对应有害干扰门限值的pfd和spfd时，将旁瓣增益定为0 dBi是合适之选。

作为一个特殊的例子，非对地静止卫星属于一种动态情况，即卫星相对于射电天文天线波束的位置会在2 000秒的积分时间内发生较大变化。分析这种情况下的干扰需要使用《无线电规则》第22.5C款定义的等效功率流量密度（epfd）的概念，积分天线对于不同旁瓣电平的响应。除此之外，通常情况下还有必要结合特定系统内多颗卫星对射电望远镜的影响。在此类计算中，除非可以使用专门为射电天文天线制定的方向图模型，否则建议采用ITU-R S.1428建议书介绍的直径大于 $100 \lambda$ 天线的天线响应方向图（见本章附件1）。

上文描述的旁瓣模型，适用于会受到焦点支撑结构散射影响的对称抛物面天线。对于没有口径遮挡的偏馈反射面天线，它的旁瓣电平通常比模型中提供的旁瓣电平低10至15 dB。目前，只有几个为射电天文设计发展的偏馈天线。对于大型天线而言，对称设计更加经济合算，而且也可能是偏振测量工作首选的天线设计。

### 4.2.3 平均时间（积分时间）

用于减少噪声起伏的时间平均过程通常分两步或更多步完成。通常情况下，数据会被平均到数十毫秒至数十秒之间不等，然后再采用数字方式进行记录。第一个步骤会减少数据量，但可以把强干扰的短脉冲等特征留到后来消除，从而不会造成严重的数据损失。进一步的平均通常会在随后的数据处理过程中离线完成。例如，为了比较从某一射电源（以及天空背景发射）和来自背景参考位置处接收到的功率电平，观测结果中可能包含针对两个或更多不同天空位置的重复测量结果。每个位置都必须进行单独的时间平均。来自不同观测期的数据可能也要加入其中，因此可能会导致总的平均时间延长至数十或数百小时[Owen与Morrison, 2009年; Walter等人, 2012年]。具体的时限通常由大型射电望远镜的可用时间决定。在搜寻极其微弱的信号时，如此长时间的平均过程是必须的，搜寻过程中，将许多来自天空某一点频谱发射的单独记录进行平均，是非常常见的做法。在研究干扰门限时，通常使用2 000秒作为代表性平均时间。当需要达到极其高的灵敏度时，地面观测一般会采用更长的积分时间，较为代表性的积分时间为360 000秒（100小时）。由于观测灵敏度会随平均时间的平方根而改变，2 000秒和360 000秒的差别，所对应的对于天文信号和干扰的灵敏度

差别是11.3 dB。此外，还有一些观测对象具有随时间发生变化的现象，例如恒星或太阳爆发观测以及行星际闪烁观测，这些情况则可适合采用相对较短的观测时间。

#### 4.2.4 因干扰导致的时间损失率

在许多情况下，干扰具有随机性（例如来自移动通信信号的干扰），或者会因传播条件而随时间发生较大的强度变化。在确定此类干扰信号是否对射电天文观测有害时，有必要明确规定一个可以容许有害干扰发生的最大时间百分比。对于多数业务而言，不同的建议书已经为之规定了相应的时间百分比，该数值通常在0.01%（涉及生命安全的通信业务）到百分之几（涉及可重复进行的数据采集的业务）之间。对于射电天文业务而言，各种干扰源造成的净损耗时间百分比的最大可容许值为5%。由于在许多射电天文观测过程中，会遇到来自邻近频段多个发射源的干扰，而来自同一业务的干扰的最大可容许时间损失率为2%。ITU-R RA.1513建议书明确规定了这些数字。它们对于开展蒙特卡罗计算，以确定如何限制随机干扰源，具有不可或缺的作用（见第4.8段）。

### 4.3 射电天文系统灵敏度和有害干扰门限值

#### 4.3.1 理论考虑

射电天文观测灵敏度的测量，可以通过提高接收机输入端的功率电平，使得接收机输出功率相应发生变化且变化值等于均方根噪声起伏来实现。接收机探测器的输出功率是接收机输入端总功率的一个函数。总输入功率包括有用信号功率和无用噪声（例如热噪声和接收机噪声）功率。这两种功率均由随机过程产生，并且无法从性质上对两者进行区分。然而，两者却都具备平均功率电平，当平均功率电平足够精确确定时，便可以探测到有用信号。（前提是接收系统的增益和其它参数在观测过程中保持不变。）诸如噪声功率 $P$ 等稳定随机变量的统计平均值可以精确计算得出，并且与独立样本数量 $N$ 的平方根成反比，该平均值的标准差可通过下列公式计算得出：

$$\Delta P \approx \frac{P}{\sqrt{N}} \quad (4.2)$$

正如在上文公式中所使用的那样， $\Delta P$ 和 $P$ 既可以从接收机带宽内的噪声功率角度定义，也可以定义为功率谱密度（W/Hz）。在接下来的分析中，它们指的是功率谱密度。标准差 $\Delta P$ 也是一个r.m.s.值。在观测样本数量 $N$ 充足的情况下，射电噪声功率的测量值可以达到较高的精确度。当降低起伏值 $\Delta P$ 使它小于有用信号功率时，则可能探测到非常微弱的信号。在带宽 $\Delta f$ 范围内，接收机每秒钟可测量约 $2\Delta f$ 个独立样本，且通过延长平均时间 $t$ （亦称积分时间）， $N$ 可以变成一个很大的数值。因此，我们可以得出以下公式：

$$N \approx 2\Delta f t \quad (4.3)$$

如果将其与公式（4.2）结合在一起，

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{K}{\sqrt{\Delta f t}} \quad (4.4)$$

其中， $K$ 是一个比例因数，取决于设备和观测技术的具体细节[Kraus, 1966年]。对于基本的总功率系统（即测量天线输送的总噪声功率的系统）而言， $K=1$ ，出于普遍性考虑，此处的讨论也将采用这一数值。（需要注意的是，当观测时间被平均分配给射电源观测和参考位置观测时（如第4.2.1所述），待定值 $t$ 便等于总观测时间的一半。同时，射电源测量结果与参考位置测量结果之间差额的均方根误差等于射电源测量结果误差乘以 $\sqrt{2}$ 。）

在计算灵敏度的等式（4.4）中，功率谱密度中的噪声起伏 $\Delta P$ 与以温度起伏 $\Delta T$ 表示的总体系统灵敏度（噪声起伏）乘以玻尔兹曼常数 $k$ 相关：

$$\Delta P \approx k \Delta T \quad (4.5)$$

灵敏度公式便可以表示为：

$$\Delta T = \frac{T}{\sqrt{\Delta f t}} \quad (4.6)$$

其中：

$$T = T_A + T_R \quad (4.7)$$

$T$ 代表系统温度，等于宇宙发射、地球大气层和地面辐射造成的天线噪声温度 $T_A$ 与接收机噪声温度 $T_R$ 之和。

### 4.3.2 灵敏度和有害干扰电平的估算

公式（4.4）或（4.6）可用于估算射电天文观测的灵敏度和干扰电平。表4.1和4.2列出了具体的结果；正如第4.2.3段所述，预先设定的观测（或积分）时间 $t$ 是2 000秒。以温度或功率谱密度单位表示的灵敏度，是能够使接收机输出功率电平的增加值等于均方根噪声起伏所必须的接收机输入功率电平。在表4.1（连续谱观测）中，对于71 GHz以下的频率而言， $\Delta f$ 的假设值为划分给射电天文的频段带宽。在71 GHz以上的频率， $\Delta f$ 的假设值为8 GHz，这一数值是该频率范围内的连续谱观测通常使用的典型带宽。在表4.2（谱线观测）中， $\Delta f$ 为典型的谱线通道带宽。 $\Delta f$ 的数值对应的速度约为3公里/秒，这是银河系内与银河系外的射电源谱线常用数值的中间值。需要注意的是，表4.1和4.2的最后五行内数据，对应的是275 GHz以上的频率范围，在编写当前版本的手册时，该频段尚未进行划分。这些频率只是任意选择的结果，其对应的有害门限值也只是用于提供初步估算。

表4.1和4.2列出的有害干扰电平是造成 $\Delta P$ （或 $\Delta T$ ）发生变化且变化值等于系统噪声引发的均方根噪声起伏的10%的干扰电平，即：

$$\Delta P_H = 0.1 \Delta P \Delta f \quad (4.8)$$

概括而言，表4.1和4.2各栏内的相应数值均可以按照以下公式计算得出：

- $\Delta T$ ，使用公式（4.6）和（4.7），
- $\Delta P$ ，使用公式（4.5），
- $\Delta P_H$ ，使用公式（4.8）。

干扰亦可以从天线的功率流量密度（pfd）角度进行表述，既可以是总带宽内的pfd，也可以是每1 Hz带宽的功率流量谱密度（spfd） $S_H$ <sup>10</sup>。如第4.2.2段所述，这些数值适用于在干扰到达方向具有一定增益的天线，并且等于各向同性天线（其有效面积为 $c^2/4\pi f^2$ ，其中 $c$ 代表光速， $f$ 代表频率）的相应数值。 $S_H\Delta f$ （dB（W/m<sup>2</sup>））的值等于 $\Delta P_H$ （dBW）加上：

$$20 \log f - 158.5 \quad \text{dB} \quad (4.9)$$

其中， $f$ 的单位为Hz。考虑到带宽的因素，减去 $10 \log \Delta f$ 便可以得到 $S_H$ 。除此之外， $S_H$ 还可以通过以下单独公式表示：

$$S_H = \frac{0.4 \pi k (T_A + T_R) f^2}{c^2 \sqrt{\Delta f t}} \quad (4.10)$$

图4.1以图形的形式展示了表4.1和4.2列出的射电天文业务有害干扰电平，其中 $S_H$ (dB(W/(m<sup>2</sup>·Hz)))被绘制为频率的函数。代表连续谱发射的曲线并不平滑，原因在于不同频段内划分给射电天文的带宽是不同的。

当带宽增加时，射电天文接收系统对于宽带（连续谱）辐射的灵敏度便会提高（公式（4.4）和（4.6））。其原因如下：噪声功率会随带宽增加而提高，但是，由于信号亦属于一种宽带噪声，因此信号强度也会增加。在经过探测器之前，RF或IF阶段的功率信噪比一直保持不变，不会因带宽而发生改变。然而，随着带宽增加，确定功率电平的精确度也会随带宽平方根而提高，因此，灵敏度也会相应提高。

等式（4.4）和（4.6）显示，只要带宽和/或观测时间足够大，就可以实现任意期望灵敏度。然而，在实际操作中，不同于上述统计的因素会令射电天文观测的灵敏度具备一个实际

<sup>10</sup> 此处采用了无线电通信部门的建议术语（ITU-R V.574建议书），其中，“功率流量密度”的单位为W/m<sup>2</sup>，“功率流量谱密度”（例如 $S_H$ ）的单位为W/(m<sup>2</sup>·Hz)。在射电天文中， $S_H$ 代表“流量密度”，其单位为央斯基（央）：

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz}), \text{ 即 } -260 \text{ dB}(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})).$$

极限。这些其它作用包括接收机的稳定性、衰变涨落以及地球大气层中的相位路径。表4.1和4.2列出的灵敏度电平所对应的带宽和积分时间的取值前提是这些其它因素一般不具有重要意义。然而，需要强调的是，这些灵敏度水平并非基本极限，当观测数据可以在许多小时的时间段内积分的时候，观测灵敏度一般会超过这些数值。

图 4.1

表4.1和4.2中的干扰门限值与频率的关系

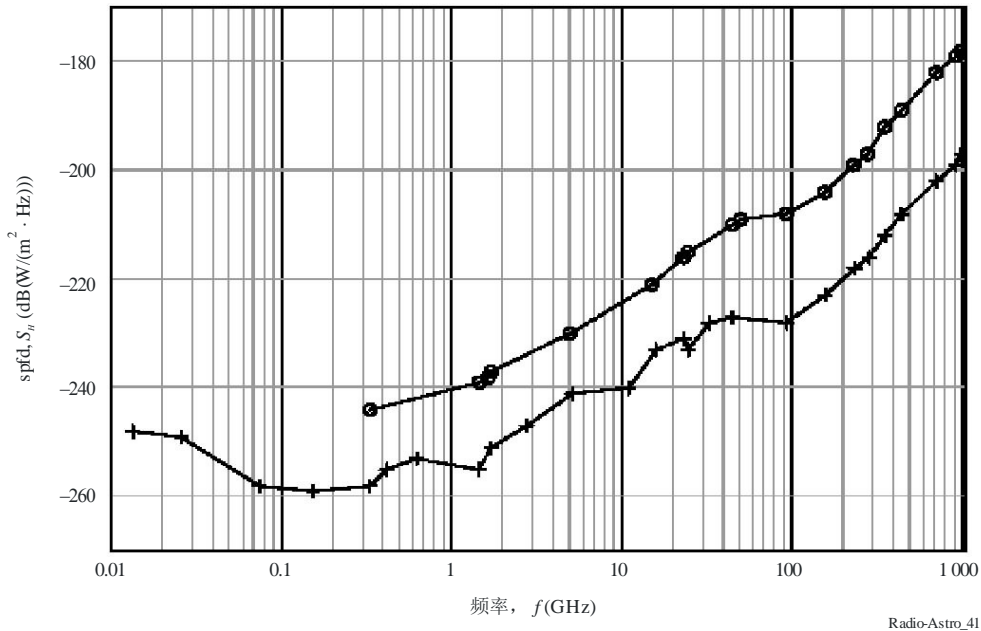


图4.1显示了表4.1和4.2列出的连续谱发射（十字）与谱线发射（圆圈）的spfd门限值，在图中，这些门限值被绘制为频率的函数。

ITU-R RA.2131号报告为ITU-R RA.769建议书中的射电天文观测有害干扰门限值提供了一些补充信息，列出了表4.1至4.3中各项所对应的等效电场强度值。

#### 4.4 干涉仪和天线阵列对无线电干扰的响应

射电天文观测工作对于高角分辨率的需求推动了干涉仪和天线阵列的发展，在研究角大小约为若干角分的射电源时，干涉仪和天线阵列的作用愈来愈重要。通常情况下，干涉仪能够达到的角分辨率为 $\lambda/L$ 弧度，其中 $\lambda$ 代表波长， $L$ 代表天线在射电源方向的最大投影间距。依靠这两种仪器，可以通过两种效应降低对干扰的响应。这两种效应分别是将两组天线的输出功率结合在一起时观测到的强度振动频率，以及间距较大的不同天线接收到的干扰信号分量在重新组合之前存在不同的相对时延。在处理这些效应时，天线阵列比第4.3段讨论的单一天线更为复杂。[Thompson, 1982年]和[Thompson等人, 1986和2001年]对此进行了讨论。一般来说，对这两种效应进行处理的主要结果是有效积分时间（在这段时间内，干扰会对测量结果造成影响）会从总的观测时间缩减成一次自然振荡的平均时间。该时间通常存在一个变化范围， $L \sim 1000 \lambda$ 的紧凑型阵列一般为若干秒， $L \sim 10^7 \lambda$ 的洲际阵列一般不足一毫秒。

因此，与单口径射电天线相比，干涉仪具有一定程度的抗扰性，并且随着以波长表示的阵列尺寸的增加，该抗扰性也会相应提高。

图 4.2

不同类型的射电望远镜系统在进行连续谱观测时的有害干扰门限值

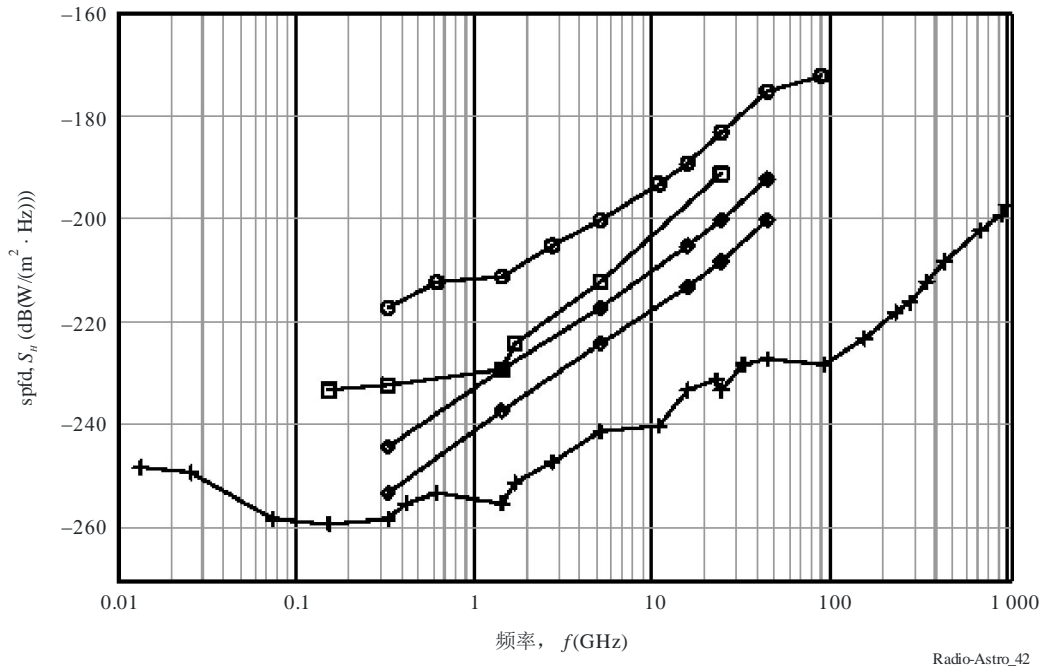


图4.2显示了连续谱观测模式下，一些典型天线阵列的有害干扰门限的计算值。菱形代表的是甚大阵（VLA），其下侧曲线对应的是D构型（最大天线间距为1公里），上侧曲线对应A构型（最大天线间距为36公里）。正方形代表的是MERLIN阵，空心圆形代表甚长基线干涉仪（VLBI）（表4.3）。对于位于美国新墨西哥州的美国国立射电天文台的VLA而言，天线间距从D构型中的1公里，扩展到A构型中的36公里。而位于英国卓瑞尔河岸的纳菲尔德射电天文实验室的MERLIN阵，则将天线间距扩大到了218公里。具体的有害干扰门限结果取决于天线间距，因此，图中采用了不同的曲线分别代表两种VLA构型和MERLIN阵。此外，计算有害干扰门限还有相应的假设前提，即造成干扰的发射器相对于地球是静止的，且通过天线旁瓣接收到的干扰信号功率在观测过程中保持不变。

表 4.1

射电天文连续谱观测的有害干扰门限值

中心频率 <sup>(2)</sup> $f$ (MHz)	假设带宽 <sup>(3)</sup> $\Delta f$ (MHz)	最低天线噪声温度 $T_A$ (K)	接收机噪声温度 $T_k$ (K)	系统灵敏度 (噪声起伏)			干扰门限值 <sup>(1)</sup>		
				温度 $\Delta T$ (mK)	功率谱密度 $\Delta P$ (dB(W/Hz))	输入功率 $\Delta P_{in}$ (dBW)	pfd $S_{\mu\Delta f}$ (dB(W/m <sup>2</sup> ))	spfd $S_{\mu}$ (dB(W/m <sup>2</sup> · Hz))	
				(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	
13.385	0.05	50 000	60	5 000	-222	-185	-201	-248	
25.610	0.12	15 000	60	972	-229	-188	-199	-249	
73.8	1.6	750	60	14.3	-247	-195	-196	-258	
151.525	2.95	150	60	2.73	-254	-199	-194	-259	
325.3	6.6	40	60	0.87	-259	-201	-189	-258	
408.05	3.9	25	60	0.96	-259	-203	-189	-255	
611	6.0	20	60	0.73	-260	-202	-185	-253	
1 413.5	27	12	10	0.095	-269	-205	-180	-255	
1 665	10	12	10	0.16	-267	-207	-181	-251	
2 695	10	12	10	0.16	-267	-207	-177	-247	
4 995	10	12	10	0.16	-267	-207	-171	-241	
10 650	100	12	10	0.049	-272	-202	-160	-240	
15 375	50	15	15	0.095	-269	-202	-156	-233	
22 355	290	35	30	0.085	-269	-195	-146	-231	
23 800	400	15	30	0.050	-271	-195	-147	-233	
31 550	500	18	65	0.083	-269	-192	-141	-228	
43 000	1 000	25	65	0.064	-271	-191	-137	-227	
89 000	8 000	12	30	0.011	-274	-189	-129	-228	
150 000	8 000	14	30	0.011	-278	-189	-124	-223	
224 000	8 000	20	43	0.016	-277	-188	-119	-218	
270 000	8 000	25	50	0.019	-276	-187	-117	-216	
335 000	8 000	55	64	0.030	-274	-185	-113	-212	
420 000	8 000	95	80	0.044	-272	-183	-109	-208	
670 000	8 000	185	130	0.079	-270	-181	-103	-202	
875 000	8 000	175	170	0.086	-269	-180	-100	-199	
940 000	8 000	235	180	0.104	-268	-179	-98	-197	

(1) 假设积分时间为2 000秒；如果采用的积分时间为15分钟、1小时、2小时、5小时或10小时，表中对应的数值将分别调整+1.7、-1.3、-2.8、-4.8或-6.3 dB。表中列出的干扰电平对应的是单个天线接收的总功率测量值。如第4.4段所述，其它类型测量工作的干扰电平可能不会这么严格。如第4.7.3段所述，对于对地静止轨道（GSO）中的发射器而言，干扰电平应进行-15 dB的调整（即低15 dB）。

(2) 本表仅列出了射电天文频谱中的一些具有代表性的例子，无法一一列举整个射电天文频段内所有频率的对应数据。干扰电平根据第（1）栏中的中心频率计算得出，但并非所有的区域都拥有相同的频率划分。

(3) 对于高于71 GHz的频率而言，第（2）栏中的数值为8 GHz，这是该频率范围内连续谱观测常用的典型带宽。



表 4.2

射电天文谱线观测的有害干扰门限值

中心频率 <sup>(2)</sup> $f$ (MHz)	假设谱线通道带宽 $\Delta f$ (kHz)	最低天线噪声温度 $T_A$ (K)	接收机噪声温度 $T_R$ (K)	系统灵敏度 (噪声起伏)			干扰门限值 <sup>(1)</sup>		
				温度 $\Delta T$ (mK)	功率谱密度 $\Delta P$ (dB(W/Hz))	输入功率 $\Delta P_i$ (dBW)	ptfd	sptfd	
				(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	
327	10	40	60	22.3	-245	-215	-204	-244	
1 420	20	12	10	3.48	-253	-220	-196	-239	
1 612	20	12	10	3.48	-253	-220	-194	-238	
1 665	20	12	10	3.48	-253	-220	-194	-237	
4 830	50	12	10	2.20	-255	-218	-183	-230	
14 500	150	15	15	1.73	-256	-214	-169	-221	
22 200	250	35	30	2.91	-254	-210	-162	-216	
23 700	250	35	30	2.91	-254	-210	-161	-215	
43 000	500	25	65	2.84	-254	-207	-153	-210	
48 000	500	30	65	3.00	-254	-207	-152	-209	
88 600	1 000	12	30	0.94	-259	-209	-148	-208	
150 000	1 000	14	30	0.98	-259	-209	-144	-204	
220 000	1 000	20	43	1.41	-257	-207	-139	-199	
265 000	1 000	25	50	1.68	-256	-206	-137	-197	
335 000	1 000	55	64	2.66	-254	-204	-132	-192	
420 000	1 000	95	80	3.91	-253	-203	-129	-189	
670 000	1 000	185	130	7.04	-250	-200	-122	-182	
875 000	1 000	175	170	7.71	-250	-200	-119	-179	
940 000	1 000	235	180	9.28	-249	-199	-118	-178	

(1) 假设积分时间为2 000秒；如果采用的积分时间为15分钟、1小时、2小时、5小时或10小时，表中对应的数值将分别调整+1.7、-1.3、-2.8、-4.8或-6.3 dB。表中列出的干扰电平对应的是单个天线接收的总功率测量值。如第4.4段所述，其它类型测量工作的干扰电平可能不会这么严格。如第4.7.3段所述，对于对地静止轨道（GSO）中的发射器而言，干扰电平应进行-15 dB的调整（即降低15 dB）。

(2) 本表仅列出了谱线频率范围内一些具有代表性的例子，无法一一列举整个谱线频段内所有频率的对应数据。

表4.1和4.2的各栏说明:

栏

- (1) 射电天文划分频段的中心频率 (表4.1) 或标称谱线频率 (表4.2)。
- (2) 假设带宽或射电天文划分频段的带宽 (表4.1) 或假设的谱线观测常用通道宽度 (表4.2)。
- (3) 最低天线噪声温度, 包括来自电离层、地球大气层、地球辐射以及银河和宇宙背景辐射的温度。
- (4) 高灵敏度系统的典型接收器噪声温度。在高于1 GHz的频率处, 该数值适用于低温致冷接收机。
- (5) 利用天线噪声温度和接收机噪声温度之和、表中列出的带宽以及数值为2 000秒的积分时间, 通过公式 (4.6) 计算得出的总体系统灵敏度, 单位为毫开尔文。
- (6) 同第 (5) 栏, 但以噪声功率谱密度表示, 计算公式为 $\Delta P_s = k\Delta T$ , 其中 $k = 1.38 \times 10^{-23}$  (J/K) (玻尔兹曼常数)。 $\Delta P_s$ 采用分贝表示。
- (7) 对高灵敏度观测有害的接收机输入功率电平 ( $\Delta P_H$ )。第4.2.3段讨论了有害判据, 其计算公式为 $\Delta P_H = 0.1 \Delta P \Delta f$ 。 $\Delta P_H$ 采用分贝表示。
- (8) 可计算出使用各向同性接收天线时, 接收系统功率电平 $\Delta P_H$ 的pfd。 $S_H \Delta f$ 采用分贝表示。
- (9) 可计算出使用各向同性接收天线的情况下, 接收带宽 (表4.1) 或谱线通道 (表4.2) 中的功率电平 $\Delta P_H$ 的spfd。 $S_H$ 以分贝表示。若要计算4 kHz或1 MHz参考带宽中的相应功率电平, 则相应增加36 dB或60 dB。

对于VLBI的情况，由于其中天线相隔非常远，因此发生相关干扰的概率很小，上述考虑通常不适用于VLBI。（但能够同时从多个VLBI观测站看到GSO卫星的情况除外。）因此，有害干扰门限值应根据两组天线所测得的信号相关性因干扰而降低时的干扰电平来决定。该干扰门限值定义为接收机系统噪声功率的1% [Thompson等人，1986年和2001年]。

（需要注意的是，该电平值远大于探测和积分过程之后噪声起伏的10%，即单天线观测中总功率系统的干扰电平判据。）被确定为噪声功率判据的1%、并以spfd表示的VLBI门限值等于  $1.930 \times 10^{-23} (T_A + T_R) f^2$ ，表4.3列出了具体的数值，图4.2也绘制了相应的曲线。计算过程所使用的系统温度与表4.1和4.2所列数值相同，并在计算过程中引入了一个数值为1.4的因子，以考虑到数据记录过程中数字采样的量子化效应。干扰门限值的结果并不取决于具体的天线间距。在所有情况下，均假设干扰信号是通过增益为0 dBi的天线旁瓣接收。为了进行比较，表4.1中的总功率（单天线）观测值已使用最下方的曲线展现出来。

表 4.3

VLBI 观测的干扰电平门限值

中心频率 (MHz)	有害干扰电平 (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz)))
325.3	-217
611	-212
1 413.5	-211
2 695	-205
4 995	-200
8 400	-196
10 650	-193
15 375	-189
23 800	-183
43 000	-175
89 000	-172
150 000	-167
224 000	-162
270 000	-160

对于VLBI系统易受干扰性的特点，需要注意的是，图4.1显示，在相同频率处，VLBI的有害干扰门限值比连续谱总功率系统的门限值高大约40 dB。VLBI曲线和总功率曲线之间的区域涵盖了所有类型射电望远镜的门限值范围。必须强调的是，干涉仪和天线阵列的应用通常局限于针对角尺寸不超过若干角分（适用VLA）或十分之几角秒（适用VLBI）的高亮度分立射电源。对于向射电天文提供一般性保护而言，表4.1和4.2中列出的总功率结果仍然有效。

## 4.5 脉冲星

第二章介绍了脉冲星的特点。在脉冲星观测中，通常会使用谱线接收系统，以便及时校准不同频率通道的信号，去除频散的影响，然后再合成结果。在搜寻脉冲星的过程中，需要记录数据，然后使用一系列色散值和脉冲重复时间值搜索数据。对于可能出现的干扰，色散改正能够及时消除任何尖锐的特征，同时不对干扰电平的r.m.s.造成明显影响。一旦发现色散和重复时间，就可及时对脉冲进行校准和平均，从而研究脉冲形状，提高计时的测量精度。考虑到这种观测对灵敏度的不利影响，带宽采用全部接收带宽，但是有效的积分时间是脉冲出现的时间。因此，有害干扰的门限值是等效连续谱值除以脉冲出现时间段平方根的值。脉冲出现时间段等于脉冲持续时间除以重复的间隔，范围在百分之几到百分之几十。因此，在表4.1中，脉冲星观测的有害干扰门限值比等效的连续谱观测值高2-10 dB。脉冲星观测通常采用其他总功率观测也使用的大型天线，因此干扰保护方面的总体要求没有特殊限制。

## 4.6 达到的灵敏度

射电天文学家最为担心的灵敏度问题在于射电天文天线主波束内辐射源的辐射，而不在与干扰相关的旁瓣。这种说法适用于用于测量接收总功率的单天线或天线阵列的单天线。例如，一台直径70米在5 GHz运行的天线，其有效接收面积为2700 m<sup>2</sup>，增益为70 dB。因此，以pfd计量的主波束灵敏度比进入各向同性天线旁瓣辐射的灵敏度高70 dB。表4.1第6列显示，在接收机输入端强度相当于系统噪声的信号的灵敏度为2×10<sup>-27</sup>W/Hz(-267 dB(W/Hz))，因此2700 m<sup>2</sup>接收面积对应的spfd为：

$$2 \times 2 \times 10^{-27} / 2700 = 1.5 \times 10^{-30} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz}) \quad (4.11)$$

$$= -298.2 \text{ dB W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz}) \quad (4.12)$$

其中，公式左边引入了因子2，这是由于一个天线的任何输出，都对应于随机偏振射电波的一半功率。这是极高灵敏度的示例，比其他无线电业务实际达到的灵敏度高了多个数量级。

表4.4.给出了射电天文发表文献中高度灵敏的连续谱和谱线观测实例。单天线观测结果与表4.1和表4.2的有害干扰电平比较，阵列观测结果与图4.2或计算数值比较。天文观测数据远低于有害干扰电平，这是因为天文观测数据来自射天天文天线的主波束，而有害干扰的电平则对应旁瓣的接收数据，即二者之间的差别与天线增益相关。这些结果说明，射电天文观测灵敏度非常高，因此确认表4.1和4.2中的参数适用于当前的系统。

表 4.4

观测结果和干扰门限值的比较

频率 (GHz)	设备种类	谱线或连续谱	观测到的spfd (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz)))	有害干扰限值 (dB(W/(m <sup>2</sup> · Hz)) <sub>1</sub> )	参考
1.4	阵列	连续谱	-309	-255	[Owen & Morrison 2008]
5.0	阵列	连续谱	-308	-222	[Fomalont <i>et al.</i> , 1991]
1.42	单天线	谱线 (HI)	-288	-239	[Lockman <i>et al.</i> , 2011]
37.3	阵列	谱线 (CO红移)	-295	-211	[Walter <i>et al.</i> , 2012]
93.2	阵列	谱线 (CO红移)	-289	-208	[Walter <i>et al.</i> , 2012]

<sup>(1)</sup> 来自表4.1和 4.2, 从图4.1做插值获得

随着越来越多更加灵敏的接收设备投入使用, 射电天文观测对宇宙信号和干扰的灵敏度将继续提高。对于频率在大约100 MHz时, 接收机温度不会对系统总体温度产生明显影响 (见表4.1)。在频谱的高频段, 接收机技术的进步会发挥最大的作用。但是, 灵敏度的最大提升很可能来自更大型天线和天线阵列发展, 而不是过去那些认为可行的设想。

## 4.7 关于干扰的讨论

### 4.7.1 干扰电平

有害干扰门限值和限值以上约10 dB之间的干扰信号对射电天文观测的危害最大。原因在于这些信号的强度足以使数据产生错误, 但又足够弱, 使人们不易识别干扰的存在。限值以上20 dB及更高的干扰一般容易识别。在出现干扰的情况下, 测量数据对射电天文而言几乎无用, 受到干扰的数据必须编辑删除。

### 4.7.2 来自天体的干扰

一小部分天文射电源的强度能够干扰高灵敏度的观测。这些射电源的spfd可以超过表4.1的数据。最突出的例子就是太阳这一强大的发射源。由于太阳的干扰, 一些研究只能在夜晚进行。除了太阳活动的高峰期外, 其他实验有可能在白天进行。太阳爆发产生的发射在200 MHz以下很强。宁静太阳拥有很大的角直径和恒定的流量密度, 因此不会构成严重问题。

在1 GHz以下, 其他一些宇宙射电源超过了表4.1列出的spfd, 但这些射电源位于已知的精确位置, 辐射强度恒定, 随频率变化缓慢。在原则上和实际操作中, 射电天文学家进行最大可能高灵敏度观测时, 可以改正这些射电源的影响。另一方面, 低电平的地面辐射通常具

有不确定的位置、流量密度和频谱，而且随时间变化很大，因此除了删除无用的数据外，通常不能消减这些辐射对观测的影响。

### 4.7.3 地球静止卫星上发射器的特殊考虑因素

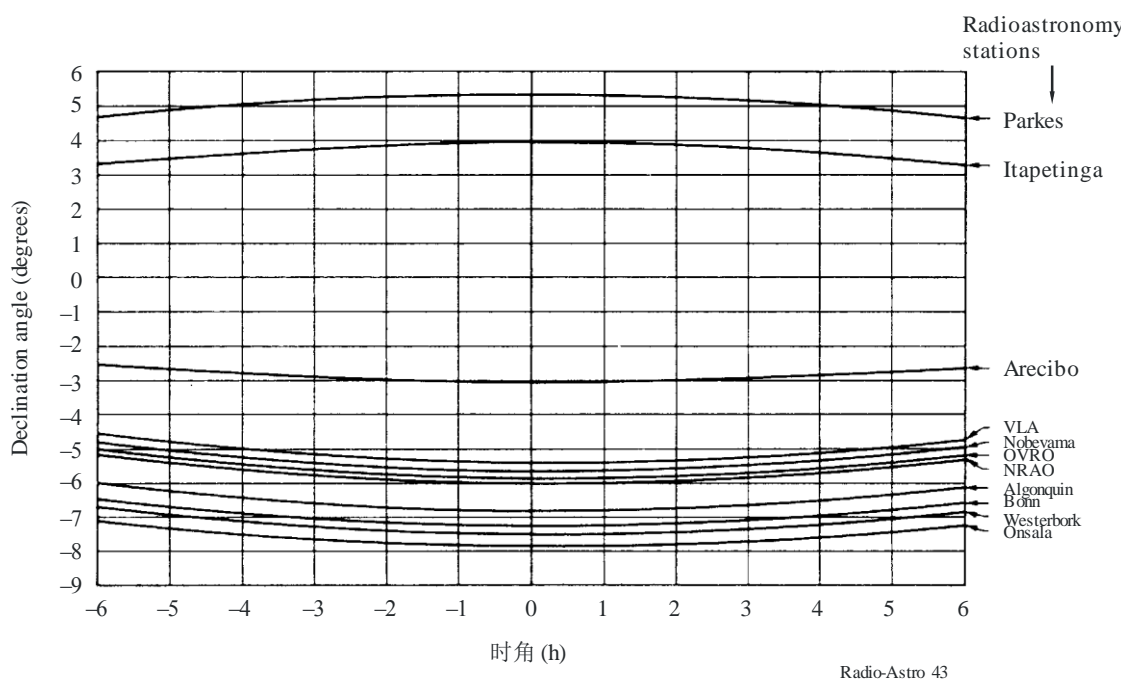
地球静止卫星传输信号产生的干扰尤其值得重视。首先需要指出的是，在相同频段出现下行链路信号时，射电天文学家无法进行观测。因此，来自卫星的干扰一般指进入射电天文频段的卫星发射无用信号。

因为表4.1和表4.2中的功率电平是假设天线增益为0 dBi时的计算结果，当增益大于0 dBi的天线旁瓣，指向以表4.1和表4.2功率发射的发射器时，就会出现有害干扰。对于旁瓣相当于公式(4.1)定义的参考天线的射电天文天线，当天线以 $19^\circ$ 或更小角度指向以这些功率发射的卫星时，干扰就会出现。因此，地球静止轨道上相隔一定距离出现的一系列类似卫星，使高灵敏度射电天文观测无法在以静止轨道为中线的 $38^\circ$ 区域内进行。如此大范围天空区域受到干扰，将严重限制射天天的观测。

为保护射天天文免受地球静止卫星发射干扰，所建议的有用判据见图4.3。图中显示在多个主要射电天文观测站所处的纬度，能看到的地球静止轨道在天球坐标上的投影。如果一台射电望远镜指向该轨道 $5^\circ$ 范围内时，会出现有害干扰，那么这台望远镜就损失了 $10^\circ$ 的天空进行高灵敏度观测。对于一个观测站来说，这将是非常严重的损失。但是，对于南半球和北半球在同一频率上工作的射电望远镜阵而言，整个天空都是可以观测的。因此， $5^\circ$ 的应视为射天天文天线主波束和地球静止轨道之间的最低角距要求。

图 4.3

在多个主要射电天文观测站处所看到的地球静止轨道在天球坐标上的投影



在公式4.1中，天线响应模型偏离主波束 $5^\circ$ 的旁瓣增益为15 dBi。因此，为避免对指向发射器周围 $5^\circ$ 范围内的射电望远镜产生有害干扰，在射电天文频段的卫星发射应比表4.1和4.2中pfd值低15 dB。若轨道上的卫星之间间隔只有几度，在天文台方向的、每次传输的e.i.r.p.水平必须更低才能达到要求，即接收到的干扰信号总功率应比表4.1和4.2中的 $\Delta P_H$ 低15 dB。

最小化主波束附近旁瓣的增益水平，对进一步保护射电天文业务免受卫星发射干扰具有明显效果，因此在未来射电天文天线的设计中应重点考虑这一因素。

#### 4.7.4 滤波

使用带通滤波器，可以滤除射电天文接收机通带外的无用信号能量。可在接收系统的不同阶段插入滤波器，确保无用信号在任一点都不足以造成非线性结果。使用数字滤波器能够达到很高的可选择性，但之前必须进行足够的放大处理，使信号能够被数字化。相对于谱带中心，谱带边的响应需低-100 dB，因此-3 dB处的滤波器带宽可小于指配频带的全部带宽。由于中频相对较低，一般在100 MHz和10 GHz之间，因此相对较陡的滤波器边缘是可能的。滤波器响应的边缘斜率取决于滤波段的数量和设计响应。第6章会进一步讨论滤波。

#### 4.7.5 能够破坏射电天文接收器或使其饱和的干扰电平

ITU-R RA. 2188号报告 – 对射电天文接收机构成潜在损害的功率流量密度和e.i.r.p.电平中指出，等级达到25 mW的输入功率足以损坏或破坏大多数射电天文接收机，远低于该电平的输入功率足以使接收器增益饱和。在下列设想情况中，现有雷达能够引起达到以上功率水平的输入。

- 主波束-主波束耦合。若高增益射电天文天线的主波束与频率，与在1到94 GHz的高功率、小光斑、各种轨道地球感应雷达的主波束重叠，会出现这种情况[SFCG Ref]。虽然从统计学上看，罕见这种耦合，但射电天文观测员遇到这种情况的后果非常严重。
- 主波束-旁瓣耦合。正如ITU-R 1750建议书 – 在94 GHz和130 GHz频带卫星地球探测业务（有源）和射电天文业务的共同规划中指出，当安装有射电天文接收机的天线直接被大功率地球感应轨道雷达照射时，即使被0 dBi的射电天文天线旁瓣接收，接收机也会饱和。相反，若射电天文天线的增益高于轨道雷达，当射电天文天线主波束被0 dBi或更弱的轨道雷达旁瓣照射时，射电天文接收机将会饱和。

即使较为温和的发射器，如ITU-R M. 1452建议书 – 用于智能交通系统应用的毫米波汽车防撞雷达和无线电通信系统中描述的76-77 GHz和77-81 GHz汽车防撞雷达，鉴于其在工作频率所产生的高增益和小斑尺寸，当这些发射器在射电天文天线附近工作时，其功率电平也将使接收机饱和或破坏电。

## 4.8 蒙特卡罗分析

蒙特卡罗分析有时用来估计干扰信号超过射电天文有害干扰门限值的时间段。当干扰源方向和射电望远镜主波束之间的角度快速变化时，这一分析过程就非常有用。当干扰源移动

时，如非静止轨道卫星，和/或望远镜根据天文项目的要求改变指向时，可引起方向变化。有源干扰源的数量和距离也会变化，如来自地面移动车辆的干扰。蒙特卡罗方法会分析大量的试验构型，在每个构型中随机从一系列数值中选取各未知参数的值。这一系列数值都是相关参数的合理统计。事实上，蒙特卡罗分析是包含多个独立试验的统计试验。在每个试验中，根据固定的、事先确定的概率分布随机选择所有参数。超过干扰门限值的部分试验反映了在实际情况中干扰出现的概率。但是，例如不超过2%的试验显示干扰超过有害干扰门限值，不能确认干扰的概率不超过2%，但对于给定的确定性，可以得出干扰概率对应的上限。下文对这些关系进行简要探讨，并引用Ponsonby [2002]的分析。需注意，当单个事件出现的概率很低时，蒙特卡罗方法就不适宜用于精确确定概率的值，因为蒙特卡罗分析需要大量的试验模拟来建立有效统计数据。

假设在分析中有 $N$ 次试验，在 $n$ 个案例中结果不合格，即干扰超过有害干扰门限值。设 $p$ 为任意一次试验出现不合格结果的概率。试验中 $p$ 的值趋向于 $n/N$ ， $N$ 趋向于无穷大。对于 $N$ 值有限的情况，在 $p$ 值给定时，获得 $n$ 个不合格结果的概率见伯努利分布，即：

$$P_p(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{(N-n)} \quad (4.12)$$

为解读蒙特卡罗分析，我们需要知道 $P_n(p)$ ，即在有限试验中获得 $n$ 个不合格结果的概率分布 $p$ 。这是一个反向问题，需要使用以下积分对分布进行归一化才能解决：

$$\frac{N!}{n!(N-n)!} \int_0^1 x^n (1-x)^{(N-n)} dx = \frac{1}{N+1} \quad (4.13)$$

那么反概率就为：

$$P_n(p) = \frac{(N+1)!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{(N-n)} \quad (4.14)$$

假设要求 $p$ 的实际值在90%的情况下不大于设定值 $p_{90}$ ，那么 $P_n(p)$ 必须满足以下积分等式：

$$\int_0^{p_{90}} P_n(p) dp = 0.9 \quad (4.15)$$

对于不合格结果为2%的概率， $p_{90} = 0.02$ 和公式(4.15)为 $N$ 和 $n$ 提供了解，那么可以得出结论：在 $N$ 次试验中，任一次试验中不合格结果低于2%的确定性为90%。当 $N$ 值不同时，表4.5显示 $n$ 的值不能超越，从而可以得出结论：任一次试验中，不合格结果低于2%的确定性为90%。注意到，当 $N$ 变的非常大时， $n/N$ 接近2%。但是当 $N=390$ 时， $n/N$ 的值不能大于1%，才能满足不合格结果小于2%的确定性为90%。



表 4.5

出现不合格结果的概率低于2%，确定性为90%时， $N$ 和 $n$ 的值。

$N$	$n$	$n/N$ (%)	$p_{90}$ (%)
292	1	0.52	2.0
397	4	1.01	2.0
776	10	1.29	2.0
1 900	30	1.58	2.0
10 000	181	1.81	2.0
50 000	960	1.92	2.0

## 第四章

### 附件 1

#### ITU-R S.1428建议书中的旁瓣模型

对于直径为 $D$ 且 $D$ 大于100倍波长 $\lambda$ 的天线，ITU-R S.1428建议书中的旁瓣增益模型如下：

$$\begin{aligned}
 G(\varphi) &= G_{max} - 2.5 \times 10^{-3} \{D\varphi/\lambda\}^2 \quad \text{dBi} & \text{for } 0^\circ < \varphi < \varphi_m \\
 G(\varphi) &= G_1 & \text{for } \varphi_m < \varphi < \varphi_r \\
 G(\varphi) &= 29 - 25 \log(\varphi) \quad \text{dBi} & \text{for } \varphi_r < \varphi < 10^\circ \\
 G(\varphi) &= 34 - 30 \log(\varphi) \quad \text{dBi} & \text{for } 10^\circ < \varphi < 34.1^\circ \\
 G(\varphi) &= -12 \quad \text{dBi} & \text{for } 34.1^\circ < \varphi < 80^\circ \\
 G(\varphi) &= -7 \quad \text{dBi} & \text{for } 80^\circ < \varphi < 120^\circ \\
 G(\varphi) &= -12 \quad \text{dBi} & \text{for } 120^\circ < \varphi < 180^\circ
 \end{aligned}$$

其中：

$$\begin{aligned}
 G_{max} &= 10 \log\{\eta(\pi D/\lambda)^2\} \quad \text{dBi} \\
 \eta: & \text{ aperture efficiency for } \eta = 0.7, G_{max} = 20 \log\{D/\lambda\} + 8.4 \quad \text{dBi} \\
 G_1 &= -1 + 15 \log\{D/\lambda\} \quad \text{dBi} \\
 \varphi_m &= \{20\lambda/D\}(G_{max} - G_1)^{1/2} \quad \text{度} \\
 \varphi_r &= 15.85 \{D/\lambda\}^{-0.6} \quad \text{度}
 \end{aligned}$$

## 参考文献

- BARNBAUM, C. and BRADLEY, R. F. [1998] A new approach to interference excision in Radio Astronomy: real-time adaptive cancellation. *Astron. J.*, Vol. 116, p. 2598-2614.
- CCIR [1966] Report 224-1. Documents of the XIth Plenary Assembly, ITU, Geneva, Vol. IV, p. 537-548.
- ELLINGSON, S. W. and CAZEMIER, W. [February 2003] Efficient multibeam synthesis with interference nulling for large arrays. *IEEE Trans. Ant. Prop.*
- FOMALONT, E. B. *et al.* [1991] The micro-jansky radio source population at 5 GHz. *Astron. J.*, Vol. 102, p. 1258-1277.
- KRAUS, J. D. [1966] *Radio Astronomy*. McGraw Hill, New York, NY, Second ed. 1986, Cygnus-Quasar Books, Powell, OH.
- LOCKMAN, F. J., FREE, N. L. and SHIELDS, J. C. [2012] The Neutral Hydrogen Bridge Between M31 and M33, *Astron. J.*, Vol. 144, p. 52 – 67.
- OWEN, F. and MORRISON, G. E., [2008] The Deep Swire Field I. 20 cm Continuum Radio Observations: A Crowded Sky, *Astron. J.*, Vol. 136, p. 1889-1900.
- PONSONBY, J. E. B. [10-14 June 2002] On 2% by Monte Carlo, Proc. of IUCAF Summer School In Spectrum Management And Frequency Coordination, NRAO, Green Bank, West Virginia.
- SMOOT, GPlanck Collaboration *et. al* [2011] Planck early results. I. The Planck Mission, *Astron. and Astrophys.*, Vol. 536, 1
- SFCG: information available at <https://www.sfcgonline.org>
- SMOOT, G. *et al.* [1992] Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps. *Astrophys. J. (Letters)*, Vol. 396, L1-L5.
- THOMPSON, A. R. [1982] The response of a radio-astronomy synthesis array to interfering signals, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-30, p. 450-456.
- THOMPSON, A. R., MORAN, J. M. and SWENSON, G. W. Jr. [1986 and 2001] *Interferometry and synthesis in radio astronomy*. John Wiley, New York, NY, reprinted by Krieger Press, Melbourne, FL., see Chapter 14. Second ed., John Wiley, 2001, see Chapter 15.
- WALTER, F. *et al* [2012] *Nature*, The intense starburst HDF 850.1 in a galaxy overdensity at  $z \approx 5.2$  in the Hubble Deep Field, Vol. 486, p 233-238.

## 第五章

### 与其它业务共用射电天文业务频段

#### 5.1 概述

多数射电天文业务频段均与进行发射的有源业务共用。这种共用对于本身为无源业务的射电天文极为困难，因为射电天文对干扰非常敏感。由于天体距离遥远，因此，所研究的发射pfd电平往往低于射电天文台附近人为发射100dB或更多。天文信号的强度和特性取决于自然规律，而且无法由射电天文学家控制。此外，由于该学科具有实验性质，因此射电天文学家常常无法事先了解发射的特性。所有这些因素都使射电天文尤其易于受到干扰的影响。不仅强干扰信号会破坏天文信号从而造成损害，弱干扰信号也很有害。对射电天文造成潜在危险的干扰，是单独测量中可被识别、且在观测的大部分时间都存在的、刚刚低于功率电平的干扰。在这种情况下，由于在观测过程中可能没有能够发现该干扰的措施，因此使随后结果包含严重误差。

射电天文观测台站通常位于专门挑选的台址，以便最大限度地降低来自其它业务的干扰。一般来说，台址距主要地面干扰源较远，且如果并非观测毫米波长信号（选址工作中重要的一点是尽可能位于大气层高处）的话，台址经常被附近的高地屏蔽。有了对天文台的这一保护以及地球曲面提供的保护，在发射功率很低且有足够地理隔离的条件下，有可能实现射电天文台与地面发射台之间的共用。然而，由于射电天文所用系统极为灵敏，因此，通常需要很大的隔离距离。第5.3段表明，当发射机位于射电天文天线或天线馈源的视距（LoS）内时，通常无法进行共用。一般来说，发射机需要高出地平线100公里或以上。由航空器、航天器、高空平台台站或气球搭载的发射机可以在极远距离上保持在天文台的视距范围内，因此经过认真挑选的观测台址和地球曲面造成的衰减优势都将不复存在。在高频频率上（3-30MHz），所收到的干扰几乎毫无例外地通过电离层传播。在这种情况下，挑选观测台址和地球曲面都不能提供保护，且在有些情况下，预计可能出现地球任何地点上同通道发射机产生的干扰。

如果对本地、区域和全球共用问题予以区分可能非常有益。本地问题（如由射电天文观测台附近发射机产生的干扰）需要在本地层面得到解决，同时将台址屏蔽等因素考虑在内。区域问题（如由电视发射机产生的干扰）必须在区域层面解决，同时考虑到国家频率规划和其他区域因素（如地理位置靠近国家的不同状况和频率指配）。全球问题（如由星载发射机造成的干扰）则只能在国际电联层面解决。每一类共用问题都需要有各自类型的解决方案。

#### 5.1.1 射电天文业务（RAS）的保护标准

射电天文的一项重要保护标准定义为有害干扰的功率电平。有害干扰门限值取决于观测频率和进行测量的类型（如第4章所述）。同时，可能也需要考虑到干扰的详细特性。

第二个标准涉及射电天文观测有待保护的天空部分。对于地面干扰源而言，射电天文天线在干扰源方向（或远处发射机的水平方向）的增益值为0 dBi。采用这一数值，意味着具有

ITU-R RA.769建议书有害干扰门限电平的潜在干扰源，将不会对在大于 $19^\circ$ 仰角进行的观测带来有害干扰（以ITU-R SA.509建议书给出的辐射方向图范例为基础）。如果（地面）干扰源发射通过增益大于 $0\text{dBi}$ 的旁瓣接收，则在低于 $19^\circ$ 仰角进行的观测会受到干扰影响。如ITU-R RA.1513建议书附件1所述，在这种情况下，实际上将损失用于射电天文观测的部分天空。事实上，射电天文学家可能已有所准备来接受这种天空覆盖的限制。因为地球的转动，会方便多数天体在更有利的仰角进行观测。然而，对于仅在地平线上短暂出现天体的观测（如从高北纬度进行银河中心观测）或关键时间点的观测而言，这种天空损失会带来极大限制。对于源自对地静止航天器的干扰而言，射电天文天线的增益值可取为 $12\text{-}15\text{dBi}$ ，从而允许在对地静止轨道卫星的 $5^\circ$ 内进行观测（如第4章所述）。ITU-R S.1568和ITU-R M.1583建议书阐述有关将天空损失概念用于航空器或非对地静止卫星轨道航天器所载发射机产生的干扰情况。

第三个必须考虑的标准是在不严重降低射电天文业务运行质量的条件下，门限干扰电平被超出的时间百分比。ITU-R RA.1513建议书探讨了时间百分比标准以及与之相关的天空损失问题。该建议书规定，在任何划分给作为主要业务的射电天文业务频段内，所有业务发射机导致的射电天文业务累加数据损失不大于为 $5\%$ ，任何一种业务发射机导致的数据损失均不得大于 $2\%$ 。应当指出，累加数据损失概念尚不完善，还需要进一步研究不同网络和业务之间的干扰比例。ITU-R RA.1513建议书还规定，数据损失百分比被确定为2000秒积分周期中射电望远镜平均spfd超出ITU-R RA.769建议书规定电平的时间百分比（假设天线增益为 $0\text{dBi}$ ）。对于时间周期为几秒或更少的干扰效应，还需要进一步研究。

必须强调指出，对某些类型的观测而言，由于干扰造成的 $5\%$ 失败率会对射电天文学家带来严重限制。对某些观测而言，如彗星、月掩星或超新星爆发，需要有很高的成功概率，因为这些观测难以或无法重复。其它类型要求在不同波长上和若干个站点进行同时测量的观测，且如果整个实验要取得成功，就必须实现每个部分的成功，其中一个示例是耀现新星的多波长协同研究。如果由于干扰而使任一观测站进行的观测无法使用，则这类实验会受到严重损害。存在这类困难的天文台需要相关国家在特定时间和特定频率上做出特殊安排。

另一个需要考虑的传播效应是干扰信号的反射。在共用频段中，航空器的反射可能产生干扰，即便地面发射机距离遥远。此外，还存在低轨道卫星反射造成干扰的可能性。单一反射体的效应可能很短暂，且干扰问题取决于空中或太空交通的密度。目前的问题是，由于各种太空活动，在围绕地球的轨道中出现了大量金属物体。对共用频段中特定类型的射电天文测量而言，月球对地球传输的反射会带来严重干扰。

迄今为止，考虑的保护标准涉及干扰功率门限、需保护的天空百分比和需保护的观测时间段。所有这些均与地理共用直接相关，即，通过两个业务之间的地理隔离实现它们同时在同一频率上的操作。在一些业务之间进行共用时，可以通过采用正交偏振增加保护。这一技术对于保护射电天文而言用处不大，这是因为在许多观测时都必须采用双偏振，而且干扰通常通过高增益天线的远旁瓣进入射电天文系统，前者的偏振特性与主波束的偏振特性大相径庭。

应当指出，除极少见情况外，只有通过有效的地理隔离才能实现与RAS的共用。如第5.9段所述，通过有限分时共用，可以允许在射电天文台址开展特殊观测工作，且有时这也是确实必要的，特别是在未划分给射电天文的频段中，这一点尤其有益。

## 5.2 与单一发射机共用所需的隔离距离（见ITU-R RA.1031建议书）

如要实现地理共用的成功，产生干扰的发射机与受干扰接收机之间必须具有干扰不被认为是有害的隔离距离。对于第4章所述的标准而言，超出隔离距离的衰减必须在除 $p\%$ 之外的所有时间内都是充分的，以便将干扰信号降低至ITU-R RA.769建议书确定的相关电平之下。

《无线电规则》（RR）附录7对传输损耗 $L_b(P)$ 做出定义，以下给出增加了大气衰减项A的该公式：

$$L_b(p) = P_t + G_t + G_r - P_r(p) - A \quad (5.1)$$

其中：

$L_b(p)$ ：  $p\%$ 时间内所允许的最低基本传输损耗（dB）；在除 $p\%$ 外的所有时间内，实际传输损耗需超出该数值

$P_t$ ： 天线输入端参考带宽内的发射功率电平（dBW）

$G_t$ ： 射电天文天线方向的发射天线增益（dBi）

$G_r$ ： 发射机方向的射电天文天线增益（dBi）

$P_r(p)$ ： 参考带宽内，接收机输入端  $p\%$ 时间内最大允许的干扰功率（dBW）

A： 由大气吸收造成的附加损耗。

采用第4章给出的保护标准， $G_r = 0$  dBi，则公式（5.1）的形式为：

$$L_b(p) = P_t + G_t - P_r(p) - A \quad (5.2)$$

其中 $P_r$ 将采用第4章表4.1或表4.2的第7栏。应采用合适的模型计算 $L_b(p)$ ，如ITU-R P.452、ITU-R P.526和ITU-R P.617建议书给出的综合模型。

随着湿度的加大和观测频率的提高，大气衰减会急剧增加。在15 GHz以下，天顶大气衰减往往很小， $< 0.1$  dB，因此可在公式（5.2）中忽略不计。在15至115 GHz之间，干燥的高海拔台址天顶不透明度较小， $< 1$  dB，因此仅提供较小的干扰保护。在115 GHz之上，大气分子谐振频率附近的大气不透明度急剧变化，因此可以提供有效的干扰保护（见5.7段）。

对于视距传输，通常自由空间传输损耗保持不变，因此不适用时间百分比标准。在这种情况下， $L_b$ 可用简单的解析式表达，公式（5.2）可写作：

$$20 \log(4\pi d) - 20 \log(\lambda) = P_t + G_t - P_r - A \quad (5.3)$$

其中 $d$ 为发射机与接收机之间的距离（米）， $\lambda$ 为波长（米）。

在上述分析中， $P_t$ 是在射电天文接收机 $B_r$ 带宽内的发射功率。如果发射功率 $P_T$ 分布在带宽 $B_t$ ，并且 $B_t > B_r$ ，则：

$$P_t = P_T - 10 \log(B_t/B_r) + A \tag{5.4}$$

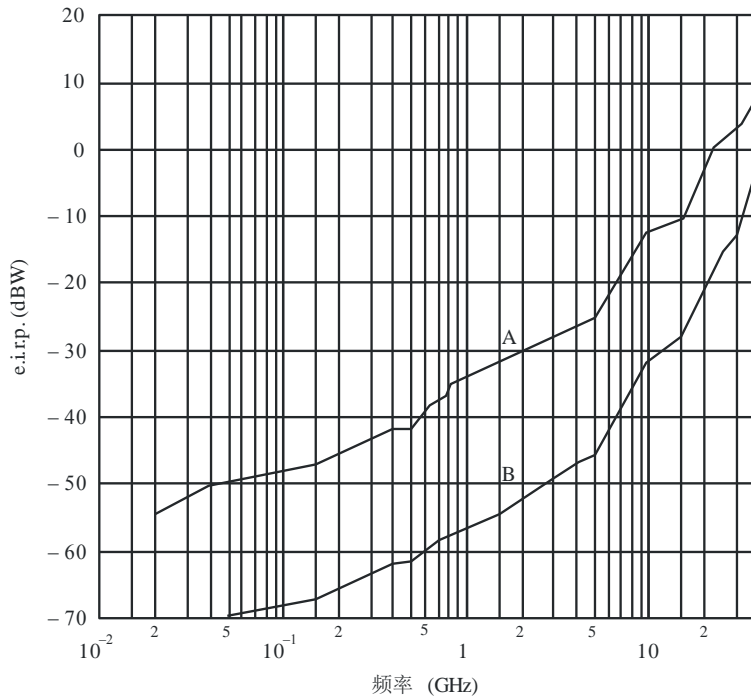
其中假设发射功率具有有相同的谱密度。

### 5.3 在视距内共用

对于发射机位于天文台视距（LoS）范围内的任何其他业务，射电天文几乎不可能与与这些业务成功共用划分的频谱，图5.1具体表明了这一事实。采用等式（5.3）和（5.4）计算两个隔离距离，获得了不会对RAS造成有害干扰的最大e.i.r.p。600公里是远距离LoS范围内典型地面发射机的隔离距离，即距地面20公里高的航空器所搭载的发射机。另一个隔离距离为对地静止轨道距离，因此，代表了多数并非执行深空任务的航天器搭载发射机的最大距离。在地面发射机的情况下，采用了ITU-R RA.769建议书表1给出的门限干扰电平。正如第4.7.3段所述，对于静止轨道中的发射机而言，有必要增加12-15 dB的保护，从而允许在轨道卫星的5°内做出观测。图5.1中曲线适用于晴朗干燥大气。在高于50 GHz的频率上，大气吸收可达到每公里十分之几分贝，取决于水蒸气密度以及在长距离上与低功率发射机的共用（如果在有些情况下可以看得见的话）。

图 5.1

作为频率函数的e.i.r.p.



注 - 高于此注：超出图示e.i.r.p. 值，则无法实现RAS 与其发射机在射电天文观测台LoS 范围内有源业务之间的共用。在此假设射电天文接收机的通带等于划分给RAS的频段，且e.i.r.p. 为在该频段内等效全向辐射的功率。曲线A表示对地静止轨道内发射机的结果，曲线B表示距离600公里LoS内地面发射机的结果。

Radio-Astro\_51

图5.1清楚地表明，在10 GHz以下频率，因为会对发射机的e.i.r.p.带来严重限制，射电天文业务与LoS内地面发射机共用几乎无法实现。即便是在最高为40 GHz的频率，或者发射机的功率必须不得高于几毫瓦，或者发射天线必须提供朝向天文台方向的高度识别，才有可能实现共用。对于典型功率超过1瓦的非深空航天器搭载发射机而言，在最高约为20GHz的频率，即使天文台在航天器搭载天线覆盖区以外，也无法实现共用。在20 GHz至50 GHz之间，在航天器搭载天线覆盖区内几乎不可能实现共用。高度低于6 400公里的航天器搭载发射机，需要将其e.i.r.p.限制于曲线A和B之间才能实现共用。

第5.8段阐释与执行深空任务的航天器进行共用的特殊情况。

#### 5.4 与具有地面发射机的业务共用

在射电天文台址周围建立协调区，提供了一种方法，避免与射电天文共用频段的其他业务地面发射机产生有害干扰。此前的讨论清楚地表明，只可能与其发射机超出地平线的业务进行共用。确定协调区的基本标准为：协调区外所有用户产生的总干扰不得超过在射电天文台址处测量得到的有害干扰门限电平。因此，协调区的范围取决于若干因素。在射电天文台址处进行的测量类型决定了ITU-R RA.769建议书给出的相应干扰门限值。协调区外用户的数量及其分布、射电天文台址方向用户发射的e.i.r.p.、用户工作的时间长短以及传播特性决定着射电天文台址处产生干扰的pfd。传播特性取决于地貌特征、树木情况和大气条件等因素。第5.2段提出了可用的传播模型建议。

由于所涉因素众多，因此，有必要单独为每一个需要设立协调区的射电天文台址确立协调区的边界，同时考虑到射电天文测量以及共用相关频段有源业务的特殊性质。应当认识到，协调区的范围可能为100公里或更大。对许多小国而言，所需要的协调区可能会超越其本国国界并延伸至频率划分与之不同的其他国家，因此，在小国家确定保护射电天文的协调区时，可能需要规定特别条件。

协调区定义为包括射电天文台周围的一个区域，在该区域之外，有源业务用户可自由进行发射而不会对射电天文观测产生干扰。对于协调区内的用户而言，必须找到避免对RAS造成有害干扰的技术手段。例如，可以谨慎选择固定发射机的地点，以充分利用自然屏蔽的优势，或在设计发射天线时，使其在观测台方向发射为零。在其他情况下，唯一的技术解决方案，可能是避免在协调区中的射电天文频段内进行任何发射。

#### 5.5 与移动业务进行共用

原则上，可以通过建立协调区保护射电天文台址免受移动发射机的干扰。在这种情况下，移动用户必须拥有一些手段，来确定何时已进入了协调区，并通过一些措施，将射电天文台收到的干扰降低至有害干扰门限电平之下。ITU-R M.1316建议书在蒙特卡罗模拟近似基础上，规定了1 610.6-1 613.8 MHz和1 660-1 660.5 MHz频段内MSS（地对空）与RAS之间的共用原则和方法。该方法除采用协调区外，还引入移动业务不能进行发射的内部限制区以及对移动业务操作施加某种限制的中间限制区。然而，蒙特卡罗近似作为有效保护射电天文的基础，其有效性还需要在实践中得到检验。

对于航空器搭载的移动发射机而言，所需的协调区比地面发射机的协调区范围要大很多。如第5.3段所述，航空器可能在很大距离上保持在射电天文观测台的LoS内，因此，共用很可能非常困难。通常而言，协调区的范围可能需达到数百公里，除非射电天文台址极为例外地得到很高地平线的屏蔽。

## 5.6 低于40GHz射电天文频段内的共用

表5.1给出40 GHz以下射电天文频段的共用计算结果（源自前CCIR（国际无线电咨询委员会）696-2号报告）。该表说明了RAS的众多共用情况以及所需的很大隔离距离。如此前各节所述，对多数频段而言，均计算了假设发射机与射电天文接收机之间所需的隔离距离。提供所需基本传输损耗的隔离距离取决于传播机制。对于最高为38 MHz的频率，电离层效应是决定因素；对于更高频率而言，对流层散射在10%的时间内是造成干扰的主要因素。在没有采用最新模型（ITU-R P.452、ITU-R P.526和ITU-R P.617建议书）的条件下，计算了74 MHz至408 MHz频率之间的隔离距离。据估算，在所有典型的220 dB基本损耗传输中，传播损耗误差约为10 dB，这进而意味着，在将相关结果与采用最新传播模型所获结果相对比时，可能出现通常为50-100公里的隔离距离误差。采用ITU-R P.452-5建议书，计算了408 MHz以上频率的隔离距离。整个计算过程中，射电天文天线的高度均被假设为25米，但计算结果与这一假设关系不大。目前给出了两种情况的估算结果，一种是台址的地平角为1°，另一种是地平角为4°，获得很好保护的台址。以下还详细讨论了一些特定频段的情况。



表 5.1

源自前CCIR 696-2号报告（1990年）的共用参数和隔离距离

频率 (MHz)	假设产生干扰的发射机						假设射电天文接收机			所需传输 损耗	隔离距离	
	业务	$P_t$ (dBW)	$G_t$ (dBi)	e.i.r.p. (dBW)	$B_t$ (MHz)	No.	C/S L	$P_r$ (dBW)	$B_r$ (MHz)		$L$ (dB)	$d(1^\circ)$ (km)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
13	F			10	0.01	1	C	-185	0.05	195	>4000	>4000
25	F			10	0.01	1	C	-188	0.12	198	>4000	>4000
38	F	13	3	16	0.02	5	C	-190	0.50	213	930	700
74	F	15	10	25	0.03	7	C	-195	1.6	228	990	780
150	M	14	0	14	0.03	10	C	-199	2.95	223	820	600
327	M	14	0	14	0.03	15	C	-201	6.60	227	730	550
408	M	14	4	18	0.025	12	C	-203	3.9	232	760	560
610	B			40	6.0	1	C	-202	6.0	242	685	345
1365	R	27	0	27	0.50	1	C	-205	27.0	232	440	155
	R	27	0	27	0.50	1	SL	-220	0.02	233	450	160
1665	F	7	38	45	3.5	1	SL	-220	0.02	243	525	220
	F	7	0	7	3.5	1	SL	-220	0.02	205	155	<100
	LMS(E-S)	-	-	0	0.004	1	SL	-220	0.02	220	290	<100
	F	7	38	45	3.5	2	C	-207	10.0	252	630	305
	F	7	0	7	3.5	2	C	-207	10.0	214	230	<100
2700	F	10	0	10	10	1	C	-207	10.0	217	215	<100
4830	F	10	44	54	40	1	C	-218	0.05	243	410	135
	F	10	0	10	40	1	C	-218	0.05	199	<100	<100
5000	F	10	44	54	40	1	C	-207	10.0	255	540	230
	F	10	0	10	40	1	C	-207	10.0	211	125	<100
10600	F	7	44	51	100	1	C	-202	100	253	430	155
	F	7	0	7	100	1	C	-202	100	209	<100	<100
14500	FS(E-S)	27	0	27	50	1	SL	-214	0.15	216	<100	<100
22200	F	-7	45	38	50	1	SL	-210	0.25	224	<100	<100
31000	F	-10	45	35	100	2	C	-192	500	227	<100	<100

- (1) 射电天文频段频率。
- (2) 发射机在其中操作的业务 (F: 固定; M: 移动; B: 广播; R: 无线电定位; FS(E-S): 卫星固定业务 (地对空) 和 LMS(E-S): 卫星陆地移动 (地对空)。
- (3) 发射功率 (相对于1 W的 dB)。
- (4) 射电天文台方向的发射机增益。
- (5) 射电天文台方向的发射机e.i.r.p.。
- (6) 单一发射机的发射带宽。
- (7) 假设在射电天文频段内同时发射的发射机数量。
- (8) 射电天文观测类型 (C表示连续谱观测, SL表示谱线观测)。
- (9) 分别为连续谱和谱线观测的有害干扰门限值, 源自第4章表4.1和4.2的第7栏。
- (10) 计算中使用的射电天文带宽。
- (11) 使用等式 (5.2) 和 (5.4) 计算得出的所需传输损耗。
- (12) 当射电天文台地平角为 $1^\circ$ 仰角时, 避免对射电天文观测产生有害干扰的所需隔离距离。
- (13) 当射电天文台地平角为 $4^\circ$ 仰角时, 避免对射电天文观测产生有害干扰的所需隔离距离。

### 5.6.1 1330-1427 MHz频段

氢原子21厘米波长谱线附近的频谱区对于射电天文而言非常重要。在1 400 MHz-1 427 MHz的全球划分专用无源频段，用于射电天文谱线和连续谱观测，充分认可了这种重要性。多年来，经多普勒频移到更低频率的氢原子谱线观测日趋重要。这种谱线移动到更低频率的现象是由于遥远星系正快速离开我们银河系造成的。《无线电规则》第5.149款认可了这些观测的重要性，该条款为1 400 MHz以下相邻频段内的射电天文提供了某些保护。在该频段，无线电定位在2区和3区具有主要业务地位，并在1区与固定和移动业务同为主要业务。

该频段内用于航空用途的典型无线电定位系统，为峰值脉冲功率为500千瓦且天线增益为34 dBi的地基雷达。如果射电天文接收机的动态范围足以容纳雷达的峰值功率，那么与干扰有关的重要参数是在积分时间内进入射电天文接收机的平均功率。对于360度扫描的雷达，射电天文台方向的平均e.i.r.p.大约与发射机的平均功率相当。发射的实际功率为雷达天线辐射方向图与扫描性质的函数。假定雷达的占空比为0.001，平均功率为500瓦。对于谱线观测，采用了ITU-R RA.769建议书的表2，在20 kHz带宽内的有害干扰电平为-220 dBW。假定500瓦的雷达输出功率在0.5 MHz（一个2 μs脉冲）上均匀分布。这使得进入射电天文接收机单通道的功率降低了 $10 \log (500/20)$ ，即14 dB。此时，所需的基本传输损耗为233 dB，导致水平仰角为1度和4度时的隔离距离分别为450公里和160公里：参见表5.1。必须指出，当平均干扰刚刚到达有害门限时，进入接收机输入端的峰值功率为-142 dBW。在0.5 MHz频段内，尤其是接收机前端通带有一个以上的雷达信号，这比接收机噪声功率高15 dB，在平均功率方面，非线性影响可能会使分析无效。

### 5.6.2 4 800-5 000 MHz频段

在4 800-4 990 MHz频段，射电天文有次要划分，而固定和移动业务则有主要业务划分。但是，《无线电规则》脚注5.149单独列出了特别对待的4 825-4 835 MHz和4 950-4 990 MHz频段。这两个频段是第一次用于甲醛谱线观测的频段。

在4 990-5 000 MHz频段，射电天文与固定和移动业务（航空移动除外）同为主要业务。该频段内的固定业务使用或者是低功率无线电中继系统，或者是对流层散射系统。由于后一种系统采用了很大的平均功率，难以与射电天文共用。发射机功率可能为10瓦、射频带宽为40 MHz且天线增益为44 dBi的无线电中继系统，其共用问题较容易解决。表5.1给出了两种无线电中继系统的结果，一种天线直接指向射电天文台，另一种的指向远离天文台（在天文台方向的增益为0 dBi）。

### 5.6.3 22.01-22.21和22.21-22.5 GHz频段

在这两个频段的第一个频段中，射电天文并没有划分，但敦促各主管部门保护射电天文观测。在第二个频段中，射电天文有主要业务划分。在两个频段中，均是与固定和移动（航空移动除外）业务共用。该频段包含了重要的22.235 GHz水蒸气谱线，它与此处考虑的谱线观测共用。水谱线观测是观测强微波激射发射（超脉泽现象），它在活动星系中心的大质量

黑洞附近产生，并可在静止频率的大多普勒频移上探测到[Greenhill *et al.*, 2003]。表5.1中给出固定业务天线指向射电天文台情况下的计算结果。

## 5.7 40 GHz以上射电天文频段的共用

在40 GHz以上，有用于连续谱和谱线观测的射电天文业务划分。其中一些划分与各种有源业务共用。直至近期，只有相对屈指可数的几个有源系统工作在40 GHz以上，因此报告射电天文受到干扰的事件寥寥无几。现在，这种情况正在发生变化，已针对几个频段开展共用分析，其中包括射电天文与固定业务、卫星固定业务（地对空）及移动业务（航空移动除外）共用的42.5-43.5 GHz频段。固定业务应用包括高密度固定业务应用（参见《无线电规则》脚注5.547）。与40 GHz以上有源业务的共用比在低端频率可能更为容易，理由有几点。首先，有了尺寸适中的天线，可在这些频率上轻易地实现发射的指向性；其次，这些频率的大气衰减更大；第三，对流层对信号的散射随着频率的增加而降低。

### 5.7.1 60至275 GHz的共用

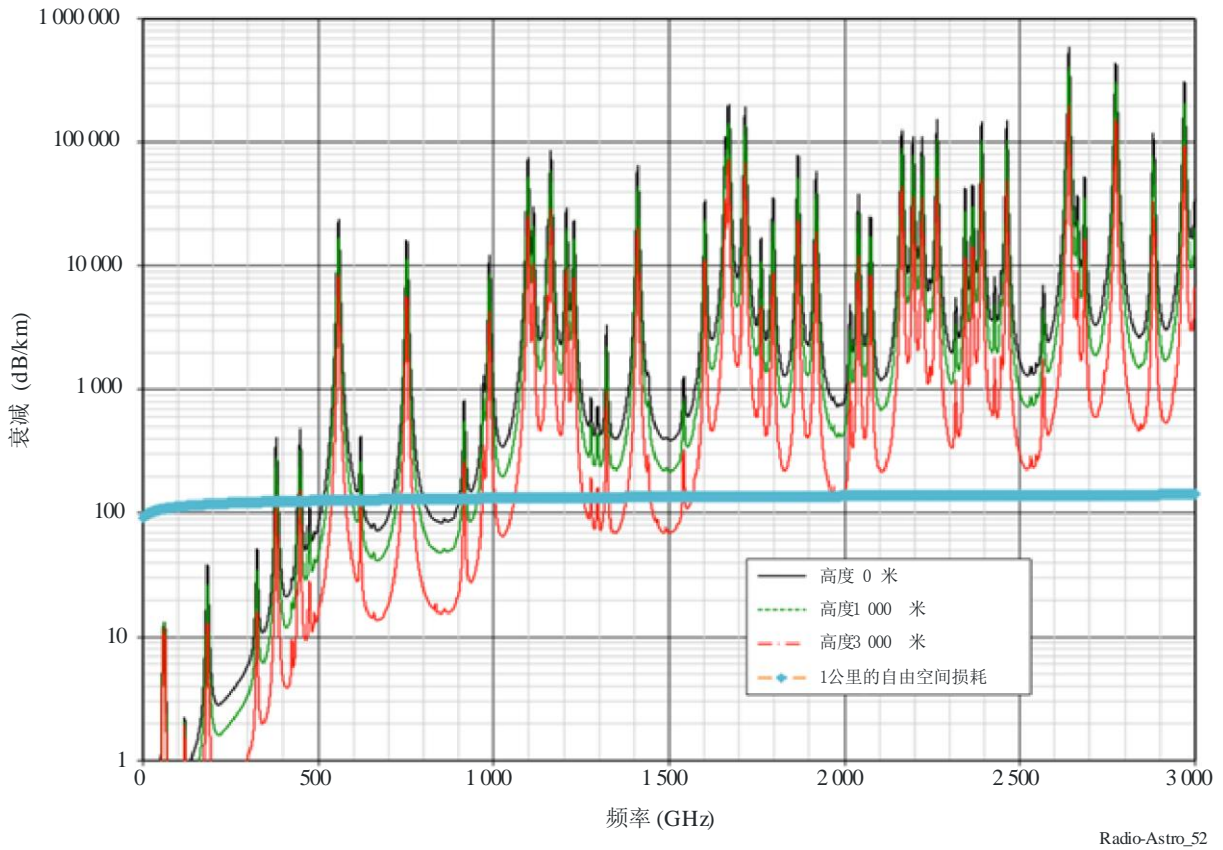
ITU-R RA.1272建议书考虑了地基干扰对60 GHz以上射电天文测量的保护。这些高频率的共用有着独特的困难之处。射电天文的毫米波接收机通常设计为涵盖整个大气窗口（68-116 GHz、130-170 GHz、200-323 GHz等），或者是为了获取许多谱线中包含的信息，或者是为高灵敏的连续谱观测提供大带宽。此外，在极其灵敏的外差式接收机第一步采用的超导体-绝缘体-超导混频器，对于饱和非常灵敏或甚至被其所覆盖频段内任意频率的干扰信号毁坏；而保护它们的低损耗滤波技术尚未实现。但是，就积极方面而言，全球需要保护的毫米波天文台的数量相对较少且只要实际条件允许，它们均位于相对偏僻地区，以最大限度地利用非常干燥的大气条件及低电平的地基干扰。因此，可通过大小适中的协调区，在所有60 GHz以上的频率保护毫米波天文台免受地面发射的影响，同时将对地基业务的影响降至最低限度。ITU-R RA.1272建议书给出建议，尽可能在所有60 GHz以上频率毫米波天文台附近设置协调区。可采用ITU-R RA.769建议书中的干扰门限及ITU-R RA.1031建议书中的程序来设立协调区。

### 5.7.2 275 GHz以上的共用

275-3 000 GHz频率范围的某些特性，综合降低了该频率范围内有源业务对射电天文业务产生干扰的可能性。在275-3 000 GHz频率范围，通过地球大气的传播，受到大气分子吸收的强烈影响。产生吸收的最主要分子类型为氧气（O<sub>2</sub>）和水蒸气（H<sub>2</sub>O）。非共振吸收产生了一种随频率增加而稳步增大的常规连续吸收，同时在与分子内禀共振对应的特定频率上发现具有极大衰减值。在海平面，一般连续衰减在275 GHz上大约为5 dB/公里，在1 000 GHz上大约为300 dB/公里，在3 000 GHz上大约为4 000 dB/公里。在该范围的特定分子共振上，衰减可高达550 000 dB/公里。由于氧气和水蒸气浓度的降低，衰减随高度的增加而降低。图5.2显示了不同高度的衰减（单位为dB/公里）：海平面、1 000米和3 000米。计算这些曲线采用了ITU-R RA.2189报告中的参数。

图 5.2

不同高度1公里水平路径上计算得出的大气衰减，假定大气特性为表1所示。  
作为参考，还给出1公里的自由空间损耗



ITU-R RA.2189报告确定了基于接近最坏情况的假定，275-1 000 GHz频率之间的发射信号，在不超出ITU-R RA.769建议书推算出的射电天文干扰门限情况下，所需要的隔离距离。

对于THz频率的地面系统而言，大气吸收是一个很重要的因素，因此必须在计算发射机和接收机之间的路径损耗中包括在内。出于同样的原因，观测这一频率范围的天文台大都位于高山顶上。在275GHz频率及3 000米高度上，基线吸收率大约为1 dB/公里且大气衰减在186公里左右以上超过了自由空间损耗。在1 000 GHz频率上，吸收率大约为100 dB/公里，大气衰减在1.6公里左右以上超过了自由空间损耗；在3 000 GHz对应的数字约为1 000 dB/公里，衰减超过自由空间损耗的距离约为150米。总而言之，对于1 000 GHz以上的频率，与几何扩散（自由空间损耗）相比，大气吸收通常是更重要的一个因素。

小的天线波束尺寸也有助于减少发生偶发干扰的可能性。在275 GHz以上频率，天线波束宽度非常小，即使小抛物面天线亦是如此。作为一个实例，一个直径30厘米的抛物面天线（约是一个吃饭用大盘的尺寸），在275 GHz频率上波束只有仅0.28（假定馈源照明口径为天线直径的75%）。随着波束大小随频率的增加而减小，275 GHz以上频率的波束宽度甚至变得更小。最后，对于绝大多数实际系统，目前在这些频率上产生的射频功率较小。

在275-3 000 GHz频率范围，有源系统干扰射电天文的“接近最坏情况”地面情形，将是发射机以可用的最大射频功率进入一个较大的、直接指向射电望远镜的发射天线，发射机和

望远镜均在高处。要仿真这种情形，并判定发射机的存在可能会对射电望远镜带来问题的距离，将假定射电望远镜和发射机均位于3 000米高度，发射机的工作功率从275 GHz的2.75 dBm降至3 000 GHz的-20 dBm，发射天线直径为30厘米，照明效率为75%。根据这些假设，并加上图5.2中的大气吸收，以及依据ITU-R RA.769建议书所规定的干扰门限电平，可以计算出将会产生干扰的距离。在图5.3中标出了275-1 000 GHz，在图5.4中标出了1 000-3 000 GHz的距离计算结果。

图 5.3

基于接近最坏假定，275-1 000 GHz内发射信号不会超出ITU -R RA.769建议书推的射电天文干扰门限的距离范围

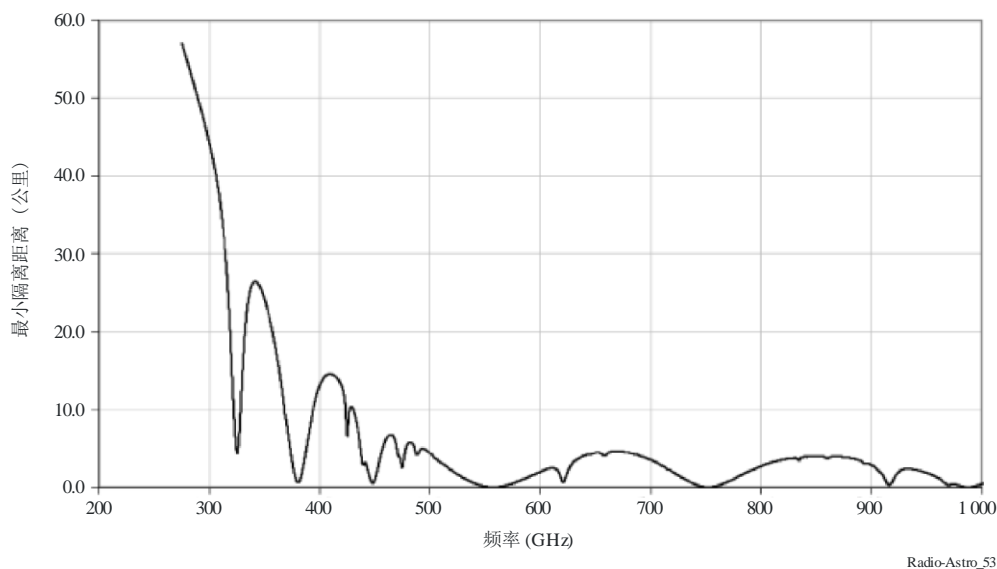
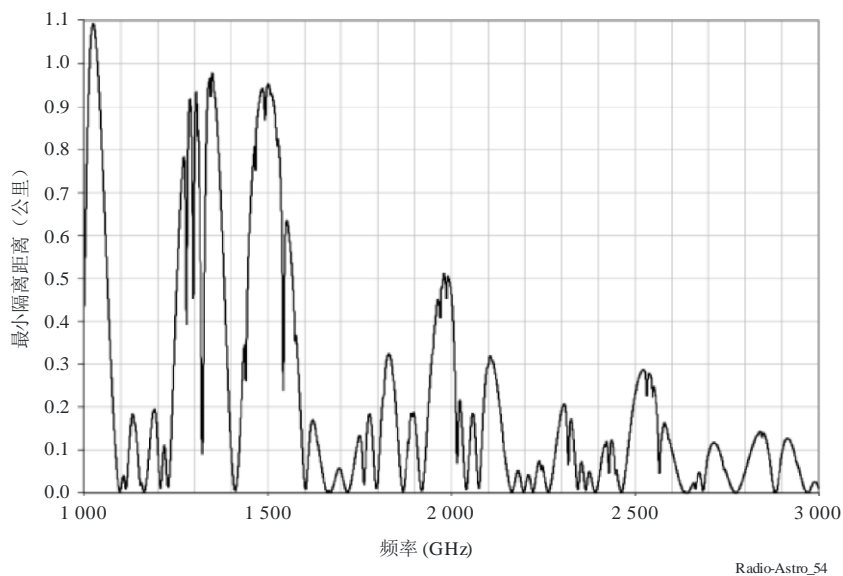


图 5.4

基于接近最坏假定，1 000-3 000 GHz内发射信号不会超出ITU -R RA.769建议书所推算的射电天文干扰门限的距离范围



结论是，对于1 000-3 000 GHz范围内的频率，假定发射机和望远镜均位于高且干燥山顶的最坏情况，地面发射机需要紧挨着望远镜才会产生干扰。在较低位置，衰减很大且干扰距离变小，但工作在该频率范围的射电望远镜不会位于这种地方。

射电望远镜的空基干扰源是短暂的，因为飞机在相对于射电望远镜运动。对于1 000-3 000 GHz范围内的频率，尤其如此，因为很高的倾斜路径，大气吸收将产生干扰的可能性，限定为只有飞机几乎直接在头顶且天线直接指向地面时。因为飞机相对于地面移动很快，而且THz范围的波束非常窄，干扰持续时间将很短。尽管在射电望远镜上空盘旋的高空直升飞机所产生的干扰，肯定会超过ITU-R RA.769建议书推算出的有害干扰门限电平，但发生这种情形的可能性（至少在未经事先协调前）非常之小。因此，对射电天文台的空基干扰也不太可能发生。由于小波束尺寸、快速的移动及自由空间损耗等因素的结合，非静止卫星干扰射电望远镜的可能性非常小。

因此，可以做出结论，除非射频功率产生的实际限制发生重大变化，否则射电天文与275-3 000 GHz范围内有源业务的共用不成问题。

## 5.8 与深空研究的共用

划分给2.3 GHz和8.4 GHz深空研究（空对地）发射的频段通常用于射电天文的VLBI观测及测地学（板块构造研究）。深空在《无线电规则》中定义为距离地球 $2 \times 10^6$ 公里以外的空间区域。深空飞行任务包括探测行星、彗星、流星和太阳风。深空航天器空对地发射的典型参数中，发射机功率为20瓦，天线直径为4米，后者在2.3 GHz提供36 dBi的增益，在8.4 GHz提供47 dBi的增益。在距地球 $2 \times 10^6$ 公里的距离上，2.3 GHz对应到达地面的功率流量密度为 $-148 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ ，8.4 GHz对应到达地面的功率流量密度（pfd）为 $-137 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ 。根据第4章，这些电平超出了射电天文总功率测量的有害干扰门限。但是，pfd电平低于VLBI测量的有害门限。迄今为止的经验表明，对于VLBI测量的特定情况，射电天文与深空通信之间的共用是可行的。

对于发射机参数相同的航天器，需要 $6 \times 10^7$ 公里的间隔距离，才能避免对射电天文总功率测量产生有害干扰。作为比较，距离最近的行星金星在最接近地球时的距离为 $4 \times 10^7$ 公里。因此，在第4章所述的门限方面，位于深空较近部分航天器发出的信号，可能会对共用相同频段的射电望远镜产生有害干扰，而飞往外行星的航天器，产生的干扰则很少（且产生干扰的航天器方向是众人皆知的）。请注意，此处假定从射电望远镜的旁瓣接收航天器的信号，其增益不大于0 dBi。

## 5.9 分时

由于射电天文所观测现象的性质，只有在特殊条件下，才可能设计出射电天文与同频段操作的有源业务的分时方案。此外，向客户提供业务的用户可能不愿意采用分时。有时，分时原则上可行，但在实际中与其有关的问题更多是操作方面，而不是技术方面。

尽管如此，通过有限的分时，允许在某个射电天文站点进行观测是可能的，且也许在某些时候是必要的。前一章已讨论过接收机进行间隙接收，以允许在存在雷达发射机的情况下

进行观测的特殊情况。通常而言，科学研究往往要求射电天文学家在划分给射电天文业务频段以外的频段进行观测且在此种情况下，与有源业务的分时可能是唯一的选择。ITU-R RA.314建议书承认了这一事实，并且在未划分给射电天文的频段中进行谱线的探索性观测时，敦促各主管部门在协调方面提供帮助。

### 5.9.1 分时和频率共用协调

现代射电望远镜可在一系列频率上进行观测。通常望远镜造价昂贵，望远镜运行费用较高且观测时间的竞争很激烈。因此，射电天文学家需要尽可能高效地运行其望远镜。这就需要他们在任何时候，均尽可能根据可能的最佳大气条件调整观测频率，而且一些射电天文台已采用了动态时间安排。例如，美国国立射电天文台的绿岸望远镜（GBT）可在1-100 GHz范围内进行观测。但是，最高频率的观测只能在冬季的某些时间，在非常干燥的大气条件下进行且需要最大限度地利用这些时间。德国马克斯-普朗克研究所的望远镜涵盖了类似的频率范围。

由于一些有源业务采用了多个通道，自某些情况下，时间协调，特别是短时间的协调是可能的。天文台可将其观测时间安排转给在相关频段操作的有源业务，这些业务可在某些情况下切换至不对射电天文观测产生干扰的通道。特别是射电天文学家需要在其划分频段以外观测时，大家达成共识，这种安排需做到对各方公正且需在个案基础上实施。应指出，传播效应可能随着频率迅速变化，因此有时可通过动态重新安排观测来减少数据丢失期。

### 参考文献

CCIR [1990] Report 696-2 – Feasibility of Frequency Sharing between Radio Astronomy and other Services. Doc. of the XVIIth Plenary Assembly, Düsseldorf, 1990, Annex to Vol. II, p. 568-584.

GREENHILL, L. J., KNODRATKO, P. T., LOVELL, J. E. J., KUIPER, T. B. H., MORAN, J. M., JAUNCEY, D. L. and BAINES, G. P. [2003] *Astrophys. J. (Letters)*, Vol. 582, L11-L14.

## 第六章

### 其它频段发射机对射电天文的干扰

#### 6.1 引言

射电望远镜探测并测量到的宇宙无线电发射，远远弱于有源（发射）业务使用的信号。为测量这些微弱信号，用于射电天文观测的接收机通常具有目前无线电技术和可用带宽所能达到的最高灵敏度。由于信号微弱，接收机灵敏，射电天文观测非常容易受到干扰，甚至可能受到非共用频段发射机的影响。这些干扰源于频段边缘效应、发射机谐波、互调效应等。第4章和第5章已探讨了射电天文观测的干扰门限电平、保护标准以及可与其它业务共用的限制。

在邻近有源业务使用频段中出现的信号电平，可因业务性质的不同而迥然相异。此外，业务名称极为宽泛，任何一项业务可能涉及多种不同类型的发射设备。最高峰值信号电平通常出现在指定用于无线电定位和航空无线电导航的频段中，因为这些业务可能在航天器上包含高功率雷达。这些信号在到达相对偏远的天文台台址时，平均 pfd 通常超过  $-100\text{dB(W/m}^2\text{)}$ ，UHF电视亦产生非常高的信号电平。

#### 6.1.1 《无线电规则》中的定义

以下《无线电规则》第1条款第VI节中的定义有益于探讨来自其它频段发射机的干扰。

**必要带宽**（《无线电规则》第1.152款）：对给定的发射类别而言，恰好足以保证在规定的条件下以所要求的速率和质量传输信息的频段宽度。

**带外发射**（《无线电规则》第1.144款）：由调制过程产生、刚超出必要带宽的一个或多个频率上的发射，但杂散发射除外。

**杂散发射**（《无线电规则》第1.145款）：在必要带宽之外的一个或多个频率上的发射，其发射电平可以降低而不致影响相应信息的传输。杂散发射包括谐波发射、寄生发射、互调产物及变频产物，但带外发射除外。

**无用发射**（《无线电规则》第1.146款）：包括杂散发射和带外发射。

#### 6.1.2 附加定义

在某些情况下，第6.1.1段中的定义可能出现例外和修改。举例而言，ITU-R SM.1541建议书包含以下定义。



杂散域<sup>11</sup>（某一发射）：通常以杂散发射为主的OoB以外的频率范围。

OoB域<sup>1</sup>（某一发射）：通常以OoB发射为主的紧邻必要带宽的频率范围，但不包括杂散域。

OoB域发射：必要带宽外，发生在指配频率±250%必要带宽频率范围内的发射通常被认为是OoB域发射。但是，这种频率分隔与调制类型、数字调制的最大符号率、发射机类型和频率协调因子有关。例如，对于某些数字、宽带或脉冲调制系统，频率间隔可能需要不同于250%因子。

杂散域发射：本建议书中，落在间隔发射中心频率±250%必要带宽处或以外的所有发射，包括互调产物、频率转换产物和寄生发射，通常被认为是杂散域发射。但是，这种频率分割与调制类型、数字调制的最大符号率、发射机类型和频率协调因子有关。例如，对于某些数字、宽带或脉冲调制系统，频率间隔可能需要不同于250%因子。

对于可以从一个末级输出放大器或有源天线同时发射多个载波的多通道或多载波的发射机（或转发器），发射的中心频率既可以采用电台指配带宽的中心频率，也可以采用发射机（或转发器）-3 dB带宽的中心频率，取二者中较小者。

OoB杂散发射：OoB和杂散发射之间的区别通常在于频率，见下文（见ITU-R SM.329-9建议书）。根据《无线电规则》附录3所述原则，杂散域通常包含与发射中心频率必要发射带宽间隔250%或更高的频率。然而，该频率分隔可能取决于所使用的调制类型，数字调制的最大比特率、发射机类型以及频率协调因子。举例而言，对于一些数字、宽带或脉冲调制系统，频率分隔可能需要不同于250%因子。由于《无线电规则》禁止任何无线电业务对其所划分频段以外的业务造成有害干扰，应确定发射机频率，从而使OoB发射按照《无线电规则》第4.5款，不对划分以外的业务造成有害干扰。

换言之，±250%可取代必要带宽用于通道分隔。举例而言，对于数字固定业务的频率协调，ITU-R F.1191建议书建议将相关射频通道安排的±250%通道分隔作为OoB和杂散域之间的频率界线。

对于特窄或宽带宽，这种确定杂散域的方法可能不适用，ITU-R SM.1539建议书提供了更多指南。

### 6.1.3 其它频段发射机的干扰机制

带边干扰，即源于邻近频段发射机的干扰，可通过三种机制产生：

- 在频段边缘未充分锐化截止的情况下，在邻近频段发射的调制边带可能进入射电天文频段。

---

<sup>11</sup> 为了消除某些现存的矛盾，即《无线电规则》第1条中术语“带外发射”和“杂散发射”的定义与《无线电规则》附录3（由世界无线电通信大会（2000年，伊斯坦布尔）（WRC-2000）修订）中这些术语的实际使用之间的矛盾，引入了术语“OoB域”和“杂散域”。OoB和杂散限值分别适用于OoB域和杂散域中所有的无用发射。

- 两个或多个强信号对非线性元素的影响可产生形为  $(mf_1 \pm nf_2)$  的拍频，其中  $f_1$  和  $f_2$  为发射频率， $m$  和  $n$  为整数。整数  $(m+n)$  被称为互调阶。非线性元素可能出现在发射机的输出、射电天文接收机的输入级或电场很强区域中的高塔或围栏生锈接口等邻近物体。
- 射电天文接收机如对射电天文频段以外频率的灵敏度不够低，可能会对邻近频段信号做出响应。

与射电天文频段具有更大频率间隔的发射机干扰可产生于以下机制。

- 所划分的发射机频率谐波通常在发射机中产生，其辐射电平可能对射电天文观测造成干扰。
- 频率间隔较宽的两个信号之间互调，可能产生与二者中任一频率间隔较大的第三个频率。
- 使用宽带调制和扩频技术可产生非常宽的频谱边带，如未在发射机输出端进行滤波，可造成严重干扰。

接收机输入级互调和射电天文频段边缘外信号的不充分抑制，均源于接收机设计的不足。射电天文接收机应在输入级包含充分的滤波以抑制可能造成互调的信号。此外，设计中应采用在射电天文频段边缘可以提供必要抑制能力的IF滤波器，相对于频段中心，可高达 -100 dB。

总之，为使用高功率发射机的业务划分邻近于射电天文的频段，可能导致严重而代价高昂的技术问题。包括涉及谐波或调制边带等一些干预机制，在很大程度上取决于发射机的特性，因此必须针对不同业务分别审查。卫星和航天器发射是射电天文面临的一个特殊问题，因为LoS传播条件普遍存在。卫星无线电测定业务和数字通信业务等使用卫星宽带调制和扩展频谱技术的业务，尤其会对射电天文产生干扰。

## 6.2 来自有源业务的无用发射限值

### 6.2.1 杂散发射域内的限值

《无线电规则》附录3以及ITU-R SM.329（频谱管理系列建议书）给出了杂散发射限值，并对各类别做出规定，其中包括：

- A类限值是计算最大可允许杂散域发射功率的衰减值。《无线电规则》附录3来自A类限值。
- B类限值是比A类限值更严格的杂散域发射限值的例子。它们是以欧洲国家定义和采用，并为一些其他国家所使用的限值为基础。
- C类限值是比A类限值更严格的杂散域发射限值的例子。它们是以美国和加拿大定义和采用，并为一些其他国家所使用的限值为基础。

- D类限值是比A类限值更严格的杂散发射限值的例子。它们是以日本定义和采用的，并为一些其他国家所使用的限值为基础。
- Z类：由国际无线电干扰特委会(CISPR)规定的ITE 辐射限值。

限值为低于进入天线传输线功率的杂散发射最大功率电平，用dB表示。

对于地面业务，射电天文学家最关注的A类限值规定了最低衰减 $43 + 10 \log P$  dBc或70 dBc（取较宽松值），其中 $P$ 进入传输线的功率平均值。这种情况的杂散发射对于30 MHz至1 GHz频率，测量参考带宽为100 kHz，而1 GHz以上频率的参考带宽为1MHz。

对于空间业务，A类限值规定了 $43 + 10 \log P$  dBc或60 dBc（取其较宽松值）。然而，对于空间业务，测量杂散发射的参考带宽规定为4 kHz，因而与地面业务相比，30 MHz至1 GHz功率谱密度低14 dB ( $10 \log(4/100)$  dB)，1 GHz以上频率低24 dB ( $10 \log(4/1000)$  dB)。

有关空间业务杂散发射效应，以射电天文站以上 $h$ 米距离的卫星可能产生的杂散为例，其spfd为 $-79 - 10 \log(4\pi h^2) + G_{SAT}$  dB( $W(m^{-2} Hz^{-1})$ )其中 $G_{SAT}$ 是杂散发射频率射电天文台观测方向的卫星天线增益。为估算对地静止轨道卫星在射电天文频段的杂散spfd值，我们使用 $h = 6.39 \times 10^6$  m并取对应于 $1 m^2$ 卫星天线孔径的 $G_{SAT}$ 任意值。我们允许覆盖区直径为1 400 km的最大增益为40 dB。图6.1中的虚线显示出spfd的结果。之后，作为低轨（LEO）卫星示例，我们取 $h = 800$  km，以及对应于 $1 m^2$ 孔径的 $G_{SAT}$ 增益，采用覆盖区直径为300 km的最大值20 dB（相当于通常使用的小覆盖区），估算结果为图6.1所示实线。而射电天文连续谱观测的干扰门限值，如ITU-R RA.769建议书所述，用交叉线在图中表示。图6.2中的杂散spfd曲线显示出最差情况值，因为我们假设，卫星天线的最大增益出现在射电天文台方向。此外，为了简化计算，我们使用了卫星处于天顶时的距离，并忽略了大气衰减和类似小的效应。然而，允许spfd值超出有害干扰门限（20至50dB）的程度清楚表明，通常情况下，杂散发射限值无法保护射电天文。对于地面业务，因参考带宽不同，1 GHz以上频率的杂散spfd限值比空间业务高出24 dB。地面发射机的距离通常小于空间业务发射机距离，但地形屏蔽可以提供实质性的保护。对于LoS发射，杂散发射限值在多数情况下亦不能保护射电天文。ITU-R SM.329建议书规定了杂散发射限值，亦列出了射电天文的干扰门限（建议书附件3），但相对这些限值的保护，没有做出强制规定，而是被视为新系统提出时个案考虑的因素。

## 6.2.2 OoB发射域中的限值

有关OoB发射的限值见ITU-R SM.1541建议书。简而言之，该建议书给出了多项业务的发射限制，显示出必要带宽边缘至杂散发射区域边缘之间的限值。这些限值比杂散发射更宽松，但在OoB/杂散边界处接近杂散限值。因此再次表明，这些限值不能保护射电天文，因此需根据具体情况考虑进行协调。

## 6.2.3 用来保护射电天文频段的有源业务无用发射限值

《无线电规则》中的若干脚注旨在保护射电天文业务免受有源业务无用发射的干扰（见《无线电规则》第5.208A款的例子）。多届世界无线电通信大会增加脚注，以便进一步保护射电天文业务免受现有和新增有源业务的干扰。

《无线电规则》脚注**5.443B**涉及保护射电天文业务免受工作在5 010-5 030 MHz频段中卫星无线电导航业务（空对地）无用发射的干扰：

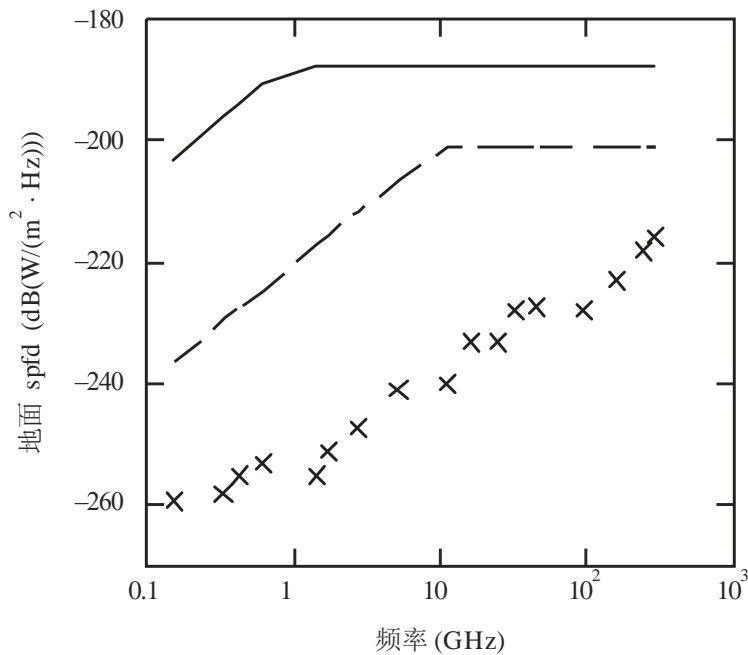
“**5.443B**为了不对操作在5 030 MHz以上的微波着陆系统造成有害干扰，操作在5 010-5 030 MHz频段内的任何卫星无线电导航业务系统（空对地）的所有空间站在5 030-5 150 MHz频段内所产生的总功率流量密度，在150 kHz带宽内不得超过 $-124.5 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ 。同时，为了不对4 990-5 000 MHz频段内的射电天文业务产生有害干扰，在5 010-5 030 MHz频段内运营的卫星无线电导航业务系统须遵循第**741**号决议（**WRC-12，修订版**）中确定的4 990-5 000 MHz频段内限值。（WRC-12）”

《无线电规则》脚注**5.511A**和**5.511F**涉及保护射电天文业务免受工作在15.43-15.63 GHz频段MSS（空对地）无用发射的干扰：

“**5.511A**为了保护15.35-15.4 GHz频带内的射电天文业务，任何工作在15.43-15.63 GHz频段内的卫星移动业务非对地静止卫星空间电台的馈线链路（空对地）系统内的所有空间电台，在15.35-15.4 GHz频段内进入任何射电天文观测站并在2%以上的时间内的辐射，在50 MHz带宽的总功率流量密度不得超过 $-156 \text{ dB(W/m}^2\text{)}$ 。（WRC-2000）”。

图 6.1

对应于卫星杂散发射限值的地面spfd



实线和虚线表明防止以航天器杂散发射限值辐射的LEO对地静止轨道卫星在地面可能产生的spfd值。详情见案文。叉线显示出表4.1给出的对射电天文造成严重干扰的门限值。

Radio-Astro\_61

### 6.3 射电天文接收机的性能

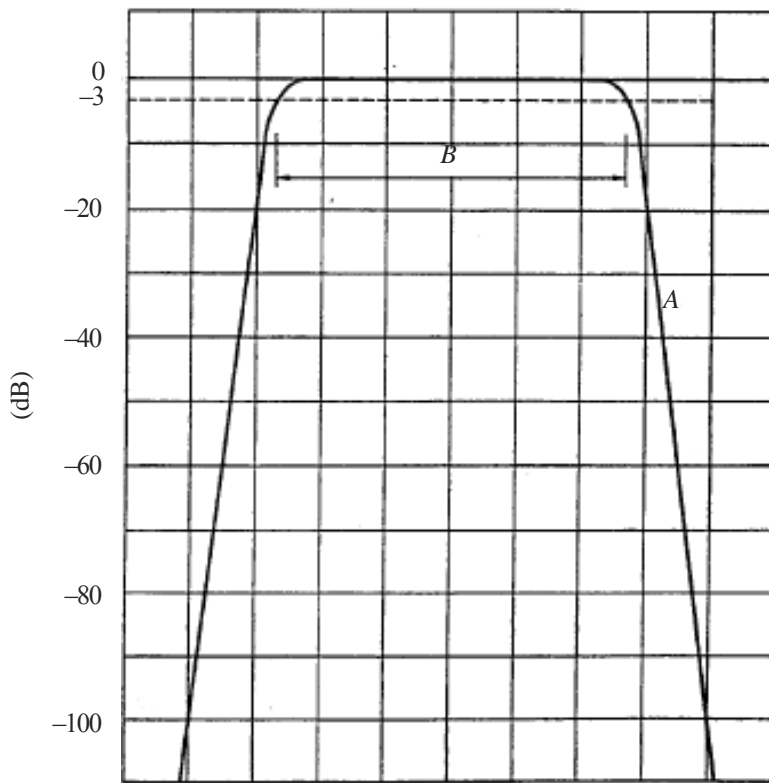
#### 6.3.1 带边干扰的过滤

为计算射电天文接收机从邻近频段信号中接收的有效输入功率 $P$ ，必须相对准确的了解接收机带边响应。举例而言，图6.2中的上端频率边缘，辐射计相对增益在频段边缘降低的电平为 $-a_0$  dB，该点接收机响应斜率为 $-k$  dB/MHz。

图 6.2

与射电天文频段匹配的接收机带通特性

射电天文频段



A: 斜率  $-k$  dB/MHz

B: 半功率带宽

Radio-Astro\_62

假设在射电天文频段中，任何干扰信号等于表4.1中的有害门限，但在频段边缘外，干扰为均匀spfd,  $S$  W/( $m^2 \cdot Hz$ )的信号。如 $A$ 是射电天文天线在干扰信号方向的接收面积，且 $f_0$ 为频段边缘频率，接收干扰功率为：

$$P = AS \int_{f_0}^{\infty} 10^{-[a_0 + 10^{-6}k(f - f_0)]/10} df = 4.34 \times 10^{-a_0/10} AS/k \quad (6.1)$$

积分中的无穷大限制在实际干扰远远超出频段边缘时可以得到。

表4.1中给出的最大可允许干扰功率电平在 $10^{-17}$ 至 $10^{-21}$  W范围内，对应于超过1 GHz 频率的典型带宽。对于 $S = 2 \times 10^{-13}$  W/(m<sup>2</sup> · Hz)的连续信号（典型的无线电中继信号）和A为 $10^{-3}$  m<sup>2</sup>值（约3 GHz 时的各向同性增益），如当带边响应 $a_0$ 为102 dB 且斜率K为50 dB/MHz 时，将不会超过 $10^{-21}$ 。K值与 $A_0$ 相比重要性要弱些，对于 $K = 10$  dB/MHz，与 $a_0 = 109$  dB时收到的功率相同。因此，射电天文接收机在千兆赫兹频率范围内的响应，在频段边缘相对于频段中心应在-100至-110 dB 之间，但如OoB 源处于望远镜响应大于0 dBi方向时，则更高。注意到在现实中邻近频段业务频谱不可在频段边缘突然截止，但应在接近边缘时信号减弱，从而不超过射电天文频段的有害干扰电平。尽管上述示例是一种简化，但它有效地说明了所需要的带边响应。更多示例见表6.1，假设射电天文天线具有各向同性响应。

表 6.1

射电天文所需要的带边响应示例

业务	假设的发射机距离 (公里)	观测站信号电平典型平均值	所需要的接收机带响应 (dB)
卫星广播（最大可允许流量）	36 000	$5 \times 10^{-18}$ W/(m <sup>2</sup> · Hz)	-56 to -63
典型的无线电中继发射机	60	$2 \times 10^{-13}$ W/(m <sup>2</sup> · Hz)	-102 to -109
空载雷达（10 W平均功率）	10	$10^{-8}$ W/m <sup>2</sup>	-100
	300	$10^{-11}$ W/m <sup>2</sup>	-70

脉冲雷达信号对于射电天文接收机的短时间干扰效应，取决于所开展的观测类型，干扰强度有可能不超出具有相同平均功率电平的连续信号所造成的干扰。对于射电天文接收机频段边缘小于100 dB的带边响应，以及 $10^{-3}$  m<sup>2</sup>的接收面积A，所接收的平均功率对于 $10^{-21}$  W/m<sup>2</sup>以下的平均pfd电平将不超出 $10^{-21}$  W。该值对应于 $10^{-9}$ 至 $10^{-10}$  W/m<sup>2</sup>的峰值pfd。因此，-100 dB带边响应，可能允许射电天文业务在邻近频段出现强雷达信号的情况下依然运行。另一方面，脉冲中出现的过载效应很重要，将导致下文所述接收机输入级中的互调效应。

为将频段带边响应比频段中心响应减少100 dB，-3 dB点的滤波器带宽必须小于所划分的射电天文频段。由于中频相对较低，通常在100MHz和1 GHz之间，可能出现相对陡的边频选择性。滤波器响应的边缘斜率取决于滤波器分段数量和所设计的响应。例如提供-100 dB带宽中75%，即-3 dB带宽的滤波器被看作为陡沿。在通带边缘增加响应斜率，需要增加滤波器分段数量，由此使滤波器难以保持一致并增加了相位随温度的变化。因此，滤波器并非总能轻而易举地解决带边干扰问题。减少射电天文频段可用带宽，对于谱线观测影响尤为严重，因为观测谱线频移通常需要全带宽，并且由于多普勒频移和其它效应，还需要扩大谱线带宽。数字多相滤波器组可提供稳定的陡沿滤波，并不受温度变化影响，这已成为现代频谱仪的标准。

### 6.3.2 非线性效应和互调

接收机输入端（但在接收机通带以外）同时出现两个或多个信号，由于为早期非线性的原因，将会在接收机通带内产生信号。最严重的影响可能是三阶互调，其中接近通带边缘的频率 $f_1$ 和 $f_2$ 将在通带内产生频率 $(2f_1 - f_2)$ 或 $(2f_2 - f_1)$ 的分量。

给定放大器的互调性能可用双音、三阶互调截止点予以描述。该截止点位于输出功率与输入功率的对数 - 对数点，两条直线代表所需要的放大器响应和互调响应。该点的输入功率为 $I_{IM}$ ，使用-40 dBW代表增益为30 dB的低噪声晶体管放大器。有效干扰信号功率 $\Delta P_H$ 可源于由以下公式产生的 $P_{IM}$  OoB功率信号的互调。

$$P_{IM} = (2I_{IM} + \Delta P_H)/3 \quad \text{dBW} \quad (6.2)$$

采用表4.1给出的 $\Delta P_H$ 值，并假设接收天线的增益为0 dBi，人们可以推导出相应的pfd值 $S_{IM}$ 。使用上述 $I_{IM}$ ，一些作为主要划分的射电天文频段适用电平值见表6.2。如射电天文频段邻近频率的pfd超出这些电平，所产生的互调产物将超过表4.1给出的有害门限。在此情况下，将需要在接收机输入端安装滤波器。灵敏度的降低可能源于这种滤波，因为在接收机输入端的插入损耗，增加了系统的噪声温度。然而，滤波器最近的改进包括使用超导材料，使输入端滤波对于射电天文接收机更为实用。分配前段放大器增益和滤波的方案正在探索之中。

$$P_{IM} = (2I_{IM} + \Delta P_H)/3 \quad \text{dBW} \quad (6.2)$$

表 6.2

可能由于互调达到有害干扰门限的两个等强度信号的典型接收功率值和pfd

射电天文频段中心频率(MHz)	$P_{IM}$ (dBW)	$S_{IM}$ (dB(W/m <sup>2</sup> ))
325.3	-94	-82
1 413.5	-95	-71
4 995	-96	-60
10 650	-94	-52
15 375	-94	-49
23 800	-92	-43
43 000	-90	-36

### 6.3.3 线性

为避免第6.3.2段探讨的问题，射电望远镜接收机通常通过设计，使通带总功率在从天线到接收机输出过程中的放大级、滤波器任意点的压缩电平低于1%。在1%压缩点工作的接收机，当在射电天文邻近频段出现强信号时，可在射电天文频段内产生低电平互调产物。此外，接近线性的接收机更受欢迎，因为它简化了输出端对输入信号电平的校准。在操作功率电平和1%压缩形成功率电平之间存在大的“余量”特别有益，尤其在出现随时间变化的干扰电平时。接收机任意点的功率电平随天线指向和干扰电平而变化，该系统通过设计防止将余量降至0 dB。如果二次项为响应的主要特性，1%增益压缩点通常比1 dB增益压缩点低16 dB，比三阶截止电平低26 dB。

### 6.3.4 滤波和数字化

高增益系统向非线性的发展，可通过连续在信号路径中使用窄带滤波器得到部分控制。滤波可出现在射电天文接收机的多个阶段并包含模拟和数字滤波器。任何给定的模拟级只需提供充足的抑制，以保护后续放大器级的线性。我们可以为信号链*i*级确定以下参数：

- $G_i(f)$ : 作为频率*f*函数的*i*级功率增益比  $P_{out}(f)/P_{in}(f)$
- $N_i$ : 噪声系数
- $P_{Nli}$ : *i*级输入频率的总积分功率，该级的非线性将造成1%的增益压缩。

在第五级避免非线性的条件为：

$$\int P_{in}(f) G_1(f) G_2(f) G_3(f) G_4(f) df + k T \int \{ [N_1(f) - 1] G_1(f) G_2(f) G_3(f) G_4(f) + [N_2(f) - 1] G_2(f) G_3(f) G_4(f) \} df < P_5 \quad (6.3)$$

其中 $P_{in}(f)$ 是天线*k*的输入功率，为Boltzmann常数， $T = 290 \text{ K}$ 。假设的条件是，前两级的增益足够大，从而可以忽略以后各级的噪声影响。

在多数使用单天线的射电天文接收机中，信号是在自相关器中处理的，以便提供总功率频谱。对于天线阵，信号采用互相关系统进行处理。在任何情形中，IF信号在经过数字化后进行数字化处理。抗频混模拟滤波器需要放在模拟数字（A/D）转换器的输入端以建立IF频谱的频率截止，使采样可以按照Nyquist采样所要求的双倍信号带宽进行。如避免了模拟系统中的非线性和A/D转换中的频混，可在自相关器或互相关器级前插入进一步滤波。ITU-R RA.769建议书给出的干扰有害门限值（和表4.1及4.2），将在IF系统中产生比造成非线性危险低40至80 dB的信号电平。因此，如果数字滤波器位于射电天文频段以外，足以抑制电平超出几十分贝的信号。有限脉冲响应（FIR）类数字滤波器可在频段边缘提供锐截止，与前面各级内的模拟滤波器配合可抑制100 dB以上。多相位滤波器的IF信号与正弦函数的数字近似值卷积，对干带外扰消除尤其有效并已投入普遍使用。因此，通常有可能设计出抑制在射电天文频段以外干扰的射电天文接收机。



## 6.4 其它频段业务发射机的干扰

ITU-R RA.517建议书——保护射电天文业务免受邻近频段操作的发射机干扰，和ITU-R RA.611建议书——保护射电天文业务免受杂散发射影响，列出了在邻近或非邻近频段操作的发射机可能对射电天文造成干扰的一些情况。

### 6.4.1 通过邻近频段和谐波机制可能对射电天文造成干扰的业务

在邻近射电天文频段或在射电天文频率的次谐波频率操作的多数有源业务，都是射电天文的潜在干扰源。然而，任何业务造成这种干扰的可能性主要取决于发射特性。例如，固定和移动业务（航空移动除外）的发射很少造成问题。最可能通过互调和谐波效应造成干扰的业务包括高输出功率业务，如UHF TV。此外，使用卫星传输的业务由于LoS传播可能造成严重问题。同时尽量减轻卫星重量的需求，为在卫星安装滤波器造成困难并带来昂贵的代价。产生宽边带的技术，如直接序列扩频技术，在不经对未使用边带充分滤波的情况下，有可能对射电天文造成非常严重的问题。

### 6.4.2 向数字TV的过渡及其对射电天文业务未经保护使用地面TV广播频段的影响

TV已成为世界各地不可或缺的信息传播方式。自TV诞生60多年来，其在新闻传播、娱乐和应急信息传递方面的用途众人皆知。目前，地面TV通过向全球数10亿人口提供覆盖，成为无线电频谱最普及的应用方式之一。

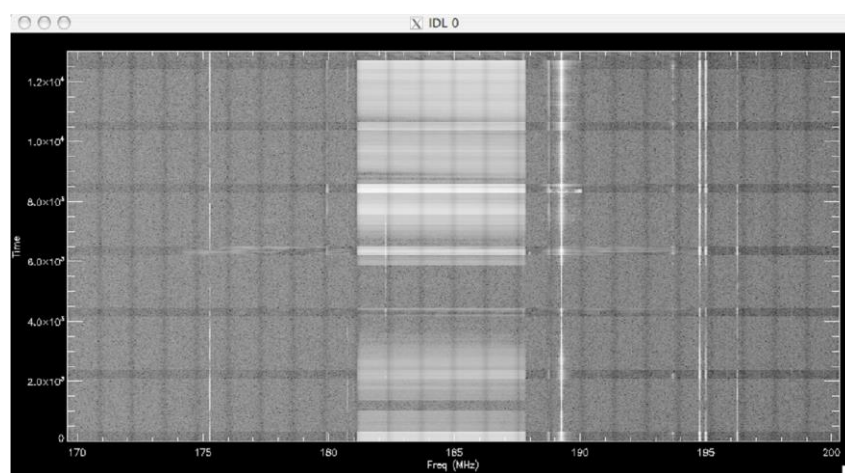
射电天文业务虽然与地面TV广播没有任何共用的划分，然而这些广播通常占用的频谱，对于低频天体物理学和宇宙形成早期产生的红移中性氢（HI）观测极为重要。迄今为止，射电天文学家一直按照《无线电规则》（RR）第4.4款使用TV频段进行观测。

目前，许多国家正在完成从模拟向数字TV广播标准的过渡，一些国家还在修订其广播划分以便恢复通过所谓“数字红利”释放的频谱。数字化过渡的一些工作，造成射电天文学家使用地面TV广播频段进行目前无保护观测的能力下降（见图6.3）。一些方面的工作可能将有利于在TV频段，提高进行无源观测能力。

以下各节概括介绍了一些国家向数字TV过渡的计划，这些国家包括目前在地面TV广播频段内开展射电天文计划的一些国家，以及目前正在设计和发展对其未来具有战略意义的、使用这些频段的射电天文台的一些国家。这些章节将探讨射电天文使用广播频段对数字TV业务规则造成的影响。

图 6.3

数字TV信号与模拟TV信号的影响比较示例。该频谱是在短暂的高增强传播时段内，于射电天文台址获得的。TV信号约来源于290公里以外



Radio-Astro\_63

181-188 MHz的数字信号比174-181、188-195和195-202 MHz的模拟TV信号更加充分地“填充”有关频谱。模拟TV信号占用的频谱集中用于分立视频、彩色信号和音频载波。

#### 6.4.2.1 澳大利亚

澳大利亚政府已宣布了从模拟向数字传输的转换计划。数字TV计划在现已划分的广播业务频段，即频段III（174-230 MHz）、IV（526-582 MHz）和V（582-820 MHz）操作。澳大利亚地面TV广播业务计划在VHF和UHF频段均采用7 MHz通道光栅。澳大利亚的数字业务计划采用典型的最大低于相同频段模拟TV业务的6 dB e.r.p.。

在澳大利亚，这些频段中没有射电天文的划分，由于射电望远镜所处位置人烟稀少，从而最大程度地减少了来自不同无线电通信系统（包括广播）造成的干扰风险。目前Parkes射电望远镜可在无干扰保护的情况下，在700-764 MHz频段进行观测。澳大利亚平方公里阵列（SKA）探路者（ASKAP）望远镜计划于2013年投入运行，其工作频率范围从700到1800 MHz。此外，澳大利亚可能成为SKA的未来台址。

#### 6.4.2.2 巴西

巴西计划于2016年6月29日完成所有模拟向数字广播TV传输系统的转换。完成过渡后，所有的传输将只在470-806 MHz的UHF内进行。

#### 6.4.2.3 日本

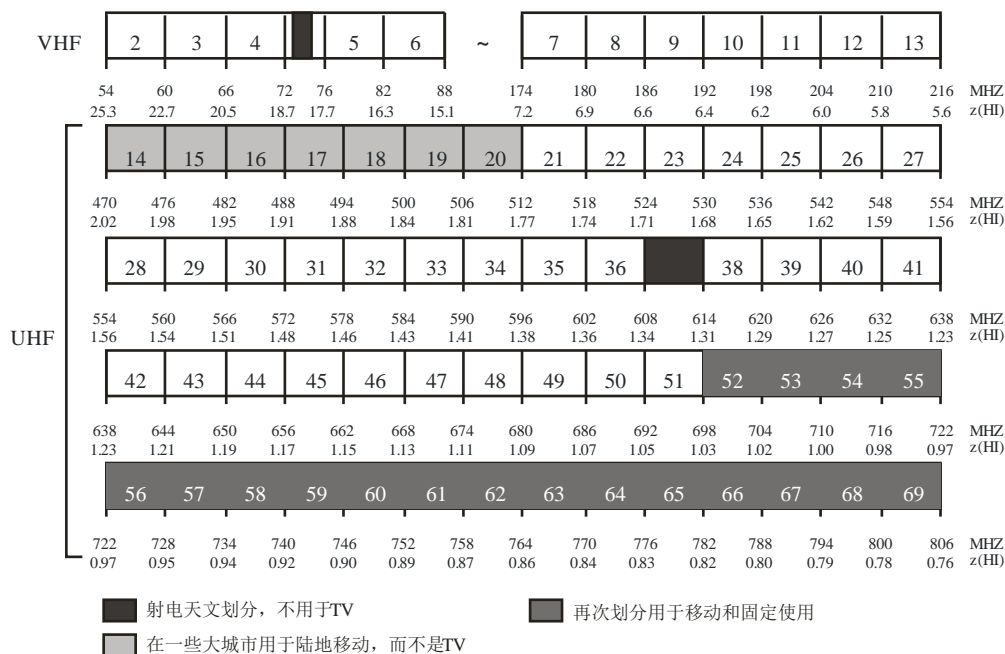
日本已完成了所有TV广播传输向数字化的过渡。每个TV通道的频宽为6 MHz，目前均在470-710 MHz UHF频段内。只有一个射电天文站（Hiraiso）的接收机覆盖500至2500 MHz。然而，日本在470至710 MHz频段范围内没有对射电天文业务进行划分。因此，Hiraiso观测站可以按照《无线电规则》第4.4款对470至710 MHz频段进行观测。

### 6.4.2.4 美国

美国于2009年6月12日，甚至在此之前已完成了所有全业务广播TV传输向高级TV系统委员会（ATSC）数字标准的过渡。图6.4显示了在完成数字化过渡后的广播TV频谱。该图包括频率扩展情况和相应的各通道对应1 420 MHz 氢谱线的红移。

图 6.4

美国数字TV过渡后的TV通道



Radio-Astro\_64

过渡后的部分结果是，共占108 MHz频谱（698-806 MHz）的18个TV通道（52-69）将不再用于普通TV广播。该频率范围已作为主要业务重新划分给固定和移动业务，并用于下一代无线系统、直接针对无线手机的前向链路视频广播和公众安全通信系统。TV通道37（608-614 MHz）继续作为主要业务划分给射电天文业务，而不是广播业务。该频段与低功率医学遥测和医学遥控设备共用。

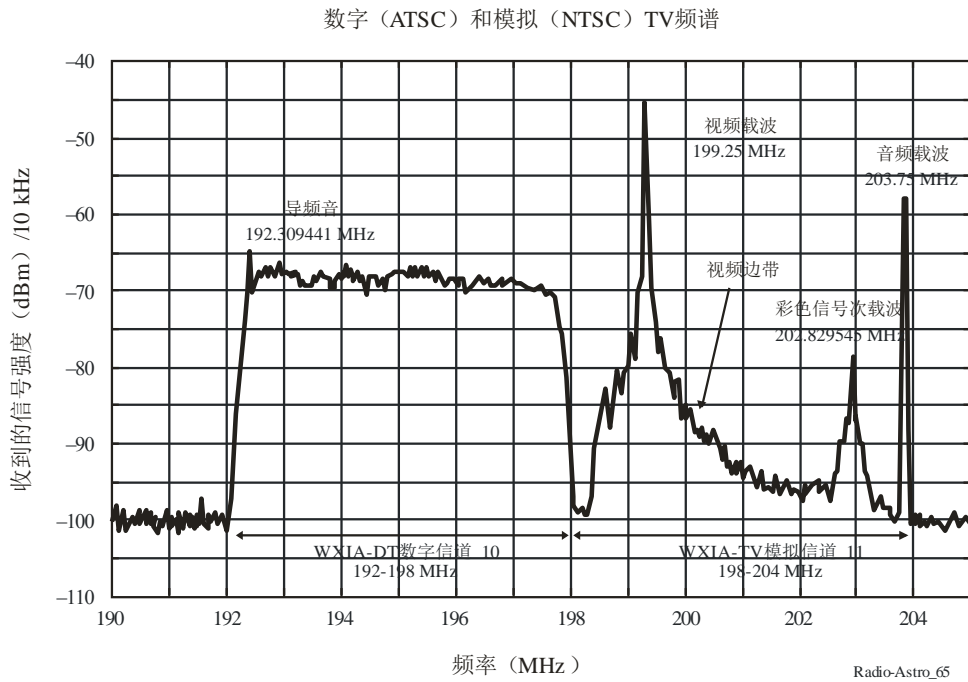
与模拟TV划分表相比，占用较低VHF频段的DTV电台比过渡前减少许多。总体而言，这将提高将54-72 MHz和76-88 MHz频段用于无保护射电天文观测的可能性，尽管这种可能性主要取决于2-6通道电台与有关射电天文站的接近情况。

数字TV系统需要的总发射功率比之前模拟TV覆盖约低两倍（VHF）和五倍（UHF）。此外，数字TV电台无用发射限值更加明确。如频段边缘超出6 MHz，衰减必须至少达110 dB。

图6.5直观比较了使用邻近TV通道的模拟NTSC与相同发射塔相同电台发射的相应数字ATSC信号。

图 6.5

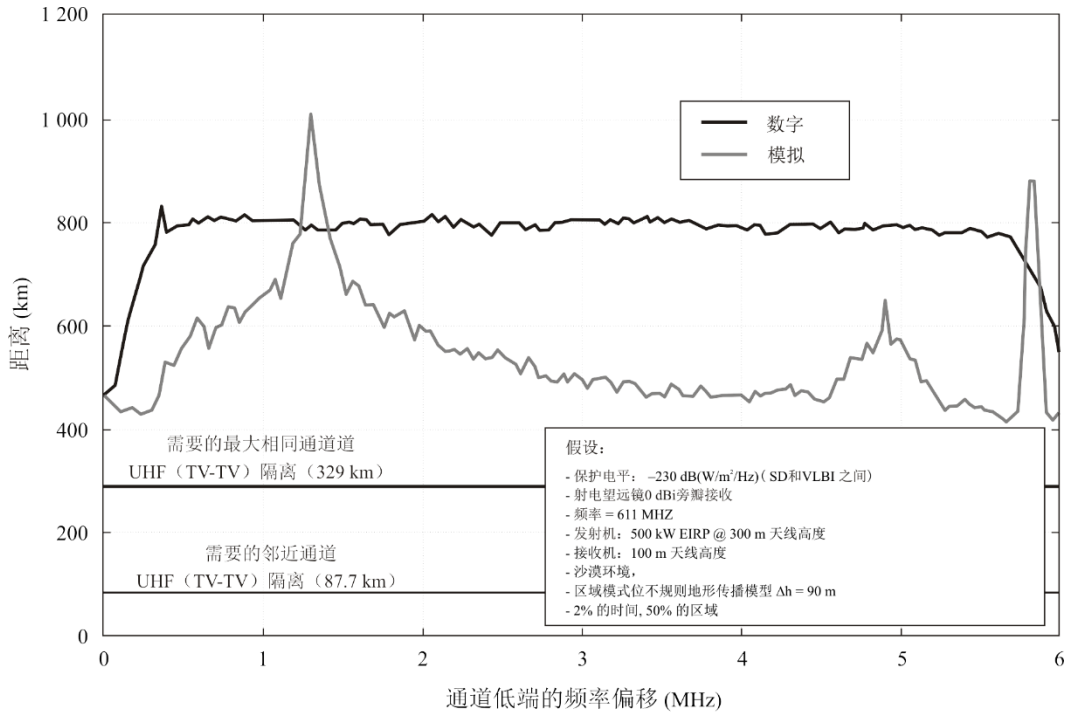
同时由相同发射塔相同电台发射的等效数字ATSC（左）和  
模拟NTSC（右）TV频谱的直观比较



尽管数字信号功率小于模拟信号，模拟信号主要集中于三个组成部分的载波。在94%以上的频谱中，数字功率谱密度超出模拟信号1 100倍 (> 30 dB)。因此，预计在完成向DTV的过渡后，有关TV电台的数字信号与该电台模拟前身相比，为射电天文偶尔使用该频段带来了更大挑战。图6.6比较了为满足ITU-R RA.769建议书规定的有害干扰电平，模拟与数字TV信号之间预计需要的隔离距离。

图 6.6

根据给定假设条件，实现射电天文干扰目标所需要的数字和模拟TV电台之间的最小隔离距离



Radio-Astro\_66

该数字TV资料来自ITU-R RA.2195，详情见全文。

### 6.4.3 卫星传输的干扰

卫星传输有可能对RAS造成严重干扰。地面干扰源通常处在射电望远镜天线的远旁瓣区域，并可能因射电天文台的周边地形而进一步衰减，但卫星发射的干扰通常通过近旁瓣接收，增益较高。无论卫星是否为对地静止或非对地静止轨道卫星，干扰的性质取决于发射机和系统提供的业务类型。对于所考虑的射电天文台，干扰还取决于天文台水平面上系统卫星的数量。应指出，与卫星传输相关的干扰问题，在很大程度上亦适用于航天器传输。

#### 6.4.3.1 对地静止卫星

目前运行的几乎所有射电望远镜都可看到多个对地静止卫星。这些卫星横跨天际，位于对地静止卫星带。对地同步轨道的半径约为地球半径的6.6倍。在此距离下，一颗卫星的LoS信号可覆盖地球表面的三分之一以及多个射电望远镜，图4.3显示出在一些主要射电天文台，不同纬度上看到的对地同步卫星带在天球坐标中的位置。一些有源业务的发展计划需要大量对地静止卫星。这些可能的干扰源可能通过射电望远镜天线方向图的近旁瓣接收，从而对射电天文学家造成特别的干扰问题。

ITU-R RA.769建议书给出了射电天文的有害干扰门限。该建议书列出了各射电天文频段中进入接收机并足以造成有害干扰的功率电平。同时，在射电望远镜相对干扰源方向的增益为0 dBi的假设条件下，该建议书还列出，计算获得造成有害干扰的 $\text{pf}d(\text{dB(W/m}^2))$ 。该增益

局限于趋近地平的地面干扰源的情况。对于对地静止轨道的干扰源，情况有所不同。如我们假设射电天文天线具有ITU-R SA.509建议书假设的旁瓣特性，旁瓣增益在距主波束轴 $19^\circ$ 处为0 dBi。对于这类天线，如主波束指向卫星 $19^\circ$ 之内，且该卫星在射电天文带宽内在射电天文台产生的pfd等同于ITU-R RA.769建议书中的有害门限，其有害干扰电平将被超出。间隔约为 $30^\circ$ 并以此电平辐射干扰的一系列对地静止卫星轨道卫星，将在轨道中央产生约为 $38^\circ$ 的区域，在此区域内射电天文观测无法避免有害干扰。该干扰区的宽度，将随着轨道内干扰卫星数量的增加而扩大，并可在原则上覆盖整个天空。干扰卫星的有效数量将取决于干扰信号是否由卫星发射天线形成波束或更加广泛的辐射。与卫星发射机频率间隔不远的OoB发射可能与指定信号一样受到天线控制。频率间隔更远的无用发射，如谐波，可能辐射更宽，但更容易使用发射机滤波器予以消除。

对地静止卫星干扰问题的解决方案，涉及射电天文观测损失的天空区域与卫星发射机无用发射抑制难度的妥协。通过查看图4.3可以发现，从地球看到的对地静止轨道位置随着人们从某一半球的天文台走向另一半球的天文台约变化 $10^\circ$ 。因此，如观测可在对地静止轨道 $5^\circ$ 内进行，天空中的每个位置可以至少在一个现有的天文台观测到，前提是天文台配备了完成特定观测的合适设备。降低杂散发射，以便在对地静止轨道 $5^\circ$ 内进行射电天文观测的可行性讨论参见第4章。

有关对地静止卫星辐射的讨论，基于的假设是轨道位于地球赤道平面。然而，为频率协调，对地静止卫星的定义包括倾角小于 $15^\circ$ 的所有对地同步卫星。轨道倾角对于射电天文频率协调的影响取决于潜在干扰源的卫星角分布。

#### 6.4.3.2 非对地静止卫星

非对地静止LEO造成有害干扰的可能性，因其操作数量的增加而加剧。数量的增加使许多非对地静止LEO同时出现在射电天文台的地平线以上，并在射电望远镜天线的视距范围内。这将导致射电望远镜天线，通过天线波束近端和远端旁瓣以及主波束，从可见的非对地静止LEO接收无用发射。干扰信号到达方向的不断变化，以及射电望远镜天线跟踪所观测天体的必要性，使干扰问题更加复杂。强信号的多次输入，将使接收机的操作点进入非线性区域，从而导致互调产物的生成。

非对地静止（低轨）卫星星座产生的无用发射对射电天文台址的影响，可通过ITU-R S.1586建议书（非对地静止卫星固定业务卫星系统在射电天文台址产生的无用发射电平计算），或ITU-R M.1583 建议书（对地静止卫星移动业务或卫星无线电导航业务系统与射电天文望远镜台址之间的干扰计算）所述epfd方法，以及第4章附件1给出的天线增益加以确定。

这些建议书可用来确定在某一射电天文台观测中，因相关卫星系统干扰造成的数据损失百分比。可接受的最大数据损失百分比是由ITU-R RA.1513建议书确定的。

### 6.4.3.2.1 卫星固定业务无用发射示例

10.6-10.7 GHz频段作为主要业务已划分给RAS，其中子频段10.68-10.7 GHz已全部划分给无源业务（《无线电规则》脚注**5.340**适用，该脚注列出了禁止所有发射的若干频段）。

该频段已成功用于银河系和银河系外射电连续谱观测（其中包括偏振特性）和脉冲星研究。

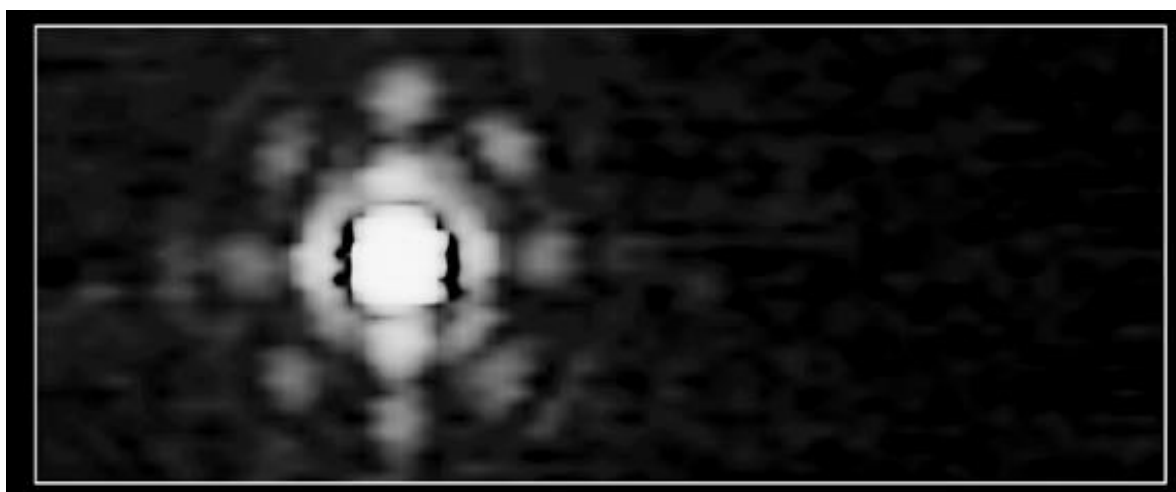
10.7-11.7 GHz频段已作为主要业务划分给FSS。10.7-10.95 GHz频段（空对地）和11.2-11.45 GHz频段（空对地），按照《无线电规则》附录**30B**的条款用于对地静止FSS系统。

下文描述了RAS运行的干扰案例，涉及一种具体的对地静止FSS卫星系统。

图6.7显示了宇宙最强射电源之一，3C84，使用Effelsberg 100米射电望远镜在10.6 GHz进行RAS测量的结果。该测量是在1995年之前进行的。视场大小为 $30 \times 12$ 角分，该源的流量密度为 $20.5 \text{ Jy}$  ( $\sim -247 \text{ dB(W(m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}))$ )。图示结构显示了射电望远镜的主波束以及近旁瓣。

图 6.7

使用Effelsberg 100米射电望远镜获得的10.6-10.7 GHz 频段河外源3C84图像



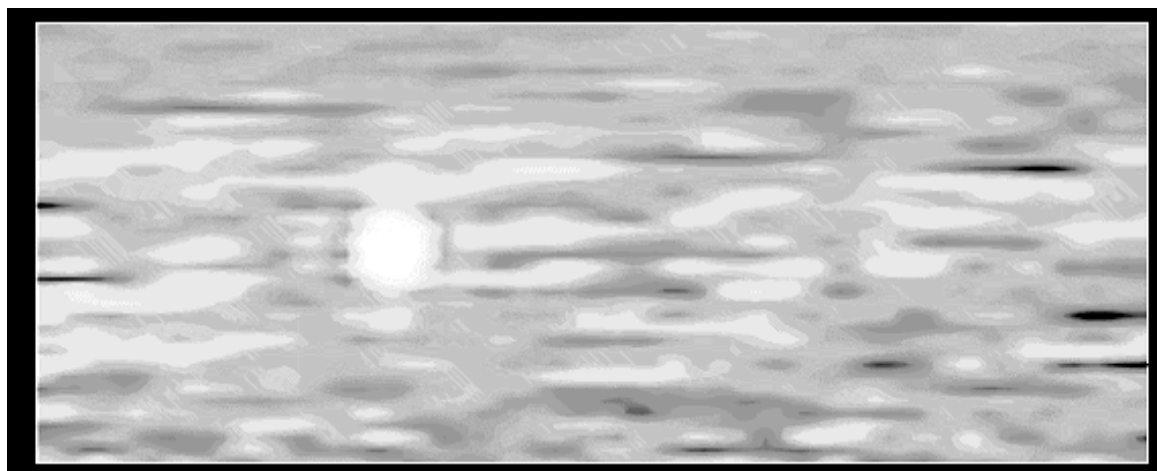
Radio-Astro\_67

1995年，一颗对地静止FSS卫星在某一轨道位置投入运行，而其它卫星则已运行了一段时间。该卫星发射中心频率较低，在10.714 GHz，转发器带宽为26 MHz。该FSS从该轨道位置产生的无用发射，对邻近10.6-10.7 GHz RAS频段造成的噪声起伏非常强，以致完全掩盖了任何天文信号。

图6.8显示出与图6.7相同 $30 \times 12$ 角分天区的对应图像，但该图是在1995年卫星投入运行后获得的，卫星轨道位置位于成图天空区 $10^\circ$ 间隔外。卫星干扰电平严重影响射电强源3C84的观测信号，从而无法明确识别为宇宙信号。

图 6.8

与图6.7具有相同的天区，但Effelsberg射电望远镜受到干扰



Radio-Astro\_68

为调查这次干扰情况，德国管理局在Leeheim的卫星监测站测量了有关卫星轨道位置上卫星的FSS传输频谱（见图6.8），以便确定进入到RAS频段中的无用发射电平。然而，应指出的是，监测电台当时的灵敏度和动态范围，不足以确认ITU-R RA.769建议书中给出的，作为RAS保护标准的干扰电平。

从图6.9中可以看出，在RAS划分的10.7 GHz边缘，在无源专用频段内，100 kHz参考带宽中测量到的无用发射电平为 $-151 \text{ dB (W/m}^2)$ 。该值对应于 $-201 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))}$ ，而ITU-R RA.769建议书给出的干扰门限值比此低39 dB，即 $-240 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))}$ 。此外，对于对地静止卫星，正如第4.7.3段所述，对于对地静止卫星，采用的合适限值最好再严格12-15 dB。这一大的差距出现在10.6-10.7 GHz 频段的最边缘，而在频段的其它部分，数值较低。

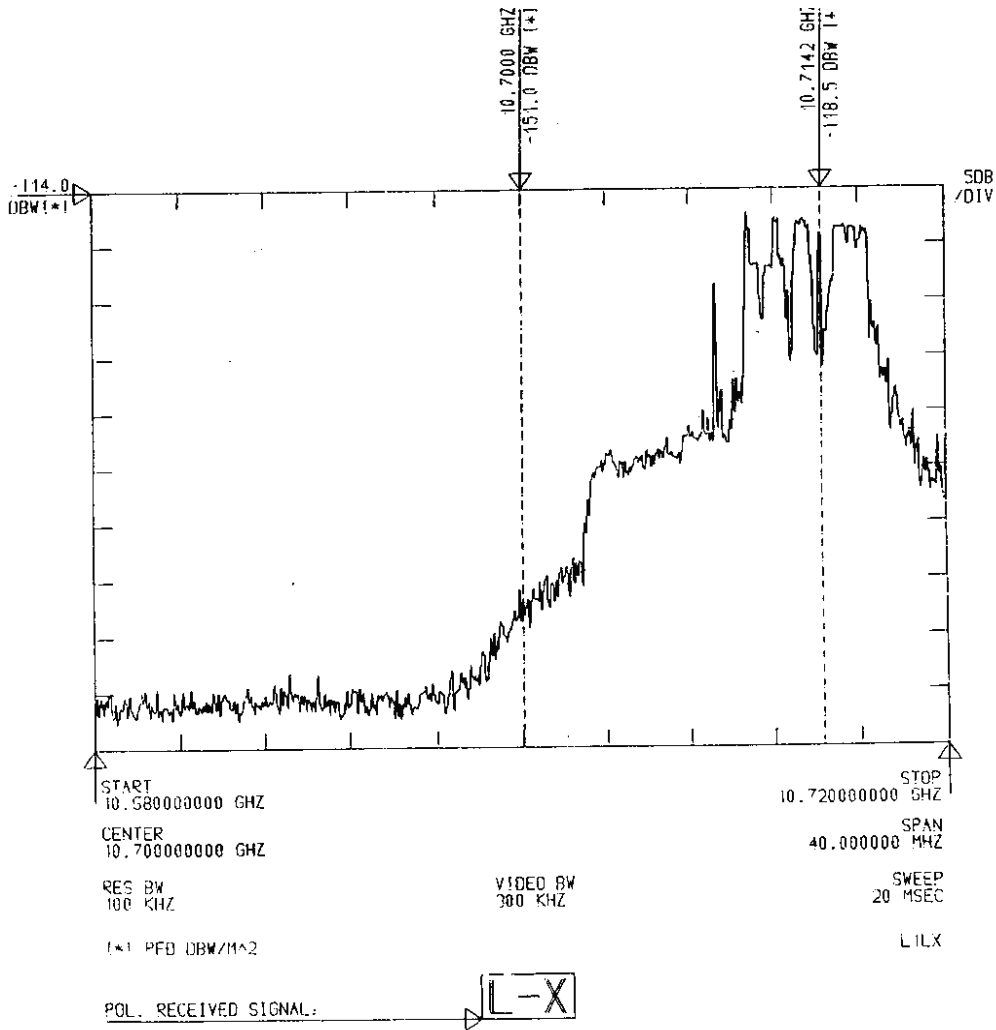
从10.7 GHz 频段边缘到接近10.69 GHz，干扰信号达到Leeheim监测电台( $\text{pfd} \sim -160 \text{ dB(W/m}^2)$ )的本底噪声，信号的衰减约为每4 MHz 10 dB。如假设该衰减率持续降至10.6 GHz，从上述轨道位置进入到10.6-10.7 GHz 频段的发射总功率估计共达 $-145.6 \text{ dB(W/m}^2)$ ，比ITU-R RA.769建议书给出的该频段 $-160 \text{ dB(W/m}^2)$ 门限超出14.4 dB。因此，整个10.6-10.7 GHz频段如图6.8所示，完全不可能用于射电天文观测。

该FSS卫星已移至其他轨道位置，不再影响Effelsberg 望远镜的观测。



图 6.9

在Leeheim 监测电台进行的对地静止FSS干扰测量（1995年）



Radio-Astro\_69

### 6.4.3.3 卫星可能造成的谐波干扰情况

#### 6.4.3.3.1 广播卫星在23.6-24.0 GHz频段造成的二次谐波辐射

对射电天文的一种可能干扰模式，是11.7至12.5 GHz频段广播卫星造成的二次谐波辐射。23.4至25.0 GHz的谐波范围包括专用的23.6至24.0 GHz 无源频段。对于1区和3区，《无线电规则》附录30附件3列出了覆盖区域边缘11.7至12.5 GHz频段每个接收的最小pfd。覆盖区域中心的pfd通常为-100 dB(W/m<sup>2</sup>)这些pfd值适用于卫星广播业务的每个通道。11.8-12.0GHz频段内的pfd总值可能达到-91 dB(W/m<sup>2</sup>)。

根据表 4.1，24 GHz 400 MHz带宽内，对射电天文的有害干扰是大于-147 dB(W/m<sup>2</sup>)的信号。对于旁瓣增益为0 dBi的射电天文天线，二次谐波所需要的抑制为56 dB，这可通过已有的设计技术实现。

#### 6.4.3.3.2 FSS在接近22.2 GHz的二次谐波辐射

第6.4.3.2.1段探讨的类似情况亦存在于22.2 GHz的射电天文水蒸汽频段，但地面固定业务发射机的允许pfd低于卫星广播业务，因此干扰问题相对较少。这也适用于15.35-15.4 GHz和164-168 GHz等无源频段，这些频段亦包含划分给空对地发射频率的二次谐波。

#### 6.4.3.3.3 4990-5000 MHz频段中卫星无线电测定和卫星移动频段的二次谐波辐射

2483.5-2500 MHz频段已划分给卫星无线电测定和卫星移动业务，用于从卫星到用户单元的下行链路传输。这些传输的二次谐波贯穿全球射电天文在4990-5000 MHz（4950-5000 MHz 阿根廷、澳大利亚和加拿大）作为主要业务的划分。根据表4.1，4990-5000 MHz 频段中对射电天文的有害干扰门限为-171 dB (W/m<sup>2</sup>)。

#### 6.4.3.3.4 1400-1427 MHz 频段中卫星气象业务的三次谐波辐射

一些气象卫星使用460-470 MHz频段询问地球平台以便获取数据。这些数据之后被转发至数据收集中心。466 MHz以上这类传输的三次谐波进入1400-1427 MHz射电天文频段。这些传输使用的功率最多为40 W。假设对地静止卫星发射天线三次谐波的增益为0 dBi，地球上子卫星点的pfd为-146 dB (W/m<sup>2</sup>)。对于射电天文天线0 dBi旁瓣接收，谐波抑制相对于基本传输强度而言至少为-34 dB。

### 6.5 宽带调制的无用发射

请参见ITU-R RA.1237建议书 – 保护RAS免受应用宽带数字调制无用发射的影响。

#### 6.5.1 宽带调制的使用

一些传输类型通常涉及数字数据，与接收信号相比，频谱边带是在更加宽广的频率范围内产生的。特别是数字相移键控调制技术产生的功率谱为 $[\sin(\pi x)/\pi x]^2$ 形式，在所用频段外循环出现附属最大值并随频率缓慢下降。尽管一般情况下，有关业务的接收只使用频谱的中央最大值，没有有效滤波，边带有时会产生辐射。例如，未经滤波的边带包络与中央频率-3 dB带宽相比为10倍的频率，比中心频率最大功率电平只减少29 dB。如果，二进位相移键控（BPSK）传输的键控频率为10-20 MHz，则这些10倍带宽将贯穿所指配频率周围的几百MHz。举例而言，考虑在1615 MHz中心，采用10 MHz键控频率的一个简单未经滤波的BPSK发射机，通过安装在飞行器上的全向天线辐射输出功率为40 W。在距离天文台400 km的视距距离内，无用边带在1400-1427 MHz射电天文频段产生的最大pfd电平将比表4.1的有害门限值高出48 dB。同时，在划分给射电天文的1610.6-1613.8 MHz和1660-1670 MHz频段的发射电平明显较高。

PSK亦用于直接序列扩展频谱调制。多数扩展频谱技术的通用特点，是具有低功率谱密度的宽带信号。该特点减少了这些发射对传统窄带通信系统造成干扰的概率。这些系统的主要目的是检索信号调制。相反，射电天文关注的是来自天体的功率准确测量数据。宇宙射电波通常具有随机噪声的特点，宽带接收机必须经常使用，以便提供所需要的灵敏度。因此，

通常无法区分扩展频谱信号和宇宙信号。第4章所述射电天文的有害干扰pfd门限值，既适用于无用发射，也适用于有意发射以及包括上文在内的所有各类调制。

## 6.5.2 减少无用发射的脉冲成形

脉冲成形可大大降低数字调制造成的无用发射电平，即使用幅度或相位避免接近矩形形状的脉冲波形。傅立叶变换理论表明，如脉冲波形作为时间函数的 $n$ 阶导数成为脉冲，功率谱中边带的频率倒数则下降至 $2n$ 次方。对于时域中的矩形脉冲，如脉冲波形1阶导数（ $n=1$ ）成为脉冲，按照上文所述正弦平方的形式，边带按照 $f^{-2}$ 下降。作为脉冲成形的示例，考虑在脉冲中，单位幅度的矩形过渡由 $[1 + \sin(x)]/2$ 取代，其中 $x$ 从 $-\pi/2$ 至 $\pi/2$ 完成线性正向过渡，并从 $\pi/2$ 至 $-\pi/2$ 完成反向过渡。所形成的脉冲波形的3阶导数成为脉冲，因此功率谱按照 $f^{-6}$ 下降。该结果已经过证明[1994年，Ponsonby]。因此，例如，当功率谱相对于矩形脉冲的最大值下降至 $-20$  dB时，对于上述sinc函数成形，则下降至 $-60$  dB。这一结果非常有益，因为由调制引发的无用发射频谱范围所导致的射电天文干扰将大大减少。还有其它脉冲波形可减少无用发射，例如高斯滤波最小频移键控（GMSK）[1981年，Murot和 Hirade；1994年，Otter]。

使用旨在最大程度上减少无用发射的调制技术，只有在调制后的功率放大器级具有充分的线性，以避免生成作为互调产物的无用发射。这对于卫星传输更是一个问题，卫星发射的功率限值可导致发射机效率的最大化，但同时导致线性的损失。一些通信卫星使用多种不同波束进行下行链路传输以实现频率复用。波束是通过大量辐射单元的适当相位形成的，这些单元受到不同功率放大器的驱动。为消除无用发射而对被放大信号进行滤波，在这些情况下并非总是适用。

## 6.5.3 宽带调制的干扰示例

自80年代中期以来，无线电测定卫星GLONASS系统[1988年，Daly；1991年，Ponsonby]一直是1 610.6-1 613.8 MHz和1 660-1 670 MHz频段射电天文观测的干扰源[1990年，Galt]。整个系统部署包括3个轨道平面的24颗卫星。最初计划使用1 602.5625 MHz至1 615.5 MHz范围内的24个发射通道，这些通道的中心频率间隔0.5625 MHz。由于扩展频谱调制的边带，导致通道位于射电天文频段以外的卫星产生干扰。边带在其频谱中显示的结构，由于分别采用低精度和高精度代码调制的键控频率，每隔0.511和5.11 MHz出现一次。边带的主要结构，是5.11 MHz间隔的一系列最大值在一些零值频率中出现窄峰。发射通道中的一些零值峰可在1 660-1 670 MHz射电天文频段中发现。

GLONASS主管部门与IUCAF合作，于1992年11月进行了一系列测试。在接近1 610.6-1 613.8 MHz频段使用发射通道的卫星，移动频率或阶段性关闭。全球15个天文台协助完成了这些GLONASS系统对天文数据质量影响效应的评估。评估结果构成了GLONASS主管部门、IUCAF和若干国家政府之间达成正式协议的基础。该协议详细阐述了全面解决射电天文频段中GLONASS干扰问题的解决方案。

解决方案包括：

- 使用相同的对应卫星通道以减少所需要的频率通道数量；
- 从射电天文频段下移指配的通道频率；
- 在最高频率通道的扩展频谱中第一个零值以上应用滤波技术。

由于GLONASS-IUCAF协议，没有发射频率范围高于1 610 MHz的航天器，且航天器均具有OoB滤波器。在1999年以后，1 612 MHz射电天文频段中的主要发射均已消除。GLONASS-IUCAF协议在《无线电规则》第739号决议（WRC-07，修订版）附件1的表1-2中得到明确认可：“该决议不适用于1 559-1 610 MHz频段中GLONASS/GLONASS-M无线电导航卫星系统目前和未来的指配，无论何时收到相关协调或通知信息。确保保护1 610.6 - 1 613.8 MHz频段中的射电天文业务并继续遵守俄罗斯联邦、GLONASS/GLONASS-M系统通知主管部门和IUCAF之间达成的双边协议以及与其他主管部门达成的相应协议。”

#### 6.5.4 示例：IRIDIUM（HIBLEO-2）MSS系统的无线电干扰

本节来自ECC第171号报告。该报告详细阐述了有关方法和测量情况。

##### 6.5.4.1 1610.6-1613.8 MHz频段的RAS运行

1 610.6-1 613.8 MHz已作为主要业务划分给射电天文业务，用于羟基（OH）谱线的观测。静止频率1 612 MHz的OH跃迁是RAS最重要的谱线之一，并列于ITU-R RA.314建议书中。OH是在无线电频率探测到的最早宇宙基（1963年），并一直作为强有力的研究工具。处于基态的OH分子在接近1 612、1 665、1 667和1 720 MHz的频率产生四条谱线。这些谱线在银河系以及银河系以外的发射和吸收中均已观测到。OH谱线研究提供了广泛射电天文现象的信息，如原恒星的形成以及恒星的演化。为对OH分子的多数观测做出解释，有必要测量若干谱线的相对强度。丧失观测任何这些谱线的能力，将无法开展对这类物理现象的研究。

##### 6.5.4.2 IRIDIUM星座情况

卫星移动业务（地对空）已在**1610.0-1626.5 MHz**频段获得划分，卫星移动（空对地）在**1613.8-1626.5 MHz**作为次要业务获得划分。脚注**5.208B**规定，第**739**号决议（WRC-07）适用于未来该频段规划的系统。

IRIDIUM系统采用66颗低轨（LEO）卫星支持用户对用户、用户对网关和网关对网关通信。66颗卫星以86.4°的倾角平均分布在六个轨道平面，每个轨道平面具有一个在轨空位。除平面1和6以外，轨道平面均以31.6°间隔共同旋转。第一和最后一个轨道平面间隔为22°，因而形成一个微型逆转的接缝。位于高度780公里的卫星轨道，具有的轨道周期约为100分钟28秒。

在1618.25-1626.5 MHz频段，它们采用特殊移动设备在地面和空中进行通信，所提供的全球通信业务覆盖地球的所有位置。

### 6.5.4.3 IRIDIUM干扰的性质和特点

1998年，在假定全负载条件下，对Iridium（HIBLEO-2）星座进行的理论预测总结见ITU-R SM.1633建议书（2003年）附件6：

#### “4.2 干扰电平的计算

在全负载条件下，1 610.6-1 613.8 MHz频段中HIBLEO-2卫星发射的无用发射，在一些射电天文台址产生的累计spfd，经理论估算在-214 dB(W/(m<sup>2</sup>/Hz))和-223 dB(W/(m<sup>2</sup>/Hz))范围内。”

IRIDIUM卫星在1610.6 -1613.8 MHz频段的干扰，是由卫星产生的7阶互调产物造成的，而不是由射电天文接收机的过载造成的。对Effelsberg望远镜收到的干扰分析（2006年3月1日的报告）表明，两个Iridium基本载频（ $f_1 = 1618.25$  MHz、 $f_2 = 1620.25$  MHz）在1612.25 MHz产生的观测到干扰，与互调关系 $f_1 - 3df = 4f_1 - 3f_2$ 相对应并暗示产生 $4 + 3 = 7$ 阶互调产物。在1.61425和1.61625 GHz，未发现任何更低阶产物的证据。普通的放大器和混频器将产生的干扰模式是，IM产物的功率随阶级的升高而降低。这些低阶（3-5）IM明显受到IRIDIUM卫星星载信号处理的抑制，而高阶IM产物依然明显。

先进的微波放大器和射电天文接收机在-30至-25 dBm拥有3阶截点（IIP<sub>3</sub>）。IRIDIUM卫星-178 dBm主载频（观测到的）无法在射电天文接收机前端产生可检测到的自干扰。干扰强度使卫星发射机的7阶截点估算约达+19dBW，接近卫星e.i.r.p. + 11 dBW。这表明，被压缩的卫星发射机在IRIDIUM频段两侧将产生很强的带外发射。对于某些传输通道的划分，七阶调制产物将进入RAS频段。

### 6.5.4.4 测量和验证

1998年，由HIBLEO-2（Iridium）和美国国立射电天文台（NRAO）开展了协作测试，在这些台址测试到的spfd值在-220至-240 dB(W/(m<sup>2</sup>/Hz))范围内。这些值针对所谓通信期间打开的语音通道。此外，测试发现，HIBLEO-2系统持续辐射广播信号。广播通道在射电天文频段显示出9-10窄（不足40 kHz宽）峰值。spfd峰值在90 ms期间的平均值为-227 dB(W/(m<sup>2</sup>/Hz))（来源：ECC第171号报告引用的ITU-R SM.1633建议书（2003年））。

### 6.5.4.5 2010年6月8-9日在Leeheim MS进行的测量

Leeheim空间无线电监测电台位于法兰克福/缅因西南约35公里的地方。Leeheim MS拥有多个卫星天线，其中包括旨在覆盖1-13 GHz频率范围的12米抛物面反射天线，监测工作即采用该天线进行。该天线高精度的角指向可以精确跟踪移动的卫星。

在Leeheim开展的主要工作，包括由MPIfR、ASTRON和BNetzA于2010年6月8日和9日对Iridium卫星进行的测量。对于Iridium星座的28颗卫星，测量在卫星1610.6-1613.8 MHz通带中6.1 kHz通道，每秒进行一次。观测为期两天，从08:30至17:30（当地时间）。

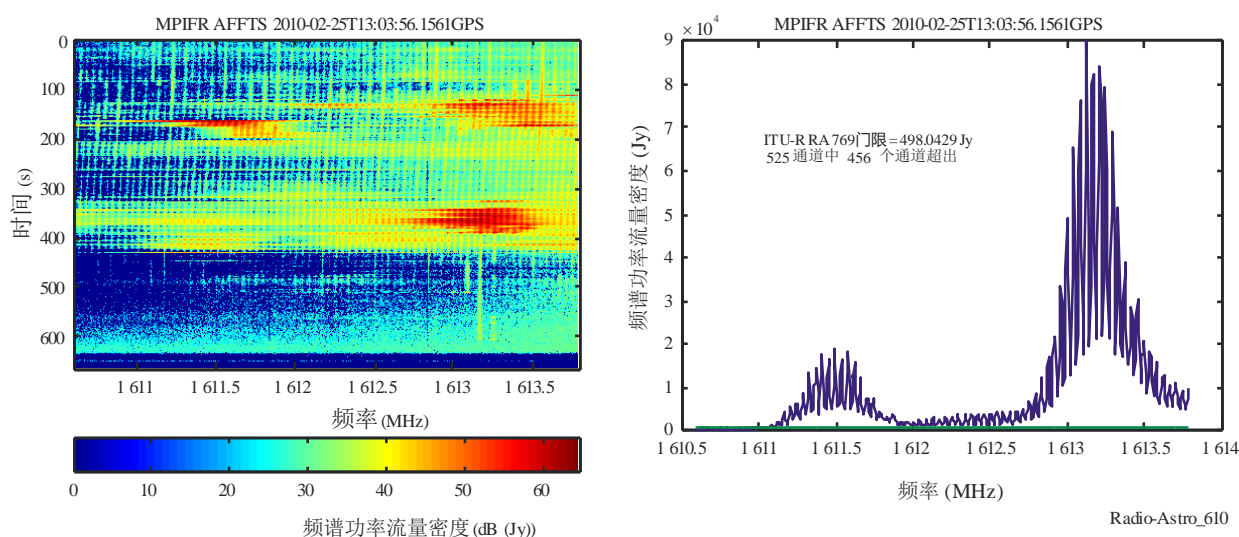
一个70 dB阻带滤波器用于接收机前端，以抑制1613.8-1626.5 MHz频段的强卫星发射，从而避免在天线跟踪到有源卫星时接收系统出现非线性。

使用卫星测量同样的配置，同一天观测了采用射电源Cas-A和Cyg-A，从而为所有频谱仪通道提供了绝对流量密度校准。

图6.10显示了所获得频谱的典型示例。在RAS频段观测到的干扰与1998年SM.1633报告的峰值特性相同。Leeheim MS测量中获得的发射峰值与在全负载条件下理论预测的数值相当，其中-214 dB(W/m<sup>2</sup>Hz)转换为40 kJy。

图 6.10

1610.6-1613.8 MHz频段中IRIDIUM 97无用发射校准后的频谱图（左）和平均频谱（右）



对Leeheim测量结果的分析表明，任何单一IRIDIUM卫星发射都造成地面干扰超出ITU-R RA.769，针对1610.6-1613.8 MHz所调整的时间和带宽门限值20dB以上（从1秒至800秒）。在所有发射平均频谱（中值76%）和最少11%（中值47%）的所有1秒发射中，带宽损失超出30%。由于IRIDIUM带外发射影响，这些带宽必须放弃。Leeheim的测量还确认了之前2006年3月1日Effelsberg干扰报告提到的结果。

应指出，NRAO 1998年针对每颗卫星在假定全负载条件下进行的测量，与此动态分析显示出同样的结果。Iridium系统一些操作参数的变化是在NRAO测试后（约2003年）进行的，以增强与RAS的兼容性。

按照ITU-R RA.1513所述，随后进行的EPFD分析表明，频段内的数据损耗差异很大。在考虑2000秒积分时间时为93.2%。为达到2%的标准，干扰功率电平应降低13 dB。处于RAS频段高端边缘的1613.7878 MHz频率的数据损耗，在考虑2000秒积分时间时为100%。为达到2%的标准，干扰功率电平需降低20 dB。对于30秒较短的积分时间，RAS频段较低边缘为4.7%，划分给RAS频段的高端边缘为43.5%。为实现2%的标准，干扰功率电平应降低11 dB。

IRIDIUM代表参与了各个阶段的测量，以及作为本节出处的ECC报告的制定。

## 6.6 结论

通过发射机对射电天文干扰问题的审查产生了若干结论，以下各点尤为重要。

- 射电天文接收机在RF和IF级需要关注滤波，以便在最大程度上降低邻近频段问题，但通常这一点不难实现。
- 在不邻近射电天文频段操作的发射机可以通过谐波辐射、互调效应和非滤波宽带调制对射电天文造成干扰。
- 卫星或航天器发射机可形成特殊问题，因为通常存在视距传播条件，接近主波束的旁瓣接收概率（而不是远旁瓣）大于地面发射。
- 总之，在邻近射电天文频段，为使用高功率地面传输或卫星发射的业务划分频段，可能导致技术难题和高昂的技术代价。
- 卫星宽带发射，如使用直接序列扩展频谱调制的信号，将对射电天文造成严重问题，除非这类传输经过充分的滤波。这种无用发射可通过使用脉冲成形调制技术大大减少。

## 参考文献

- DALY, P. [1988] Aspects of the Soviet Union's Glonass satellite navigation system. J. of Navigation, Vol. 41, p. 186-198.
- GALT, J. [1990] Contamination from satellites. Nature, Vol. 345, p. 483.
- MUROTA, K and HIRADE, K. [1981] GMSK modulation for digital mobile radio telephony. IEEE Trans. Commun., Vol. COM-29, p. 1044-1050.
- OTTER, M. A. [June 1994] A comparison of QPSK, OQPSK, BPSK and GMSK modulation schemes. Report of the European Space Agency, European Space Operations Center, Darmstadt, Germany.
- PONSONBY, J. E. B. [July 1991] Spectrum management and the impact of the GLONASS and GPS satellite systems on Radioastronomy. J. of Navigation, Vol. 44, p. 392-398.
- PONSONBY, J. E. B. [July 1994] Impact of the direct sequence spread spectrum signals from the Global Satellite Navigation System GLONASS on radio astronomy: problem and proposed solution. Proc. of the IEEE Spread Spectrum Symposium, Oulu, Finland.

## 第七章

### 特殊技术、应用和观测地点

#### 7.1 引言

本章讨论此前章节一般讨论中，未予充分考虑的相关技术和观测地点问题。特别应当指出，某些射电天文应用涉及到使用一个或更多空间天线进行观测，且有时被称作空间射电天文。需要采用空间天线的理由包括：

- 在甚长基线干涉测量（VLBI）中，地面天线信号与空间天线信号的相关提供了更长的基线，因此可比仅使用地面天线获得更高的角分辨率。轨道中空间天线围绕地球的运动，提供基于地面天线形成的基线方向变化，这对于二维成像非常重要。
- 对于宇宙微波背景（CMB）辐射结构的观测和测量而言，在约30 GHz及以上频率需要有极高灵敏度。避免大气吸收，特别是大气异常现象导致的信号强度变化非常重要，对于单天线（总功率）测量尤其如此。
- 对于临近地球大气H<sub>2</sub>O和O<sub>2</sub>强吸收线的频率（见图3.1）而言，有必要从空间进行观测。
- 在无线电波无法穿透的电离层或被很强衰减的低频上进行观测时，也需要从空间做出观测。

射电天文空间天线最重要的位置如下：

- 地球轨道，对VLBI尤为有用（见第7.2段）。
- L<sub>2</sub>太阳-地球拉格朗日点（见第7.3段），离地球约为 $1.5 \times 10^6$ 公里，因此可以提供一些免受地面干扰的保护。
- 地球拖尾轨道，在此轨道上的卫星接近围绕太阳的地球轨道，但通常拖后于地球 $10^6$ - $10^7$ 公里，因此又可提供一些免受地面干扰的保护。
- 月球屏蔽区（见7.4段），它能最为有效的保护天文设备免受地面干扰，但尚未得到使用。

L<sub>2</sub>点、月球屏蔽区和多数规划的地球轨道，均位于确定为近地球空间与深空之间界限的 $2 \times 10^6$ 公里范围内。地球轨道和L<sub>2</sub>点已被用于CMB辐射结构的观测。此外，具有最低大气水蒸汽的地面台址 - 南极和阿塔卡马（Atacama）沙漠 - 也已被用于CMB的观测（见第7.5段）。

本章讨论的其它特殊技术和应用，包括使用VLBI进行的大地测量（见第7.2.2）和脉冲星观测，这些可用于计时（见第7.6段）和太阳及其对空间天气影响的观测（见第7.7段）。



## 7.2 包括空间VLBI的VLBI

VLBI技术为采用间隔距离很大的天线（往往在不同国家或地球轨道中），对射电源进行同时观测。VLBI观测的角分辨率是任何其它基于地面的天文技术所无法比拟的。具有接近地球直径的最大基线VLBI阵，可实现小于1毫角秒的角分辨率。使用高稳定原子钟，在没有实时参考链路情况下保持相位相干性，则可以在VLBI阵列天线上实现观测频率的精确匹配。当将氢脉泽用作时钟时，相干积分时间通常仅受到通过大气和电离层路径长度较差变化的限制。然而，在高频频率上，脉泽的稳定性（ $10^{-14}$ ）可能是限制因素，例如，在100 GHz频率上，它会将相干积分时间限于1000秒。在不同天线台址获得的数据，或进行记录（目前记录于磁盘上），或通过高速广域网进行传输。记录或传输数据速率取决于科学观测的目标以及观测进程，同时也取决于现成可用的技术设施。目前在实践中使用的最大速率接近2千兆比特/秒，这是甚长基线阵（VLBA）采用的一种新标准，该阵列是专用VLBI设备，包括横跨美国国土分布的十个观测站。中心处理设施将复制信号并在时间上予以统一，方便将实际光程时延做到20毫秒以下，并将所有信号对合并，从而形成相关结果。

VLBI技术的分辨率，有助于射电天文学家观测活动星系核，以相对论速度喷射出的高能等离子体单个凝聚的相对运动。在银河系内，VLBI可测量跨越整个星系盘基于视差的距离，因此，目前正在通过一项深度观测计划，以前所未有的精度考察银河系的螺旋结构。VLBI作为确定天体和地面参考坐标系和标准时间工作中的主要成员，同时在其它领域的应用也非常重要，包括地壳板块运动以及遥远航空器的精确角度定位。

第4.4段讨论了VLBI网对有源业务干扰的灵敏度，第5.8段说明某些频段的使用。

### 7.2.1 空间VLBI

空间VLBI通过在围绕地球的高轨道上增加了一个天线来组成观测阵列，将VLBI技术的分辨率扩展到地球尺寸造成的限制以外。以下各节将回顾过去、目前和未来计划的任务（第7.2.1.1段）、空间VLBI独有的功能特性（第7.2.1.2段），并特别说明该技术的通信频率要求（第7.2.1.3段）。

#### 7.2.1.1 空间VLBI项目

表7.1概括了本节所述各空间VLBI任务的基本参数。表中引用的频率以及随后的讨论涉及宇宙射电源产生的射电发射。

表 7.1

空间VLBI任务

任务/实验	日期	轨道参数	天线直径	观测频段 [GHz]
TDRSS VLBI实验	1986 - 1988	对地同步 38,000公里	4.9米	2.271-2.285 15.35-15.43
VSOP / HALCA	1997 - 2003	远地点: 21,400公里 近地点: 560 公里 倾斜度: 31°	8米	1.60-1.73 4.7-5.0 22.0-22.3
Radioastron	2011 --	远地点: 280,000 - 353,000公里 近地点: 7,100 -81,500 公里 倾斜度: 5° - 85°	10米	0.316-0.332 1.652-1.684 4.812-4.852 22.212-22.252
Millimetron	2019	太阳 - 地球L <sub>2</sub> 点, 距地球1.5 × 10 <sup>6</sup> 公里	10米	18-26, 31-45, 84-116, 211-275, 602-720, 787-950
长毫米波长空间 VLBI阵列	2020	远地点60,000公里 近地点: 1,200公里 倾斜度: 28.5°	两个10米 天线	6 - 9 20 - 24 40 - 46

空间VLBI的可行性首次于1986年成功得到确认，在美国航空航天局（NASA）TDRSS（跟踪和数据接力）卫星系统上使用了4.9米直径的天线[Levy 及其他人，1989年]。初始实验在2.3 GHz频率上进行，此后采用同一卫星系统，于1988年在15 GHz上进行了进一步实验。

日本通过其VSOP任务 - VLBI空间天文台计划 - [Hirabayashi 及其他人，1998年]，从1997年至2003年首次通过沿轨道运动的天线进行了VLBI科学观测。该任务使用的HALCA卫星，于1996年由空间及航天科学研究所（ISAS，目前为JAXA的一个部门）发射。HALCA载有一个8米直径天线，其偏心轨道的远地点为21,400公里，轨道周期为6.3小时。它的工作频段为1.6、5和22GHz，但最后一个频段未用于日常观测，因为其性能受到破坏。其最小综合合波束宽度在1.6和5 GHz上分别为1.8和0.6毫角秒。共对32 MHz的全部信号带宽进行了数字化，并通过14.2 GHz上的一条128兆比特/秒的链路传送到地面。地面遥测站的专用网由ISAS、NASA和NRAO提供。广泛分布的地基射电望远镜参与了VSOP观测，具体工作由一个世界范围的国际联盟协调。国际无线电科学联盟（URSI）成立了全球VLBI工作组，负责协调地面阵列和数据采集及传输的兼容性问题。VSOP的主要科学目标包括活动星系核、OH脉泽区、脉冲星和耀变星。

目前，俄罗斯正在通过Radioastron任务进行空间VLBI工作，带有10米直径天线的Radioastron航天器由俄罗斯科学院Lebedev物理研究所的Astro空间中心和Lavochkin科学与生产协会开发，并于2011年发射至高偏心轨道中，即353,000公里的最大远地点，近于地球到月球的距离。此任务还采用了利用月球引发轨道扰动，来促使轨道参数发生快速变化，并促成实现由于天空方向快速变化导致的良好孔径覆盖。Radioastron是第一个载有星载氢脉泽频

率标准的空间VLBI任务，它的工作频率为0.32、1.66、4.8和22 GHz。共有32 MHz的信号带宽得到数字化，并通过15 GHz上的一条128兆比特/秒的链路传输到地面。全球各地若干主要射电天文望远镜均被纳入到一个相互联合的地基VLBI网络中。最近，Radioastron正在公开征求在主要科学目标领域的观测申请，包括活动星系核、超大质量黑洞、相对论性喷流、银河系和银河系外脉泽以及脉冲星。

Millimetron项目由俄罗斯科学院Lebedev物理研究所Astro空间中心提出，预计将于2019年发射。它将搭载10米直径天线，工作在18至950 GHz范围的观测频段，位于太阳 – 地球拉格朗日点L<sub>2</sub>上运行。Millimetron所具有的、未纳入此前空间VLBI任务中的独特之处，包括低温致冷天线表面和观测数据的星上存储。其科学目标包括恒星和行星系统的形成、恒星演变的相对论性阶段、超大质量黑洞以及银河和宇宙的演化。该项目的另一个主要方面是进行单口径天线观测，但不在此予以讨论。

长毫米波空间VLBI阵，由中国科学院空间科学项目委员会批准进行设计研究，作为空间毫米波VLBI阵的第一阶段工作，预计将于2020年发射。其双航天器的每一个都将搭载10米直径天线，轨道远地点为60,000公里，轨道平面角为120°，观测频段为8、22和43 GHz频段。该航天器将包括星载氢脉泽频率标准和数据存储。一条太空至地面的链路将支持速率高达2千兆比特/秒的数据传输。其科学目标包括超大质量黑洞、银河系外吸积盘中的超脉泽、活动星系核中的喷流以及大质量恒星的演变。

#### 7.2.1.2 空间VLBI的特性及其近期发展

曾经限制早期空间VLBI任务能力的若干技术问题，目前已由更先进技术所解决。特别应当指出，Radioastron任务已经成功使用星载氢脉泽，且未来俄罗斯和中国的相关项目都计划对之加以使用。然而，用于VSOP的双向相位传递系统依然可以有效工作，因此可继续成为未来的一种备份系统。

此外，还可大大放宽早期任务中有关定轨的限制，因为现代软件相关器可支持范围更广的干涉仪时延和条纹率。

有关星上存储观测数据、以便随后传输至地球的能力，意味着大大简化了任务的地面支持工作。尽管在这种操作模式中，所需的地面遥测站数量可少到一个，但需要与下行链路工作周期成反比的更大传输带宽。与此同时，空间VLBI任务的诸多科学目标，在极大程度上取决于灵敏度，因此，对数据下行链路带宽的要求日益迫切。

目前尚未得到解决的、对空间VLBI成像形成挑战的一个问题是：VLBI数据分析使用的常规自校准技术在这种阵列中不能有效工作，即其中一个台站 – 空间天线 – 与所有其它台站几何隔离。长毫米波空间VLBI阵列所提出的多空间天线方式，可能是绕过这一限制的第一步。

### 7.2.1.3 空间VLBI操作的频率需求

与空间VLBI相关的频率共用考虑，较基于地面的VLBI更为复杂，因为前者涉及到遥控命令链路、双向相位传递信号和宽带空对地数据传输的三重需求。所有这些在进入由其它空间研究系统使用的频段时，都需要免受有害干扰的影响。

目前空间VLBI任务使用的频段，位于7.190-7.235 GHz（地对空）、8.025-8.500 GHz（空对地）、14-15.35 GHz（空对地）和14.5-15.35 GHz（地对空）中的空间研究频段。在这些划分中可以满足这些任务的带宽需求，然而，未来任务可能需要若干千兆赫兹宽的数据下行链路频段，其划分频率在20 GHz之上。第7.2.1.1段结尾处所述的两项未来空间VLBI任务，尚未选择宽带数据下行链路的频率。在37-38 GHz（空对地）、40-40.5 GHz（地对空）和74-84 GHz（空对地）频段内可提供其它划分。

虽然不再至关重要，但备份相位传递过程将要求对合适链路提前做出规划。电离层和对流层传播效应要求传输频率在7 GHz至20 GHz之间。上行链路和下行链路频率应尽可能接近，但由于二者通常并非相同，因此，需要进行大气建模，以便对路径长度变化效应做出补偿。

ITU-R SA.609建议书列出了载人和无人近地球研究卫星通信链路的保护标准，这些也适用于规划中空间VLBI系统的遥测和定时链路。对超过建议有害干扰门限值的时间不得大于0.1%的情况，在地球站接收机端为-216 dB(W/Hz)，在卫星接收机端为-177 dB(W/kHz)。用于计划中空间VLBI项目通信链路的频段，被划分给多种无线电通信业务，但是，有关将潜在干扰电平作为卫星轨道位置函数的考虑表明，有效共用是可行的。在有些情况下，可能需要进行谨慎协调。

## 7.2.2 采用VLBI的大地测量学应用

VLBI是测量和监测地球的重要手段。通过世界范围内不同地点天线构成的网络以及具有精确测定位置的射电源系统，可以确定一对天线之间的距离，精确度可达到若干毫米。VLBI是唯一提供完整地球方位参数（EOPs：白昼长度和极点方位）的大地测量技术，它可针对惯性天球参考架（CRF）获得地球的位置（前者由类星体表描述）。通过测量EOP，VLBI可提供地球参考架（TRF）的绝对方位以及比例。EOP对于航天器导航至关重要，但它们在短时间内更迭变化且无法预测，因此需要进行定期测量，例如，没有VLBI，则无法进行全球定位系统（GPS）卫星数据的校准。国际大地测量学和天文学VLBI服务组织（IVS）（Schuh和Behrend，2012年），负责对CRF进行充实和完善并定期测量EOP。

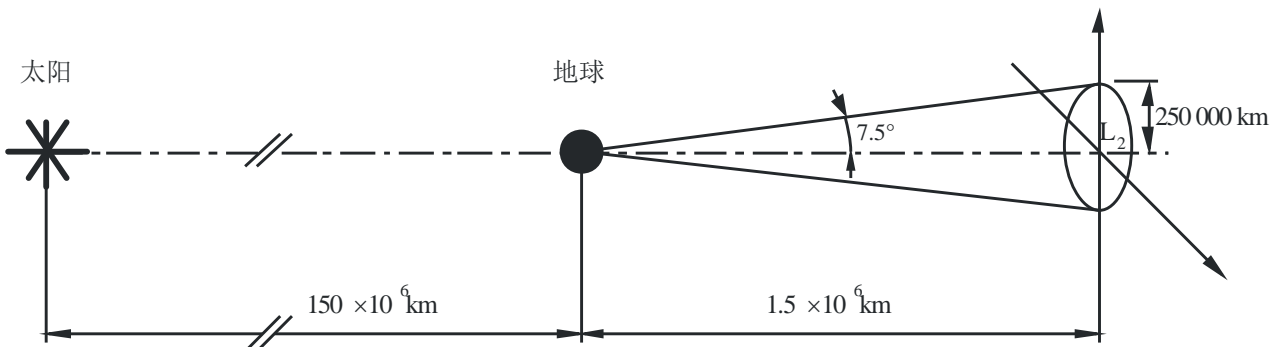
近年来，已制定了旨在实现IVS望远镜网络现代化的计划，以满足一些极具挑战性的目标，包括位置精度达到1毫米和速度精度达到每年0.1毫米[Petrachenko及其他人，2013年]。这一被称作VLBI2010全球观测系统（VGOS）的计划，要求使用新的小型但快速运动的望远镜和宽带接收系统。目前已建造了一些新的望远镜（如，AuScope VLBI阵，Lovel *et al.*，2013），有些则在建设之中或已得到规划。需要通过宽带接收系统来提供满足VGOS目标所需的频率覆盖和灵敏度。天文台将在2至14 GHz频率上，记录带宽扩展到1GHz的四个双偏振数据。

### 7.3 太阳 – 地球拉格朗日点L<sub>2</sub>上的射电天文

在太阳 – 地球系统的引力场中存在五个特殊平动点（拉格朗日点），可围绕这些点可以建立航天器的稳定（光晕）轨道。这些位置对于在空间建立永久实验室十分有益。L<sub>1</sub>和L<sub>2</sub>点位于太阳 – 地球连线上，位于地球两侧，每点距地球约 $1.5 \times 10^6$ 公里（见图7.1）。L<sub>2</sub>点离太阳更远，且在该位置上，到太阳、地球和月球的LoS相互间仅差几度。围绕地球的对地静止轨道直径，对应L<sub>2</sub>点形成约3.1°的角度，因此，具有低后旁瓣的天线指向离开地球的方向时可受到保护，从而免受多数地球附近发射机的干扰影响。这一考虑以及其它优势（如在空间可保持天线及其它接收设备低物理温度的有利条件）都使人们提出相关建议，开展位于L<sub>2</sub>点周围轨道中的航天任务。表7.2列出了其中一些初步数据。ITU-R RA.1417建议书探讨如何进行L<sub>2</sub>点附近电磁环境的保护问题，该建议书建议，中心在L<sub>2</sub>点的、半径为250 000公里的空间体积应作为低电磁发射协调区得到保护。

图 7.1

一个L<sub>2</sub>轨道的典型几何图



Radio-Astro\_71

表 7.2

已经或计划在靠近太阳 – 地球拉格朗日点L<sub>2</sub>上操作的空间射电天文任务

任务/运营机构 孔径	任务类型 观测模式	运营日期	观测频段 (GHz)
MAP/NASA 1.4m × 1.6 m	宇宙微波背景的单天线连续谱成像 连续谱	2001-2009	18-96
PLANCK/ESA 1.5 m × 1.9 m	宇宙微波背景的单天线连续谱成像 连续谱	2009-2012	30 ± 3 44 ± 4.4 70 ± 7 100 ± 10 150 ± 28 217 ± 40 353 ± 65.5 545 ± 101 857 ± 158.5

任务/运营机构 口径	任务类型 观测模式	运营日期	观测频段 (GHz)
Herschel/ESA 3.5 m	单天线射电天文 谱线和连续谱	2009 -2013	490-642 640-802 800-962 960-1 122 1 120-1 250 1 600-1 800 2 400-2 600
Millimetron/ ROSKOSMOS 12 m	单天线射电天文和空 间甚长基线干涉仪 (sVLBI) 谱线和 连续谱	2015-2030	18-4 800
SPICA/JAXA 3.5 m	单天线射电天文/谱线 和连续谱	2018	1 500-10 000

## 7.4 在月球屏蔽区开展射电天文观测

目前，地球上的电磁频谱被大量使用，大大削减了其用于射电天文研究的价值，其原因不仅因为无线电通信常规增加（特别是涉及到地球卫星的无线电通信），而且因为有些射电天文观测需要在一些谱线频率上进行，但这些频率并未得到《无线电规则》的保护，而且在未来得到保护的希望微乎其微。

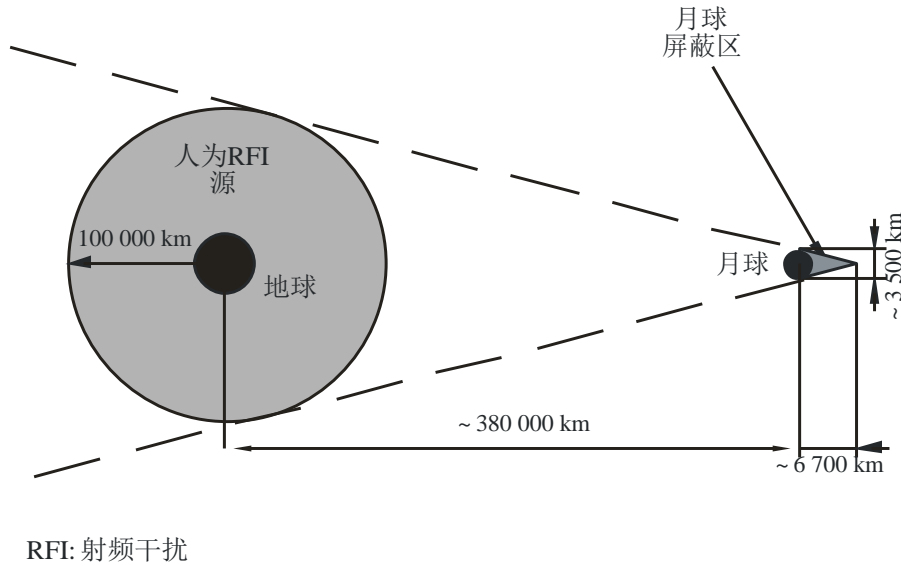
月球远端可能是唯一现存的、无干扰情况下、在整个无线电频谱上进行射电天文观测的可接近地点。然而，深空探测器、月球卫星、月球表面的多种科学仪器以及研究站点仍然有可能干扰观测，因此，应谨慎划分频率，以避免干扰在月球屏蔽区进行的射电天文工作。

### 7.4.1 月球屏蔽区

月球围绕其轴的旋转周期相当于其围绕地球旋转的周期，这意味着，月球的同一面总是朝向地球。由于围绕地球的轨道形状接近椭圆和并略微倾斜，因此地球上的观测者可看到月球表面的一多半。月球表面隐藏的部分始终得到保护，不会受到地球上或地球附近干扰信号的干扰：见图7.2。月球表面的屏蔽区位于从地球中心看去的超出月球平均边缘 $23.2^\circ$ 以上区域。《无线电规则》第**22.22.1**款将月球屏蔽区定义为，包括月球表面区域，和离地球中心100 000公里距离内免受地球发射源干扰的相邻屏蔽空间。

图 7.2

月球屏蔽区的简化框图



Radio-Astro\_72

#### 7.4.2 在月球进行观测的首选频率范围

低频射电天文观测可以提供有关太阳活动、宇宙射线和我们银河系中磁场的重要数据，以及有关银河系内和河外分立射电源的低频频谱数据。然而，在地球上进行低于30 MHz频率的此类观测十分困难，因为电离层是不透明和不均匀的。只有在特殊情况下并在特殊地点，才可以进行20 MHz以下的观测，也仅可在有限时间周期内进行（见第3章）。地面的自然和人为无线电干扰，也影响在这些频率上进行的射电天文观测。在约500 kHz以下，极光辐射是主要噪声源。在1至30MHz之间，主要干扰源为长距离通信传输。事实上，300 MHz以下频谱由有源业务大量使用。鉴于这些限制，未受到电离层或人为发射效应影响的月球屏蔽区，应被保留用于低频射电天文观测，这一点非常重要。

在20 GHz以下的较高频率上，地球上的射电天文受到人为发射的极大限制。尽管《无线电规则》对诸多在天体物理上具有重要意义的谱线跃迁给予保护（见第3章），但总体上，对与遥远红移星系相关的多普勒频移所对应的频率，几乎没有保护。此外，目前可观测到的一些重要跃迁，但其频率并未得到保护，例如，6.7 GHz和12.2 GHz上的甲醇线（CH<sub>3</sub>OH）及18.3 GHz上的环丙烯分子（C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>）。在低至323 MHz的多普勒频移频率上，已观测中性氢原子1 420 MHz谱线 [Uson及其他人，1991]，因此，应寻求对1 420 MHz以下整个频率范围的保护。

在20 GHz以上频率，在地球表面进行的射电天文观测，受到由H<sub>2</sub>O和O<sub>2</sub>强跃迁造成的大气不透明度阻碍（见第3章）。尽管已在跃迁间的大气窗口中进行过一些成功观测，但随着频率的增加，这些观测难度逐步加大。多数分子谱线位于高频，且有些无法从地球观测。对于射电天文而言，被地球大气遮蔽的无干扰频段，对于在月球屏蔽区进行观测十分重要，尽管在这些频率上进行的成功观测，可能在其它空间地点也是可行的。

### 7.4.3 月球屏蔽区的利用规则

由于月球屏蔽区的整个频率范围，都不受地球附近产生的辐射影响，因此该区是进行科学观测的独一无二地点。在可预见的未来，可在该区进行射电天文及其它科学实验，因此，对其设施可能在屏蔽区造成辐射的无线电通信业务活动，进行规则管理至关重要。必须对地球卫星、深空探测器，和计划用于屏蔽区的发射机需求做出考虑，前提是要尽可能保持该区免受无线电干扰，从而保持其在无源观测方面的巨大价值。

《无线电规则》第22.22至22.25款认识到，有必要将月球屏蔽区作为射电天文和无源空间研究业务具有极大潜力的观测区，因此，此区应尽可能不存在任何发射。

ITU-R RA.479建议书建议，在规划国内和国际层面月球屏蔽区无线电频谱使用时，需要考虑到为射电天文观测做出相关规定。该建议书进一步建议，应特别关注从地球表面难以进行或无法进行观测的频段，且所涉频谱的使用应符合一系列初步规则。按照这些规则，屏蔽区的整个无线电频谱都将可以用于无源业务，目前已可使用或未来将划分的频段除外：

- 支持通过空间研究业务、空间操作业务、卫星地球探测业务和卫星无线电测定业务进行的空间研究工作，
- 在屏蔽区内进行的无线电通信和空间研究传输。

发射机在超过距地球100 000公里的空间无线电业务，需要根据其活动与RAS进行协调。上述建议书的最后一项建议是，当射电天文在被认为由屏蔽区内有源和无源空间台站使用的频率上运行时，应使其免受有害干扰的影响。

在月球屏蔽区，可制定有关规则，选择保留用于射电天文的频段。1420 MHz HI、115 GHz CO以及在更小程度上的1 612 MHz、1 665 MHz、1 667 MHz和1 720 MHz OH的跃迁，是遥远星系红移研究的主要内容，因此，对于HI和OH研究本身而言，2 GHz以下的频谱区域应尽可能保持不存在发射的状态。对于多普勒频移CO观测而言，需要得到保留的最重要频谱区域，为地面大气高度不透明的区域。应保留诸多在天体物理方面最重要的跃迁所需的频段，特别是目前几乎未得到保护的频段。这将促成实现包括屏蔽区内天线的VLBI观测。应给予这些频率最大的、免受带内或带外(OoB)发射(包括谐振相关频段的发射)有害干扰影响的保护。在15 GHz以上频率上，由地球大气遮挡的频谱区域，应持续被射电天文学家使用。如果屏蔽区的无线电通信系统和数据传输具有频率灵活性，以使其在发射频段内发现重要谱线时即可改变频率，则可减轻未来非保护频段内谱线的观测问题。

### 7.5 低大气吸收台址

大气水蒸气密度特别低的台址为亚毫米波长范围，即300 GHz以上射电频率，提供了最佳地面观测地点。有关更多此处所述台址参数的进一步详细信息见第十三章[Thompson及其他人撰写的论文，2011年]。



### 7.5.1 南极洲 (Antarctica)

南极高原具有的高纬度和极端严寒气候导致水蒸气柱密度很低，因此使其成为地球上在300-15 000 GHz频率范围内（波长范围1-0.02毫米）进行天文观测的最佳地点。与较低频率上射电天文相比的另一个优势是，在该地点，严格位于对地静止轨道内的卫星是低于地平线的。然而，南极高原相对来说难以出入，且作为天文台台址，目前尚未得到开发。南极点与南极高原相比，虽然观测质量略有所下降，但却是世界上有可能到达、最佳高频天文台台址，尽管人们对此尚有不同观点。在南极点，望远镜可进行其它地方难以或无法进行的观测，因为在几乎所有时间内，大气在上述频率范围内是透明的。对于低亮度特性的测量而言，极稳定的大气不透明度尤其具有优势。然而，应当指出，假设射电天文望远镜可以覆盖低至5°仰角的天空，则从南极点观测到的天球部分，仅为可从更低纬度站址观测到部分的一半，后一类台址包括下述Cerro Chajnantor或Mauna Kea台址。

目前，10米直径南极点天文望远镜正在95-350 GHz频率上进行观测。此外，13-馈源DASI干涉仪也在南极点运行，其观测使用的频率范围为26-36 GHz[Leitch et al., 2002]。

### 7.5.2 智利的Cerro Chajnantor

智利的阿塔卡马沙漠为ALMA天文望远镜提供了台址，该台址位于67°45'11.4"W、-23°01'22"，海拔为5 000米，该台址射电天文所需的大气条件与南极点的大气条件相媲美。ALMA是一个复杂的设备，由50x12米、12x7米和4x12米的天线组成阵列，并在30-950 GHz范围内进行观测。台址附近是12米的APEX和ASTE天文望远镜。该同一区域还是另一个、专门设计用来测量CMB的宇宙背景成像仪台址，后者使用与DASI相同的26-36 GHz频率范围，但它覆盖补充了DASI的观测角结构范围[Padin et al., 2001]。

### 7.5.3 夏威夷的Mauna Kea

夏威夷的Mauna Kea山峰顶端（155°28'18"W、+19°49'36"）的海拔为4 080米，该台址上运行包括工作在180-900 GHz频率范围的10x6米次毫米阵（SMA）[Moran, 1998年]、10米CSO和15米JCMT。

### 7.5.4 亚利桑那州的Graham山

该海拔高度为3200米的台址（109°53'28.5"W、+32°42'05.8"）上，建立了在200-700 GHz工作的10米SMT和2x8米LBT的大型光学望远镜。

## 7.6 脉冲星观测及作为时间标准的应用

第2章已详细讨论过射电脉冲星。

观测到的脉冲星脉冲周期范围从几秒到几毫秒，甚至观测到了低至1.55毫秒的周期。主脉冲以及有时出现的微弱次级脉冲通常仅占整个周期的一小段时间。通常，脉冲周期具有惊人的规律性，但有些情况下周期也会发生突然变化。此外，一些周期会出现规律的周期性变化，这表明中子星是双星系统的一部分，并环绕在低质量伴星周围。通过持续若干年的脉冲

到达时间测量工作，不仅获得了脉冲星的精确位置及自行（即，天体位置在天空的角运动），而且得到了有关脉冲星周期长期稳定性的信息。

只可能对更强脉冲星观测到单一脉冲。在此类情况下，已发现脉冲的强度可发生巨大变化，其中一些变化被认为是星际介质（脉冲穿行于该介质）引起的闪烁。对于弱脉冲星而言，采用积分时间高达若干小时的脉冲平均技术，来确定脉冲平均轮廓。通常，随着频率增加，与多数其它类型射电源相比，脉冲星发射强度减弱速度更快。

### 7.6.1 作为标准时钟的脉冲星

现已发现，周期为若干毫秒的脉冲星非常稳定，周期导数（周期随时间的变化）在 $10^{-18}$ 至 $10^{-20}$ 范围内，比其它脉冲星小四至五个数量级。天体物理学家对这些脉冲星极感兴趣，且目前世界上若干天文台正在搜寻这些天体。目前已知存在约100个毫秒脉冲星。

当前正在进行毫秒脉冲星的长期计时观测。这些观测表明，脉冲星周期的长期稳定性至少可与目前采用原子频率标准实现的稳定性相媲美。这意味着，利用这类脉冲星，可以在未来进行精确守时。目前已发现的一颗高出任何已发现毫秒脉冲星亮度两个数量级的南天毫秒脉冲星，更强化了上述观点。该脉冲星的强度可促成对单个脉冲进行采样。现正在进行相关研究，以便利用这些脉冲星来建立未来的精确时标。

在将毫米脉冲星用于未来守时之前，必须做出若干决定（如见ITU-R第205/7号课题、ITU-R RA.2099号报告）。这些涉及到相关观测考虑，如脉冲星观测的首选频段（如，现已建议使用1 330-1 427 MHz宽频段）、将产生有害干扰的无用信号电平以及观测频段与其它业务进行频率共用的可行性。其它相关内容还包括将计时数据与原子时标进行比较、确定脉冲到达时间、评估计时测量精确性、存在干扰时的观测方法以及将计时数据与原子时标做出比较时应遵守的程序。

### 7.6.2 作为参考坐标参照体的脉冲星

在本章的开头，介绍了射电天文的VLBI应用，该技术可给出最高角分辨率，特别是空间VLBI。脉冲星的角尺度小至 $10^{-7}$ 至 $10^{-10}$ 角秒。其磁层的亮度分布被认为无法分辨。脉冲星本身可被视为天空中的参考坐标点。在动态参考架内，测量了时间单位为年的一颗脉冲星的位置，准确度达到0.5毫角秒，相当于地球轨道1  $\mu$ s时间和300米的不确定性。可通过S频段的洲际VLBI，来实现与此相当的精确度（俄罗斯Kalyazin – 日本Kashima）[Sekido et al., 1998]。在ICRF中获得了脉冲星坐标的VLBI数据，由此可以很高的精确度调整天空坐标系。当使用适当程序来找出脉冲星参数（周期、周期的时间导数、坐标、自行以及双星系统的Keplerian参数）时，可将来自VLBI数据的脉冲星坐标进行独立使用。

## 7.7 太阳监测

太阳活动可影响到诸如电气设施等一些业务的操作，因此，在全球通过不同电磁频谱区域，对太阳活动进行监测。其中的一个示例是，自1947年以来，加拿大国家研究委员会在10.7厘米波长上，每日进行太阳射电发射监测。该项目包括总spfd和耀斑巡查的精确测量，

提供了迄今为止最长的太阳活动量化记录。以太阳流量单位 ( $1 \text{ sfu} \equiv 10^{-22} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ ) 表示的该测量, 通常以  $F_{10.7}$  表示, 并在世界范围内用作最主要的太阳活动指数。它不仅用于太阳物理界, 而且由大气科学家、通信工程师、公共电力系统及其它组织 (剧烈太阳活动及与之相伴的地磁暴都使其工作质量降低) 使用。此外, 空间机构使用它进行地球上层大气密度的建模, 以计算卫星轨道。由于太阳厘米波长的射电发射, 主要来自磁场以及磁场中热电子造成的等离子体聚集 (缓慢变化成分), 因此, 10.7厘米强度与总磁场流量密切相关。它还与太阳活动的其它测量指标相关, 因此被广泛用来代表下列指标: 苏黎世太阳黑子数量、太阳亮度和综合紫外线强度, 这些难以以所需的一致性和连贯性进行测量。对  $F_{10.7}$  做出的详细讨论参见相关文献 [Tapping, 2013年]。

由于太阳发射的强度, 且由于近年来进行的多数测量是在得到很好屏蔽的站址上进行, 因此, 来自有源业务的有害干扰尚未带来问题。尽管如此, 所测数据的主要用户指出, 在任何特定年份内, 由于技术故障或干扰造成的数据损失率必须保持在1%以下。

1992年, 建成了一个更强大的太阳监测设备 – Nobeyama (日本) 射电日像仪, 该日像仪每日在 17 GHz 上观测, 对于太阳的角分辨率为 10 角秒, 时间分辨率高达 20 毫秒。一个崭新和更加全能的设备 – 频率灵敏太阳阵 (FASR) – 目前正在进行研究, 它将能够在 0.1-30 GHz 频率范围内, 获得具有角秒分辨率的太阳及其大气的图像 [Bastian 及其他人, 1998年]。

## 参考文献

- BASTIAN, T. S., GARY, D. E., WHITE, S. M. and HURFORD, G. J. [1998] *Broadband imaging spectroscopy with a solar-dedicated array*. Proc. SPIE, Vol. 3357. Advanced technology MMW, radio, and terahertz telescopes. T. G. Phillips, ed. p. 609-619.
- D'ADDARIO, L. R. [1991] Time synchronization in orbiting VLBI. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-40, p. 584-590.
- HEWISH, A., BELL, S. J., PILKINGTON, J. D. H., SCOTT, P. F. and COLLINS, R. A. [1968] Observations of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, Vol. 217, p. 709-713.
- HIRABAYASHI, H. *et al.* (52 coauthors) [1998] Overview and initial results of the very long baseline interferometry space observatory programme. *Science*, Vol. 281, p. 1825-1829.
- LEITCH, E. M. *et al.* [2002] Experiment design and first season observations with the degree angular scale interferometer. *Astrophys. J.*, Vol. 568, p. 28-37.
- LEVY, G. S. *et al.* (31 co-authors) [1989] VLBI using a telescope in Earth orbit. 1. The observations. *Astrophys. J.*, Vol. 336, p. 1098.
- LOVELL, J. E. J., MCCALLUM, J. N., REID, P. B., MCCULLOCH, P. M., BAYNES, B. E., DICKEY, J. M., SHABALA, S. S., WATSON, C. S., TITOV, O., RUDDICK, R., TWILLEY, R., REYNOLDS, C., TINGAY, S. J., SHIELD, P., ADADA, R., ELLINGSEN, S. P., MORGAN, J. S., & BIGNALL, H. E. [2013], "The AuScope geodetic VLBI array", *Journal of Geodesy* 87 527-538

MORAN, J. M. [1998] *The submillimeter array*. Proc. Spie. Vol. 3357. Advanced technology MMW, radio, and terahertz telescopes, T. G. Phillips, ed., p. 208-219.

PADIN, S. *et al.* [2001] First intrinsic anisotropy observations with the cosmic background imager. *Astrophys. J. Lett.*, L1-L5.

PETRACHENKO, WILLIAM, BEHREND, DIRK, HASE, HAYO, MA, CHOPO, NIELL, ARTHUR, SCHUH, HARALD, & WHITNEY, ALAN 2013, "The VLBI2010 Global Observing System (VGOS)" EGU General Assembly, held 7-12 April, [2013] in Vienna, Austria, id. EGU2013-12867, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013EGUGA..1512867P>

PRESTON, R. A., BURKE, B. F., DOXSEY, R., JORDAN, J. F., MORGAN, S. H., ROBERTS, D. H. and SHAPIRO, I. I. [1983] *The future of VLBI observatories in space. (Techniques d'interférométrie à très grande base)*. F. Biraud, ed., Cepadues, Toulouse, France.

SEKIDO, M., IMAE, M., HANADO, Yu., HAMA, S., KOYAMA, Y., KONDO, T., NAKAJIMA, J., KAWAI, E., KURIHARA, N., ILYASOV, Yu. P., ORESHKO, V. V. and RODIN, A. E. [1998] Pulsar VLBI experiment with Kashima (Japan) – Kalyazin (Russia) baseline. *New Astronomy Rev.* Vol. 43, p. 599-602.

SCHUH, H. and BEHREND, D. [2012], "VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry". *Journal of Geodynamics*, 61, 68-80.

TAPPING, K.F., "The 10.7cm solar radio flux ( $F_{10.7}$ )", *Space Weather*, Volume 11, Issue 7, July [2013], Pages: 394–406.

THOMPSON, A. R., MORAN, J. M. and SWENSON, G. W. [2001] *Interferometry and synthesis in radio astronomy*. 2nd ed. Wiley, New York, United States of America.

USON, J. M., BAGRI, D. S. and CORNWELL, T. S. [1991] Radio detection of neutral hydrogen at redshift  $z = 3.4$ . *Phys. Rev. (Lett.)*, Vol. 67, p. 3328-3331.

## 第八章

### 干扰的缓解

本章节涉及射电天文中的无线电干扰（RFI）缓解问题。全面说明和广泛参考见ITU-R RA.2126号报告 – 射电天文中的无线电干扰缓解技术。

#### 8.1 引言 – 目标

射电天文的干扰缓解旨在减少或消除射电天文频段内和频段外，有源业务信号造成的影响。干扰（几乎）总会导致数据损失和数据质量下降，如果干扰出现在已划分的RAS频段时，还会带来监管问题。然而，对于没有划分给RAS的频段，由于干扰导致的数据损失，则不能诉诸监管行动。防止出现干扰信号的监管行动，显然能够最有效的避免数据损失；预防远胜于缓解。可以在数据采集系统内各点应用缓解方法，包括通过监管、事前和事后检波法、各种预相关方法和相关及后相关方法，积极主动地改变本地RFI环境。但是，在数据采集过程中的问题越早解决越好。早期干预可减少数据损失、压缩后续工作成本和降低系统复杂性。干扰比较容易在干扰噪声比（INR）较大情况下得到缓解。弱RFI可在数据积分后的处理过程中得到解决，以提高信噪比（SNR）。

由于现代科学的原因，现代RAS系统的运行带宽日益增加，系统灵敏度也不断提高。因此，观测通常涉及划分给有源业务且未对RAS给予保护的频段，因此需要RFI缓解技术在未划分的频段获取好的天文数据。

在较大带宽中运行的RAS遇到的一个主要问题，来自无执照和批量生产的低功率、宽带、扩频设备的推广。需要具有创造性的缓解解决方案，实现最佳的RAS运行。带外射电天文运行遇到的另一问题，是动态频谱接入（DSA）技术使得系统能在空频谱（白色空间）中操作。认知无线电设备预期能够以新的频谱共用形式不断填充频谱。当然，RAS宽带运行有赖于认知无线电装置采用的相同DSA原理。

#### 8.2 RFI源的特征及其影响

对利用射电天文望远镜所获数据的实际干扰影响取决于多种因素，首先是采用的射电天文望远镜类型。单天线望远镜最为易受干扰，因为它们几乎不具有对接收的RFI进行方向分辨的能力，从而导致天文和RFI信号相干叠加。与纳入干扰阵的望远镜RFI灵敏度相比，其中RFI不相干地部分进入系统。在这些阵列构型中的扩展基线，发挥了排除RFI的空间滤波器的作用。每个采用“条纹驻留”技术的干扰仪系统，都具有抵御RFI的基线依赖能力，基线越长这种效应越显著。然而，阵列当中每个观测站的校准工作，依然受到其当地RFI的影响。

第二个因素取决于观测类型。虽然连续谱观测由于干扰会牺牲观测时频图中的部分时序或频段，而对于谱线观测而言，每当RFI的频率和带宽直接影响天文信号时，频谱线观测都会受损。

第三，对数据的影响取决于RFI的类型。RFI是否具有时变性（脉冲式）、窄带还是宽带，以及/或者是否为RFI模式的重叠？与人口密度和当地社区富裕程度相对应的地面网络直接（和间接）传输，可提供连续的信号背景。卫星和航空业务可能同时生成稳定和瞬时的RFI成分。与航空航道相对的天文台位置，保证存在直接发射或机场雷达等地面信号的反射。尽管具有破坏性的主波束耦合可能源自卫星或航空业务，但多数RFI产生于与有源业务的旁瓣耦合，发生在94 GHz的Cloudsat卫星的情况便是例证。除了外部RFI以外，天文台观测台址的计算和电子设备还可能产生不必要的RFI：这些来源是可以确定的，应当予以充分屏蔽。

第四，RFI的时变性尤其会对时间要求严格的天文观测造成影响。在暂现和脉冲星研究期间出现的可变和不可重复RFI，将会破坏独一无二不可重复的关键观测，并可能对脉冲时序和时间要求严格的数据校准造成影响。

最后，由于新的业务应用得到推广而其它应用遭到淘汰，RFI环境近年发生了急剧变化。用于广播和通信的宽带扩频应用以及无照设备的采用，以较低功率的更宽信号替换了以往的峰值高功率信号，从而生成了不易于从RAS数据中清除的信号。频谱使用和动态频谱接入的加剧，将逐渐改变RFI环境的特性，并更加需要射电天文界调整措施，以减少RFI对其数据的影响。

### 8.3 RFI缓解方法 – 分层次缓解

对数据采集过程的不同阶段可采用多种RFI缓解方法。第一也是最有力的一种方法，是通过改变本地和区域的RFI环境，在进入接收机前对入射的RFI信号进行控制。作为第二个层次，可能结合数据采集后端，对接收机系统本身采用预测方法。第三个层次，可以在相关前，采用数字删除和RFI消除方法。随着软件（SW）相关的出现，这些数字方法也可被纳入相关程序中。可能存在的第四层次，会在相关和数据积分或数据缓冲后采用数字方法。最后，第五层次缓解，包括为消除已知和未知RFI源影响而对采集的天文数据所做的处理（删除与标记）。

所有这些方法的效果都取决于INR，即RFI的相对强度或系统噪声离散与RFI变化的比值。多数方法只有RFI在数据中清晰可辨时才有效，而且只能将其影响降到瞬时噪声电平。SNR（处理后）与SNR（处理前）比给出RFI抑制或削减后的处理增益，代表了这些方法的优点。

所有方法的效果质量都取决于必要的抑制程度，因为每一个缓解层次都有自己的局限性。相对于RFI的天文信号占用带宽在此发挥着一定作用。必须在评估缓解效果时，考虑到重要信号（SOI）损失的情况，因为它因方法的不同而有差异。多层次不同方法无疑具有积累效应，因为每个随后的缓解层次都是在所有此前处理的剩余RFI信号上运行的。此外，每个应用方法都可能带来些许有害因素，如数据损失可逐步降低数据质量。作为衡量（处理后）干扰缓解处理造成数据损失的测量方法，对数据的总体破坏是通过SNR（处理后）与SNR（无RFI）之比量化的。

## 8.4 积极主动方法 – 改变RFI环境

积极与有源业务用户开展协调并诉诸国家和国际监管，可减少RFI在射电天文站的出现，并降低其对观测的影响。在国家、区域和国际层面改善和强化监管框架，可发挥保护频谱无源业务使用的重要作用：支持这一方法的相关内容见本手册、ITU-R建议书、尤其是射电天文（RA）系列、RA系列的ITU-R报告及CRAF手册。利用协调区和无线电宁静区，可以改变地面干扰源在望远镜处形成的RFI环境。许多天文台都有本地和国家规定，禁止在天文台附近（2-6公里以内）安装发射机。同时，也为若干观测站点建立了大范围的协调和安静区，如美国西弗吉尼亚绿岸天文台附近的国家无线电宁静区、波多黎各Arecibo天文台附近的波多黎各协调区或在智利阿塔卡马沙漠ALMA天文台附近建立的协调区。对于新建的望远镜，如两个用于平方公里阵的未来台址，已受到前瞻性的国家监管，以便在这些站点开展最为灵敏的观测活动。

由于最好在实施前解决潜在的RFI问题，有必要通过随时了解当地许可证发放方面的变化和确认频谱使用趋势，来确定可能影响观测站部分重要无线电频谱的在用发射机和未来新发射机。频谱监测可能被用于趋势的确定，发现“频谱邻居”并做到“知己知彼”。频谱监测还是一个确定无源频段干扰所致数据损失比例的工具。

根据以往经验，天文台本身往往也是RFI的重要来源。安装在建筑物内的计算机硬件和电子设施可能产生谐波和宽带发射，并进入望远镜的探测系统。发现和消除这些来源是每个天文台的重点工作。可容纳电子和计算设备的RFI密封柜和Faraday笼，以及减少人类活动（遥控室）和限制本地计算机使用，都有助于使天文台保持“无线电宁静”。对于开展最为灵敏观测的天文台而言，这一待办工作表是必要的准备工作之一。

## 8.5 预检测和后检测

在频率域删除RFI的标准做法，是在接收机中安装带通或高/低通滤波器，但这会引起插入损耗，并大幅提高频段边缘附近频率的系统温度。超导滤波器技术可大幅度减少这类滤波器的影响。RAS频段的滤波能够防止带外强信号造成的破坏。通常有必要在接收机通带的重要频率上出现RFI时开展谱线观测，但滤波还会导致连续谱观测的数据损失。

消除或终止数据采集程序，如停止相关器中的数据叠加，可用于在时间域的删除。这一方法被成功用于脉冲和周期信号。Arecibo天文台应用的机场雷达消除系统，适用于在伴随从地面和多路径散射雷达人为效应的时间窗口期间，阻止相关器在与雷达脉冲时段同步进行相关处理。当这种RFI在划分的RAS频段中出现时，损失的数据被视为损失的观测时间。

我们已对高线性、高性能的接收机设计开展了大量研究，使它们不至受到严酷RFI环境的影响。在接收机系统足够线性而不至出现混叠、互调产品和重叠时，有可能进行宽带观测。

## 8.6 预相关

### 8.6.1 基于天线的数字处理

实时数字处理，可以作为单天线射电望远镜（RTs），以及用于阵列设备的观测站处理和/或波束成形过程的一部分加以实施。这一经济高效的方法很适用于脉冲式（瞬时）RFI，并需要快速的数据采样以及每个观测站计算周期的可用性。可通过RFI的瞬时性确定数据损失量。实时和基于IF的标记和删除，通过只解决受RFI影响的时间和频段问题，最大限度地减少标记/删除方法引起的数据损失；但这不应对相邻的时间和频率间隔造成附带损害。它与后相关处理的区别是，后相关因为将积分数据采样用于基线和天线标记及相关而更为有效。

当在采样数据中的RFI很强并可辨识，而且RFI的频谱占用相对低的时候，可采用时间和频率域的阈值处理。这种处理方法最初被用于清除Ratan 600望远镜中的RFI，并自那时起屡屡得到采用。最近又成功应用于Westerbork综合口径射电望远镜（WSRT），对来自十四个望远镜的20 MHz双偏振数据进行了实时处理。这一阈值处理法还被用于周期折叠前的脉冲星数据。

子空间滤波法可在数据的RFI功率成分中寻求具体特征，以便发现和清除该成分。寻求数据内部的循环平稳性是一次极为成功的应用，非常适用于数字调制的RFI信号。

另一种形式的子空间删除利用了信号的概率分布分析。由于受到其较高阶矩的影响，RFI的作用是将功率谱转变为偏心（卡方）分布，因此可将它从数据中清除。一个类似的方法是利用峰态（功率频谱的第四阶矩）确定和清除RFI成分。这已被用于单天线太阳观测和软件相关环境中（后）的相关处理。中值滤波和对多馈源系统中值特性的利用，也是对数据统计特性的利用，适用于谱线数据的实时RFI缓解。

包括清除数据采样的预相关缓解方法可使数据增益校准出现变化。这需要利用精确记录确定对数据的影响和相关的损失。以拟合基线取代频率（或时间）域中的受影响数据，只能对受影响通道中的均方根造成影响。

### 8.6.2 自适应（时间的）噪声抑制

自适应噪声消除（ANC）通常用于通信和军事技术。时间自适应滤波的基本原理，是对输入数据进行快速傅立叶变换（FFT），对频点进行自适应操作，然后通过逆向FFT返回频率域。这种基于维纳滤波的方法在RFI主导系统噪声的情况下，适用于具有大量INR的干扰信号。对干扰信号的抑制大约相当于瞬时INR。自适应滤波器在脉冲星和连续谱研究等频谱信息不重要的情况下有效。这一方法还被有效地用于单天线（见下节）的多馈源或焦平面阵。另一种自适应滤波法是在比较观测源信号加干扰信号和离开观测源信号加干扰源信号的基础上，利用RFI本身的备份从信号数据通道中减去参考数据通道。在一些现有望远镜系统中，RFI备份是从指向干扰源的辅助参考天线中提取的。然而，每个单独的RFI源都需要属于自己的天线。



对已知RFI信号及其从数据删除的参数估算，已通过其已知的调制特性成功用于Glonass C/A卫星传输：在未求助辅助天线的情况下，实现了对超过20 dB信号的抑制。最近实施的自适应滤波技术，旨在从Arecibo天文台的单一GPS卫星中清除L3传输信号。

### 8.6.3 空间滤波和零点控制

每个多天线阵列都在其波束方向图中具有旁瓣和零点，可用于降低来自当地RFI的信号。通常，采用波束成形算法的自适应系统需要高INR，并仅限于在观测期间跟踪的少数RFI目标。RFI源也需要在观测期间保持稳定和可预测性。少数RFI源波束成形模式的空间滤波，通常不会恶化主波束生成的图像。

利用雷达和通信系统多传感器的智能天线技术，被用于到达方向的确定和波束成形算法的实现。同样，能够直观确定RFI来源（如低频阵（LOFAR））和默奇森宽视场阵（MWA）的新一代多传感器望远镜，可以优化波束成形程序，将这些不同RFI源进行实时、自适应消零和空间滤波。在实际应用中，利用一百个LOFAR天线生成两个分离的波束，并在地平线上15度的位置设置了永久归零。尽管人们在应对多卫星系统时，处理复杂度急剧增加，精心校准的多传感器相位阵提供了通过控制零点跟踪卫星的可能性，同时保留了对目标场的高增益波束。

对于具有相对长基线的稀疏阵列而言，可首先进行相关，然后进行波束合成。假设RFI源被确定，可通过对数据流短间隔的处理，并在图像处理期间采用复合权重对它们进行清除。后相关空间滤波的计算机模拟显示，利用RFI校准波束进行洁化是有效的。

焦平面阵（FPA）系统和多波束接收机可为空间滤波提供新机会，因为每个组成部分的馈源，都具有附带共同RFI信号的独立天空信号。此外，多波束系统中的某一馈源总可以用作参考天线。

## 8.7 相关阶段

作为相关阶段的一部分，通常在从采样时间到长达数秒范围内的时间间隔中，数字数据进行积分，从而极大增加了INR。因此，无法实时处理的持续微弱RFI，以及较早缓解工作后残余的弱（频谱）RFI，有可能在此阶段进行处理。此外，可通过这一积分降低可变RFI信号大峰值的强度。就阵列设备而言，天体延迟（条纹）跟踪引发的空间滤波，也可以降低互相关数据中的地面RFI强度。

在数据采集进程的这一阶段，可将反符合协议纳入其中，以确定RFI的成分及数字缓解处理和对参考天线数据的使用。新一代软件相关器可在FX（相乘前的傅立叶变换）相关和堆叠协议前后，对（基于峰态的标记）应用进行积分。LOFAR在数据处理的不同阶段采取了缓解措施。就单天线设备而言，（多）单一频段的相关处理，可同时包括阈值处理或统计数据方法，以及利用参考天线进行的噪声抑制。

在SW相关期间，从参考天线应用数字处理与输入，相当于上述基带预相关处理。此外，其在常规（现有）硬件后端的实施需要同时增加专用硬软件。

## 8.8 后相关处理（成像前或期间）

传统的后相关处理包括标记与删除，这项工作非常耗时，通常是手工作业。由于这项工作是在积分和相关数据上进行的，标记引起的数据损失量很大，如果需要标记较多的时段、整条基线和/或全部天线，则数据损失更大。它不同于基于天线的IF标记或删除，由于数据子集标记少，因而整体数据损失比例较小。

（积分）相关数据的在线或离线处理，有可能包括自动的标记和删除，因为可以通过进行更复杂的统计数据或子空间处理（见第8.6.1款），在不出现大量相关数据损失的情况下清除RFI成分。

毋庸置疑，在后相关阶段部署的参考天线，旨在利用现有的闭合关系清除明确来源的信号。

阵列设备在观测期间采用条纹驻留和延迟补偿技术，将观测期间中心观测位置的条纹率保持为零。其结果是，数据中的稳定（地面）和卫星RFI成分，由于生成条纹的条纹驻留率比天体更快，从而进行自我区分。这一不同（相对）的运动在不引起数据损失的情况下，同时从相关数据和图像平面，离线确认和消除稳定的RFI源。最先在GMRT采用的代码现已纳入AIPS。

## 8.9 望远镜的应用 – 战略

射电天文天文台的数据采集程序在不断变化，以应对日新月异的技术环境。目前，信号的模拟数字转换尽可能早地出现在数字处理方案中，使数字处理能够在数据链的大部分过程中进行。性能的提高可实现对较大带宽数据的处理，同时提高时间分辨率和频率（< kHz）分辨率。

许多目前在用的后端，无法在不进行（大幅度）硬件修改的情况下，在数据处理链的早期采取缓解措施。相比之下，新一代后端和软件相关有助于在不同处理阶段实施这一方案。

由于每个缓解方法都需要明确INR操作门限，清除大部分RFI需要分层的应用方法，以利用数据的渐进积分及其不断增加的INR。当RFI低于本底噪声时，虽然没有能够清除它的方法，随后的缓解措施能够清除经缓解的RFI残余，以及仅在积分后出现的弱RFI。

阵列设备辅助天线的实施，取决于（主要）在相关器一端将其输出纳入处理系统的可能性。定向参考天线一般解决特定RFI源的问题，而在复杂环境中有效性较低。

RFI缓解进程中的人为干预，在实际操作中发挥着重要作用。因此，与限制使用已知和固定发射机的参考天线和/或空间滤波相比，适应多种RFI特性的实时在线处理方法更受欢迎。在可用某种人工智能控制器指导和决定RFI缓解方案之前，这种情况很可能出现。

干涉仪较少受到RFI的影响。条纹驻留和延时补偿使得其较长基线实现干扰的自然清除。然而，强RFI依然会增加系统噪声，并仍会对一个观测站的校准和复可见度造成影响。VLBI观测站和分布式传感器网络可针对每一个观测站开展缓解工作，减少局部RFI对整个系统的影响。

为正确校准系统，所有受影响数据都需要精准记录，以便为其后的自校准、洁化和成像程序获得适当权重。

未来的缓解落实工作，需要考虑到比目前流行的简单（峰值或其他）RFI标记和删除算法更为复杂的方法。采用高阶矩的统计方法，开辟了在不影响其余数据的情况下清除RFI成分的可能性，而且已有可减少数据丢失的部分数据恢复方法。扩频系统的自适应滤波，可能会在其数字键控方案为人们所了解时成为可能。

## 8.10 结论

在线和离线数据处理，已同时成功用于射电天文观测RFI环境的缓解工作。虽然成功缓解的选择方案种类与日俱增，但方法的选择在很大程度上取决于RFI的特性、射电望远镜的类型和观测类型。具体而言，在线实时数据处理是可变RFI环境中的首选，而利用参考天线和空间滤波的特别措施则是对于已知和固定RFI源的首选。除此之外，缓解过程的无人参与，会使自动在线处理成为一个有吸引力的选择。

缓解天文数据中的RFI，不存在普遍可行的方法。对RFI的有效抑制，取决于INR及其时间和频谱特性。并非总能对采用的方法进行定量评估，因为缓解算法通常为非线性程序，可能对噪声特性和校准产生影响。具体方法造成的总体数据损失，是指导方法选择评估的因素。

可能需要采用多种方式应对更为普遍的RFI环境。然而，在各个缓解步骤清除RFI会改变数据特性，而且RFI缓解的累积效应并非线性，而是实际因素之和。

计算硬件和数据数字化的成本正在快速下跌，从而为RFI缓解算法的实施和自动化提供了机会。这不仅增加了带宽，还提高了时间分辨率和天文观测的频谱分辨率。然而由于数据量逐步增大，或将有必要采用自动化数据压缩管道和相关的自动缓解算法。

新的电信和广播技术已经上市，许多以无照移动设备的形式出现。由于其位置不断变化而无法控制，它们将很快对观测工作造成影响。需要通过算法研究消除天文数据中的这类信号。扩频（超宽带）设备尤其会给无源业务带来麻烦，因为它们的数字调制方案跨越了频谱划分的界限。根据目前的估计，每个人使用的发射设备数量必将大幅度增长，而且其中许多设备将依赖于动态频谱接入。

射电天文的探索空间，在很大程度上取决于观测系统的技术特性和RFI环境等限制因素。虽然新一代望远镜尽可能设置在电波环境最为宁静的台址，而现有设施必须适应当地条件。为避免RFI成为现有设施的限制因素，需将频谱管理确定为高度优先的工作。

## 第九章

### 无线电宁静区

#### 9.1 引言

本章探讨无线电宁静区（RQZ）的定义，以及发展和维护完善该宁静区涉及的主要问题。ITU-R RA.2259号报告 – 无线电宁静区的特性 – 更完整地阐述这一问题并给出诸多示例。

##### 9.1.1 无线电宁静区的定义及一般要求

由于从地球表面进行的射电天文观测，在本质上对有意或无意的人为干扰非常敏感，因此，一些主管部门已设立了无线电宁静区。在此，RQZ的定义为，为减少或避免对射电天文望远镜产生干扰的特定目的，任何被认可的地理区域，其范围内的常规频谱管理程序得到修改，以便实现射电天文观测的最佳环境。

可采用若干不同程序，并将其用于某些具体频段、具体时间段和/或不同等级的干扰源，同时亦可采用技术、地理和/或监管措施。因此，RQZ的不同定义和管理方法将根据射电天文望远镜的特定要求，用于不同望远镜。

RQZ中实施的多数限制仅限于固定地面发射机，不涉及空中或卫星搭载发射机的传输，其原因在于，源自移动，特别是航空移动设备的干扰通常历时短暂，这种干扰易于识别，且在干扰源得到识别时往往干扰本身已经过去。没有任何RQZ限制卫星传输。ITU-R RA.2259号报告介绍世界范围内使用的、各种各样的RQZ监控手段以及相关示例。

值得强调的是，RQZ并不意味着完全不存在无线电发射，与一系列人造设备共存始终是必要的。可用于RQZ的选择方案，包括向其他用户做出通知并开展有关缓解干扰的谈判。有鉴于此，RQZ事实上是一个缓冲区，有助于通过有效的缓解策略和对射频发射机的管理，实施旨在保护射电天文观测免受无线电有害干扰的机制。

##### 9.1.2 监管的作用

本地无线电干扰由相关国家政府监管部门通过监管监控措施进行。国家监管工作的一个核心部分是制定明确不同业务频段划分的无线电频谱规划，其中包括一些划分给射电天文的频段。这些国家频谱规划在必要程度上以国际电联《无线电规则》为基础，以避免不同国家之间的有害干扰。

在RQZ方面，国家监管机构可选择落实ITU-R RA.2259号报告所述的多种不同监控手段，以协助解决由于不遵守规则而出现的有害干扰问题。

在不同国家主管部门之间出现干扰时，可借助国际电联规定的相关程序解决问题，但这可能与RQZ无关。

## 9.2 发展RQZ时应做出的考虑

### 9.2.1 地理方面

除将射电天文观测站尽可能设置于远离密集居住区外，将这些观测站设置于具有某种程度自然地貌屏蔽的区域也非常有益。一些天文台将其射电天文望远镜置于主要为针叶树的森林中，因而非常受益。针叶树针叶中的水分提供了额外的、地平RFI源的干扰保护，特别在若干GHz以上的频率上。置于山顶的、拥有很长视距（LoS）的天文台为RQZ的协调带来了特别挑战。

RQZ的一种模式是完全不允许在宁静区设置发射机（可能在与射电天文望远镜运行相关的具体频率范围内）。另一种模式是，只要射电天文台站接收到的信号电平不超出具体规定的干扰门限值，则允许存在发射机（也在特定频率范围内）。其它宁静区可能是上述两种模式的结合体，“内环”中不允许存在发射机，“外环”中的任何发射机都必须满足具体规定的干扰标准。有些无线电宁静区在整个无线电频谱范围内运行。

射电天文遇到的一些最严重干扰源自航空器，因此，应探讨在天文台之上，建立国家禁飞区的可能性。这一做法虽然不能消除航空干扰源，但却可以减少这类干扰，因为航空器在巡航高度上的无线电地平线可接近400公里。

### 9.2.2 频率

RQZ运行的频率范围，必须与该区内得到保护的天文设备的运行明确相关。只需要监控对当前及计划中天文设备运行予以保护的频率。尽管如此，由于现代射电接收机的带宽很宽，且人们渴望在不断膨胀的宇宙中，在更低频率上跟踪频谱信号的多普勒漂移，因此，有必要确定很宽频率范围。一个RQZ可能覆盖诸多其它无线电通信系统使用的频率范围。

### 9.2.3 RFI对RAS观测的影响

RFI对射电天文观测的影响大相径庭，最简单的影响是提高了可得到缓解的噪声电平，严重的则可能毁坏射电望远镜的接收机。为使RAS实现正常运行，RFI的强度永远不能大到使接收机放大器呈非线性状态。使射电天文观测依然可以进行的低电平RFI，仍需得到某种形式的缓解。RQZ的最大优势在于它固有的RFI电平很低，不仅可以保护射电天文接收机，而且有助于进行最简单和最方便的缓解。第6章及第8章更为详尽地探讨了RFI对RAS观测的影响问题。

## 9.3 电磁环境

射电天文观测的干扰源多种多样，每一种都可能需要采取不同类型的监控手段。

多数情况下，由单一发射机产生的个别干扰问题，可通过现有频谱管理程序予以解决。然而，随着发射有意或无意信号的移动通信和其它电子设备的不断部署，本底噪声随设备数量的增加而提高。系统性测量本底噪声及其随时间发生的变化，对于将问题消灭在萌芽之中至关重要，因为问题一旦显现，则会对数据和观测时间带来巨大损失。

### 9.3.1 有意辐射体

有意辐射体系指为进行通信或传感而产生射频发射的系统和设备，即，其射频能量的传输是其操作固有的。通常，这意味着所涉频段、带宽、发射功率电平、调制方案以及其它操作参数是为人们熟知的，或可得到较精确的估算。有意辐射体相对于覆盖较宽频段的无意辐射体和射电天文接收机而言，通常在较窄频段内操作。

ITU-R已确定了为数众多的无线电业务，包括地面系统（航空移动、航空无线电导航、业余、广播、固定、陆地移动、水上移动、水上无线电导航、气象辅助、无线电定位、无线电导航、标准频率和时间）和卫星系统（地球探测卫星、固定卫星、星间卫星、气象卫星、移动卫星、空间操作和空间研究）。

得到许可的无线电设备，为国家监管机构已授权进行操作的设备。这些设备可单独得到许可 – 在这种情况下，监管机构了解其位置（或操作区）、频率、功率、带宽、调制、天线高度和辐射方向图以及台站的其它参数。这有助于对无线电宁静区进行某种形式的监控（禁止或限制某种发射机（如通过频段或功率电平手段））。许多主管部门还出台了频谱许可选择方案，通过这些方案，用户有权使用特定地理区的特定频段，可能仅在特定时间段内使用。用户可根据频谱许可证的要求，在明确规定的频率上及所需的地理空间部署无线电发射机。与上述得到个别许可的设备相比，这使无线电宁静区的监控更为困难，除非频谱许可证规定的条件专门包括了有关RQZ的限制。

群业务许可（或非许可）设备，是用户和监管部门之间无需签订具体许可协议而进行操作的设备。这些设备限于使用得到明确的频段，且国家法规对这些设备的功率、带宽和其它参数做出限制。通常这些设备为低功率和移动设备，具体示例包括无绳电话、Wi-Fi、射频识别标签和汽车无钥匙启动装置。这些装置通常为消费级设备或由业界大规模部署。群许可发射机的RQZ监控较许可装置更为困难，因为国家监管机构不了解这些设备的操作地点以及其它参数。

如前所述，航空无线电发射机也可能对射电天文接收机造成干扰。

### 9.3.2 无意辐射体

无意辐射体产生的射频噪声是其主要功能的副产品。通常而言，这类辐射体的功率谱密度低于有意辐射体，但频段更宽。这类辐射体辐射的射频能量在功率电平、频率或统计特性方面不具有明显特点，但通常为背景噪声与高斯统计的结合体，且脉冲噪声电平更高，但概率更低。

工业界和消费者使用的设备可能会产生无线电干扰。虽然是个别现象，但所涉单个设备可能产生不超过已确立的干扰电平标准，其总辐射量可能强到足以为射电天文观测带来干扰的程度。此类干扰很可能具有宽带且类似噪声的频谱，在该频谱上叠加着窄带且随时间变化的信号。

汽车点火系统以及其它电动装置（风扇、雨刷、暖风等）也产生射频噪声。通常，该噪声随频率的提高而减弱，因此，约1 GHz以下的频段受影响最为严重。许多汽车都拥有电脑发动机管理系统，因而带来更多干扰源。

电力线火花可能产生无线电干扰，且对于约70 kV及以上电压电力线而言，电晕放电也会产生无线电干扰。最近，人们已在考虑将配电系统作为提供电信业务的媒介加以使用。

电力线通信（PLT）系统使用主要配电线上200 MHz以下的射频信号。这类电力线上的PLT信号可能对无线电通信业务造成干扰，包括射电天文业务。由于电离层对高频传播的影响以及PLT辐射的累积，部署PLT调制解调器（即便远离射电天文台）也可能对射电天文观测造成有害干扰。

工业、科学和医疗（ISM）设备为除通信以外的使用射频能量的设备，具体示例包括微波炉、医用透热法和RF电焊机。在RQZ方面，这些设备类似于群许可设备，且常常共用相同频段。

### 9.3.3 干扰信号的传播

在评估上述可能对射电天文台址产生干扰的干扰源时，有必要对RFI信号的传播做出预测。

对无线电系统设计的传播预测，与干扰分析传播预测予以区分至关重要。设计系统时，必须考虑到发射机与接收机路径之间的最大（或接近最大）损耗，以确保可接收到足够的功率电平。另一方面，在进行干扰分析时，必须计算发射机与受干扰接收机之间路径上的最小（或接近最小）损耗，以评估可能接收到的最大功率电平。在应用ITU-R 第3研究组建议书所述或其它传播预测方法时，应注意到这一区分。

影响干扰源对射电天文望远镜接收机干扰电平的主要传播机制，为自由空间损耗、地形或其它障碍物绕射、大气水汽和/或降水衰减、大气波管以及流星和上空飞行航空器的散射或反射。

## 9.4 实现RQZ的方法

可采用多种方法实现RQZ，且可方便地将这些方法分类为接收端方法和发射端方法。其中一些方法可合并使用，具体方法的选择在很大程度上取决于频率、地点、所需观测类型、目前土地的使用以及其他因素。

### 9.4.1 接收端方法

为营造可进行射电天文观测的最佳射频环境，射电天文台充分利用地理因素及其对无线电信号传播的影响。审慎选择这些因素，可制定出满足RQZ要求的相关方法。

无线电频率传播的性质为，干扰功率随距发射机距离的增加而减弱，因此，最基本的方式是选择远离人口和交通密集中心的地理区域。对于新的主要设施而言这是非常理想的，但

并非对所有望远镜设施都切实可行。山顶台址因为地处偏远而非常有益，同时其大气传播的路径更短，在高频频率上，这一点尤其具有优势。

应在可行情况下利用台址的自然屏蔽条件。与上述山顶台址相反，本方法首选由丘陵或山脉环绕而成的峡谷，且特别被选择用于低频观测。

然而，在干扰源与RQZ之间不存在直接LoS并不能保证绝对宁静，因为信号通过地形绕射路径或通过大型建筑物的反射路径到达。特别在低频频率（低于约1 GHz）上，台址屏蔽可带来极大优势。应尽可能利用对本地地形的相关详细信息，对所涉频率范围内的绕射效应做出评估。

然而，在地形本身即可提供足够保护的情况下，仅仅建设一个大型反射建筑物（如风电发电机）在附近山顶上，即可使其效果全无。

#### 9.4.2 发射端方法 – 管理 RQZ

管理RQZ的一项主要内容是监控区内可能产生干扰信号的辐射体，同时确保向RQZ区内为数不多的人口提供电信和其它服务。在确定该区时，既应考虑到当时用于此目的设备的要求，也应考虑到在该区存在时期内，可能增加哪些功能和设备。

此外，还需考虑到在十几年中，管理RQZ所需的适当行政管理程序（处理有关社区和工业开发的申请以及土地管理所涉的其它自然程序）。与此同时，在确定该区时，还不应忘记可能需要的全新设备和观测功能。

##### 9.4.2.1 立法和监管监控

可通过立法为监控RQZ区内的RFI源提供监管框架，其中包括管理许可和非许可（或群许可）无线电发射机以及其它可能造成干扰的活动。

许多RQZ都确定有关围绕台址的限制区和通知区。在限制区内，无线电设备被限制使用，这可能限于特定频段内的发射机。可通过监管机构的许可工作来对限制区进行管理。

通知区为在该区内，任何计划（在特定频段内）使用的无线电设施都必须通知监管机构或望远镜运行机构。此后，则开始进入谈判阶段，在此过程中，望远镜运行机构对拟建的无线电发射机对射电天文观测产生的影响做出评估，并努力找到适合双方的解决办法。通常而言，通知区远远大于限制区。

一般情况下，这些规则仅适用于得到许可的无线电设备，因此，在监控非许可无线电设备或无意辐射体方面价值有限。然而，无意辐射体通常不属于国家频谱监管规则的管理范畴，因此可以通过更多的本地立法予以监控。

至关重要的是，通知区和限制区的使用是射电天文台生命周期内，对RQZ进行持续不断、协作式和动态管理的过程。它还意味着，实施RQZ应提供尽可能多的选择方案（如在频段方面），以便在以后扩展射电望远镜的能力。



还可在有限地理区域内将监管监控予以扩大，以涵盖非许可无线电设备或无意辐射体。由于这类设备通常为低功率设备，因此，地理限制往往作用不大。在紧挨望远镜台址的地方，可进行实际的出入监控，以确保任何发射设备均不能进入台址。

国家监管机构或其他相关政府机构还可通过实施立法监控RQZ区域内特定类型的活动，如重工业或制造业活动。

以下表1提供若干不同国家的RQZ以及使用的监控或监管方法。许多情况下，该表援引的方法适用于与得到保护的设施运行相关的有限频率范围。

表 9.1  
不同国家RQZ的监控

RQZ/国家	许可无线电发射机的监控	群许可无线电设备的监控	航空器监控	无意辐射体的监控
LMT/墨西哥	20 公里半径 – 无其它无线电通信			
NRQZ/美国	34 000 平方公里区 – 要求固定发射机进行协调			监控10英里内的电子设备
ALMA/智利	30公里内无发射机；120公里内进行协调			
Arecibo/哥斯达黎加	4公里内限制；与哥斯达黎加和相邻岛屿进行协调	4公里限制	望远镜上空设禁飞区	4公里内禁止
Various/澳大利亚	协调通知区高达250公里		望远镜上空设禁飞区	
MRO/澳大利亚	频段规划– 70公里内RAS为主要业务；协调区达260公里	群许可 – 70公里范围内不允许产生干扰	站址上空设禁飞区	10公里范围内 RAS 使用的电子设备优先
IRAM/西班牙	5公里半径范围内限制发射机；协调区达10公里半径			与工业、铁路、高压电力线的最小间隔距离为1公里
Itapetinga/巴西	4 公里直径区内无新的城市活动	4 公里直径区内无新的城市活动		4 公里直径区内无新的城市活动
AGAA/南非	140平方公里范围内无发射，基本业务仅在123 408平方公里以下区内		140平方公里的核心区的监控高度达到18 500 米	
Pushchino/俄罗斯联邦	2 公里直径范围内无新的城市活动	5公里区内监控（Pushchino 镇）		控制所涉干扰的电平
Dominion RAO/加拿大	200 公里范围内进行严格许可监控	视距范围内无任何物体，4公里范围内限制（以二者更大者为准）	存在过禁飞区，但现已过期	在视距范围内及4公里限制区内无新的城市活动（以二者更大者为准）
FAST/中国	5公里范围内无发射机；75公里半径内进行协调			

### 9.4.2.2 替代技术和网络设计

对于产生有害干扰电平的技术，国家监管部门或望远镜运行机构可选择使用替代技术。例如，通过光缆提供有线电视是合适的、替代广播的方式。还可在频段方面更加方便的另一个移动无线网络，取代既定的移动无线网络。

## 9.5 建立RQZ的影响

### 9.5.1 RQZ的维护

建立RQZ之后，还需要做出相当努力对其进行维护，射电天文设施运行机构几乎承担了全部责任。

必须得到支持的一项活动是无线电环境的常规监测，包括将在台址安装的所有设备。通常通过独立的监测站和与射电天文望远镜本身分离的测试设施来完成上述工作。

另一项活动是确定出现在望远镜数据中的RFI源，但这些干扰源可能不够强，无法通过监测站发现。对这些情况做出分析极为困难，因为望远镜的带宽、多普勒跟踪、积分时间和天线方向图可能都不适合于识别干扰源的确切频率、时间变化或地点。此外，一些干扰只有在观测进行过后的很长时间才变得明显（当首次可以充分处理完整的数据集合时）。无论如何，一旦明确RFI，则必须采取行动，缓解或消除RFI源。

多数天文台在其周围建立RFI缓冲区，且随着距射电天文设备距离的缩短，对可能产生RFI的设备，会不断加强限制。无线电宁静区的工作人员必须教育相关工作人员和访客，并随时准备执行本地法规。甚至在建立天文台之前，就应做出有关RFI区方面的考虑。

作为无线电宁静区的工作人员，还需解决由超出天文台周围环境的RFI源产生的问题。按照相关国家规定，要求未经授权的发射机获得操作许可，可能是最易于处理的情况。RQZ管理中最困难的情况，为不属于天文台财产的非许可装置产生的RFI。在现有宁静区内处理这种情况日益棘手，目前尚不存在显而易见的解决方案。

大区域范围RQZ的一项沉重负担，是处理宁静区内新发射机的许可申请。有些宁静区可能易于管理，如，仅简单地禁止宁静区内存在发射机。其它一些宁静区可能会确立有关有害干扰的门限值，在这种情况下，必须对有关许可的申请做出认真分析，以了解发射信号是否会超出天文台已确立的干扰门限值。

最后，天文台不应低估对公众进行教育和宣传的必要性，因为公众需要了解建立无线电宁静区的必要性，同时应使频谱使用者认识到无线电宁静区规则所规定的义务。

### 9.5.2 长期考虑

在设计RQZ时，往往已考虑到了特定望远镜的需求。随后，望远镜最通常的更新，即为通过设备升级，增加在更高频率上的使用。最近新出现的一种趋势是，将多个望远镜共同设置于可充分满足其目标的台址，以使这些望远镜共享已有基础设施和法律法规的经济效益，并共同使用供电、通信和公路。

除上述之外，还可扩大台址有待保护设备的频率范围，因此，可取的做法是在设计RQZ参数时，要使其尽可能宽泛，以满足相关环境要求。

一旦对RQZ达成共识，还需要较长时间将其付诸实施。这意味着，在设计RQZ时，需考虑到该区的经济影响以及该区可能对受影响区域未来人口分布和发展产生的影响。最后，必须预期到，技术发展将持续进行，从而将产生新的创新，进而导致 RQZ 周围的 EMC 环境发生变化。该趋势虽然无法预测，但却再一次表明，有必要设计出尽可能宽泛和强大的 RQZ。

## 第十章

### 利用射频观测搜寻地外文明 (Seti)

#### 10.1 引言

了解我们在宇宙当中所处地位的根本问题在于，能否确认地球是支持有智生命的唯一星球。如果地球的有智生命确是唯一，这一定是宇宙发生的奇迹或演进的独特结果。另一方面，如果它只是生活在我们银河系中多个有智群体的一支，那么地球生命就可能是走向多样化的巨大群体的一部分，而且在发展和文明方面可能不是唯一。问题的难点在于确定地球生命是否独立存在。

部分科学家认为，生命是银河系的普遍现象，且可能发展成为具有与我们相同甚至超过我们的电信能力的高级形式。当然，即使存在地外文明使用的发射电台，如频率、调谐、极化和定位等详细情况仍不得而知。为发现来自这些电台的信号，科学家必须利用最敏感的接收设备探索宇宙，仔细而广泛地搜索射频频谱，以发现其他文明发出的信号的线索。

首个向太空发射无线电信号的方案，可追溯到特斯拉于1899年开展的工作。1939年为美国电视节目加密的特别信号传输至少发送给了一千位明星。1974年诞生了向可能存在的其他文明详细介绍地球生活的最有抱负的尝试，即从设置在波多黎各阿雷西沃的305米直径的射电望远镜进行了发射，介绍了我们的太阳系、DNA组合和我们人类。

Morrison和Cocconi [1959年]最先提出了收悉地外文明所发射频信号的可能性。Drake [1961年]利用观察约12光年以外两颗星球的25米直径的射电望远镜，首次进行了微波搜索（Ozma项目）。自那时起，多国科学家进行了99次以上有记录的搜索[2001年，Tarter]。俄国科学家在头十年中占据这个领域的主导地位。I.S. Shklovsky于1962年撰写了第一本研究SETI问题的俄文书。该书被译成多种语言，并对苏联（如今的俄罗斯）推进SETI工作产生了巨大影响。Kardashev [1963年]提出了找到比我们更为先进的社会的可能性，这个社会能够掌握无线电通信技术，并能够将产生的超过 $10^{26}$  W的输出功率用于持续发射全向宽带信号。多项调查工作已告完成[Troitsky等人，1971年]。计算机和通信技术的进步提高了敏感度，并使全面搜索成为可能。一些工作造成了无法解释的事件，在利用美国哈佛大学射电望远镜开展外星探测（META）计划的1986至1989年间记录的多个有趣信号便是例证[Sagan和Horowitz，1993年]。最近的更为敏感的重复观测[Lazio等人，2002年]提出了否认这是一种外星技术信号的论点。目前尚无令人信服的地外文明信号的证据。在这一阶段的大部分时间里，搜索的灵敏度不足，而且仅覆盖了相关频率、调制方案和方向的一小部分。

Oliver [1987年]、Bates [1988年]和Drake及Sobel [1992年]提供了有关SETI的更多背景资料。随着过去20年相对便宜的计算机和数字信号处理技术的出现，更为全面的探索得以启动。美国航天局于1992年发起了高清晰度微波调查（HRMS），动用了全球部分最大型的射电望远镜和新的敏感无线电接收设备。尽管NASA项目于1993年被取消，美国SETI研究所继续以凤凰项目的名义，开展HRMS高灵敏度“目标搜索”部分的研究。

SETI研究所和设在伯克利的加利福尼亚大学建成了艾伦望远镜阵列（ATA），重点进行持续的SETI观测。ATA的采集区相当于一个40米的反射碟。该阵列的系统噪声温度为40 K，带宽实现了0.5 GHz至11.4 GHz范围的全覆盖。它在3°视野（1 GHz）内产生的多波速能够进行全时的SETI及其他射频观测。全向操纵式ATA使整合时间超过了过去SETI检测所用的时间。计算机和数字信号处理技术的进步还能够提高SETI接收系统的内在灵敏度。

ATA还充当了规模远大于此的平方公里阵列（SKA）望远镜的原型。由大学和研究机构组成的国际联盟负责目前处于设计和原型阶段的SKA研发工作。一旦获得国际资金注入，SKA将具有比ATA高45 dB和较305米望远镜高13 dB的收集区。计划中的多数设计能够形成多个波速，使全时SETI监测成为可能。与更强大信号处理系统相结合的SKA，将支持对相当于1 000光年以外地面射频技术的搜索。

发现任何微波信号的可能性，在很大程度上取决于搜寻地点的安静射频环境。因此，这些站点应尽可能避免受到人为射频干扰。虽然现代技术能够部分区分人为信号，但面临无线电频谱越来越广泛用于多种电信服务和功能的情况，这种能力会嫌不足。随着时间推移，成功检测的概率将会相应下降。

## 10.2 SETI信号的可检测性

如果假设地外文明的信号到达地球，我们发现他们的能力取决于多种因素：

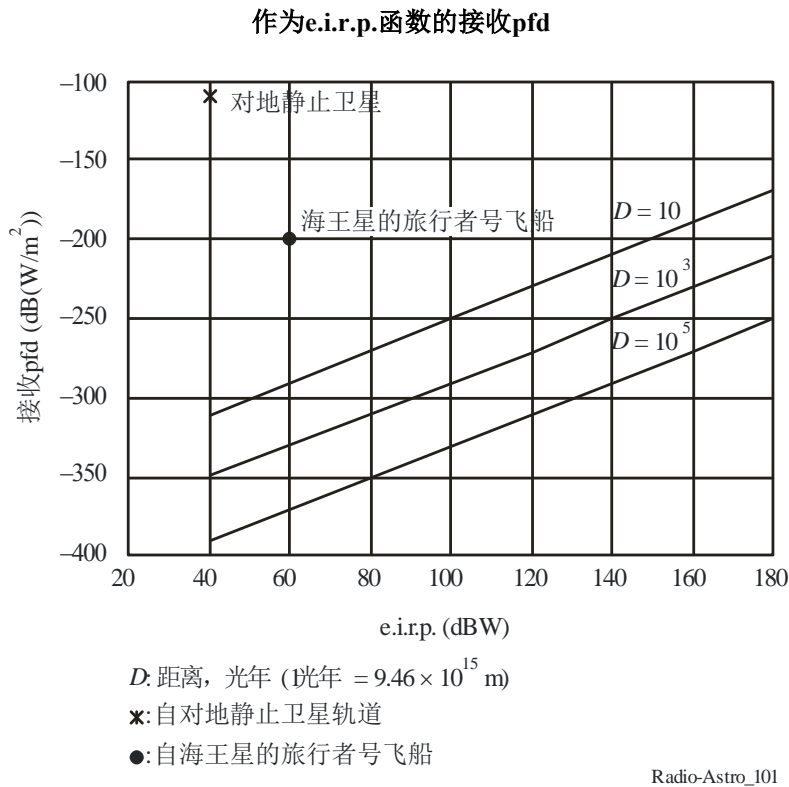
- 到达地球信号的强度；
- 搜索天线的收集区域和照射效率；
- 接收系统的灵敏度和频率灵活度；
- 天线指向信号的能力；
- 从接收机系统组件、银河系自然现象和人为干扰噪声中区分接收信号的能力。

天线指向战略和搜索整合时间及其他系统参数的选择，是SETI搜索设计的要素。开发中的灵敏系统可覆盖广泛的频率范围，能够同时对准多颗星并同时搜索天空（尤其是银道面）和进行 $2\pi$ 球面角度成像。干扰环境在很大程度上决定了这些新系统的最终性能。

## 10.3 信号强度

地表地外信号的强度取决于发射功率和传播路径特性。将被检测的信号通量密度尚不得而知。但信号传播的距离一定很长，而且地球端的强度预计很低。因此，检测会受到观测系统整体灵敏度的局限。图10.1显示了多个假设发射机距离上作为发射功率函数的地球端接收信号 $p_{fd}$ 。

图 10.1



对于设在地表的观测系统而言，大气会对某些频率的射频信号造成影响。降雨会降低 10 GHz 以上频率的灵敏度，但观测通常不具时间敏感性，而且可在天气恶劣时采用较低频率。大约 30 MHz 以下频率的接收会受电离层的局限；而约 20 GHz 以上频率的来向信号，则会因为大气中的分子而衰减（见第 3 章）。对信号的影响取决于观测站的位置。就地外，例如月球上的观测站而言，信号不会受到大气效应的影响，而且整个无线电频谱都可供使用（见第 7 章）。

### 10.4 接收系统的灵敏度

有关 SETI 搜索所用接收系统的灵敏度考虑，与前几章节有关射频观测谈及的考虑相同。对于特定天线增益而言，接收系统的灵敏度取决于系统的噪声温度、选择的瞬时带宽和个体测量的整合时间。

系统噪声温度需根据设备特性及天线接收噪声而定。而后者包括宇宙和地面大气以及地球通过天线旁瓣接收的辐射所生噪声。产生的头一种噪声取决于我们银河系、银河系以外来源（其他银河系、类星体）以及宇宙微波背景（2.7 K）的射频发射。这部分噪声的低频贡献率很大，但随着频率增加而减少。此外，主要出于 H<sub>2</sub>O 和 O<sub>2</sub> 分子的原因，大气形成的噪声在约 20 GHz 频率上显著增加。

持续信号的 $S/N$ 作为整合时间的平方根而增加。整合的实际时间受到信号持续时间和频率稳定性以及可用检测时间的局限。

来向信号频率将包括取决于发射机（传输时）和地面接收系统之间相对速度的多普勒频移。尽管只是地球随轴自转引起的昼夜变化和地球绕太阳公转产生的年度变化，这一频移随时间而变化。这一运动产生的频移可随来向信号的方向变化，但是，如果发射机设在绕星运行的自传星体上，将难以在发现信号前确定可能出现的发射机速度变化。鉴于这些考虑，通过延长整合时间而实现的 $S/N$ 的改善，取决于跟踪多普勒频移信号的能力。检测系统中信号频移信道造成的不圆满跟踪，将减少延长整合时段带来的实惠。

搜寻项目所需的总时间取决于天线指向数量、各方向不同频率设置的数量以及每项观测的整合时间。固定方向和频率计划的全部可用时间限制了每项观测的整合时间，从而也限制了搜索灵敏度。建设具有一个或多个专用于SETI检测波束的ATA和SKA等多波束阵列，将能够延长整合时间并提高灵敏度。

#### 10.4.1 最低可测信号功率

对于在整合时间内一直处于同一检测系统频率信道内的信号而言，将统一 $S/N$ 的搜索接收机最低可测信号功率 $P_{min}$ 表示为[NASA, 1973年]:

$$P_{min} = 10 \log \left[ \frac{kT}{t} \left( 1 + (1 + Bt)^{0.5} \right) \right] \quad \text{dBW} \quad (10.1)$$

其中:

$k$ : 玻尔兹曼常数

$T$ : 系统噪声温度 (K)

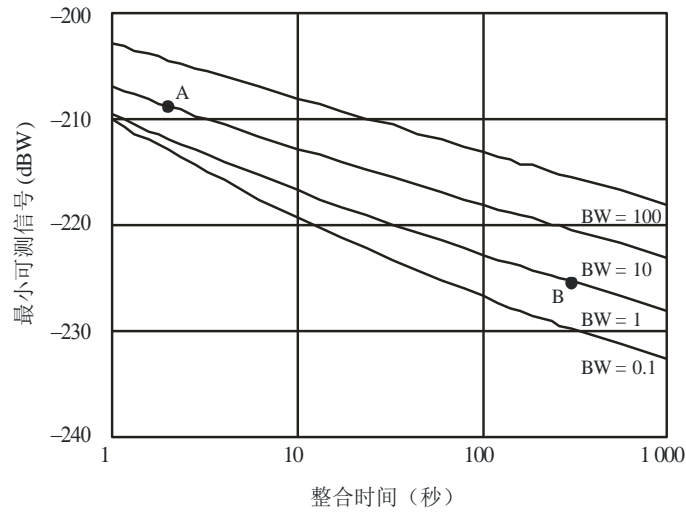
$B$ : 频道带宽 (Hz)

$t$ : 整合时间 (s)。

图10.2显示了作为多个带宽整合时间函数的最小可测信号功率 $P_{min}$ 。图10.2的A和B点代表了两个具有图示所列特性的可行搜索接收机。

图10.2

示范系统的最低可测信号功率



30 K 系统噪声温度  
BW: 带宽 (Hz)  
A例, 巡天系统: BW = 10 Hz, 整合时间= 2 s  
B例, 目标搜索系统: BW = 1 Hz, 整合时间= 1 000 s

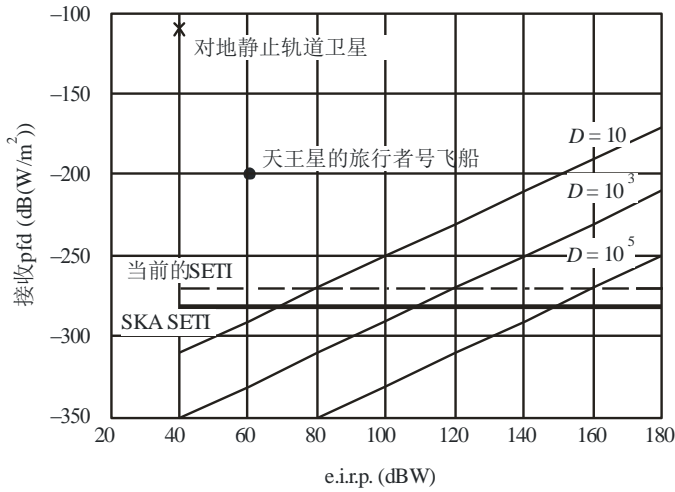
Radio-Astro\_102

图10.3阐述了图10.1为目前SETI计划（轻水平线）设定的接收pfd与有关SKA的未来SETI计划（重水平线）之间的关系。目前的SETI计划，即凤凰项目，采用300米天线，225米的有效照射孔径效率达70%，系统噪声温度为40 K，信道带宽1 Hz，而整合时间为300秒。有关SKA的未来SETI计划设定了相同的观测参数，只将采集区域增加了13 dB。这是对灵敏度的保守估计，因为整合时间有可能达到1 000秒或更高。形成可测通量密度的e.i.r.p.和距离，是存在于相关示范系统水平线以上的组合。



图10.3

设定的发射机e.i.r.p.的信号检测能力



灵敏度： 目前的SETI：凤凰项目系统，300米天线，  
 1 Hz 带宽，300 秒整合时间  
 SKA SETI：1000 米天线，1 Hz 带宽，300 秒整合时间  
 D: 距离，光年 (1光年 =  $9.46 \times 10^{15}$  m)  
 x: 自对地静止卫星轨道  
 ●: 自天王星的旅行者号飞船

Radio-Astro\_103

当频道带宽不受信号频移限制时，可利用与来向信号频谱宽度吻合的带宽求得最高灵敏度。但并不能事先得知这一带宽。如果接收机只有单一频道，与此相关的问题是削减频道带宽会增加搜索具体频率范围所需的时间。例如，利用带宽为1 Hz和整合时间10秒的单频道接收机搜索1至2 GHz范围需要317年。出于这一原因，目前通过通称为分光仪的接收机进行全面搜索，提供划分为诸多窄带频道的宽频道。具有 $10^9$ 频道的分光仪现已投入商用。

### 10.5 天线指向

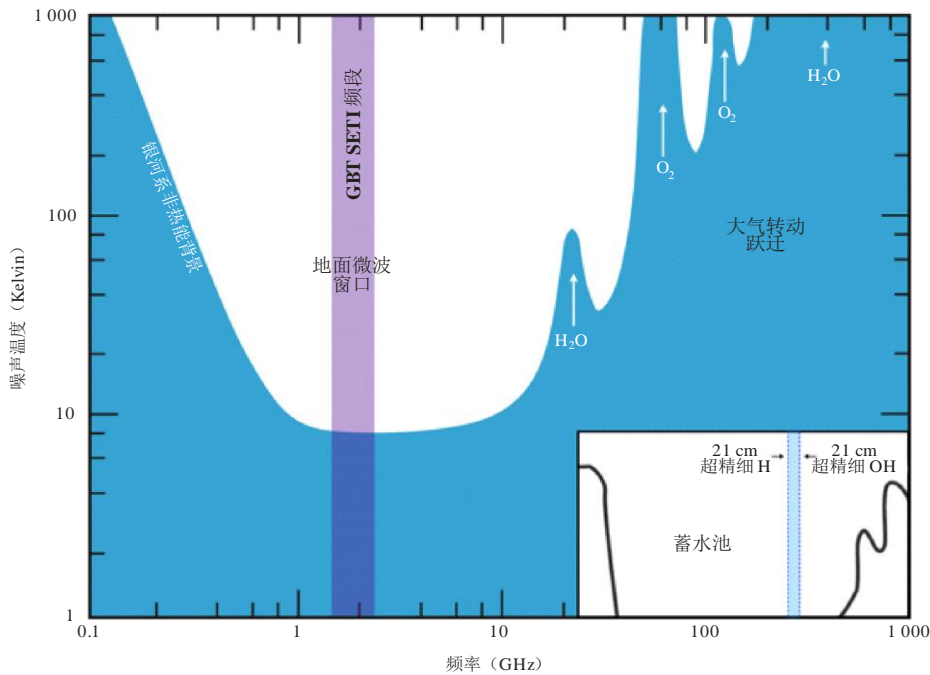
覆盖大收集区（即高增益）的天线，适用于提高搜索灵敏度并相应地增加检测概率。然而对于独立天线而言，扩大收集区通常会降低天线波宽，而且搜索一特定区域所需的位置设置数量也必须增加。这意味着必需延长一特定整合时间内的总搜索时间。通过增设天线以扩大收集区域能够解决这一问题。

天线指向战略是SETI搜索的根本特性。其中的两个可选方案是：目标搜索或普遍巡天。在进行目标搜索时，天线指向入选星座：距地球100光年以内的与太阳类似的星座有近千个。对信号的实时监测可通过搜索天线或其他支撑工具进行可能的检测。在天线从目标移开后，绕行目标星的地外技术信号应当消失，但在目标被重新捕获时会再次出现。由于可能会在每个目标上花费大量时间，可同时为连续波（CW）和脉冲信号搜寻分光仪时频域信号输出。这一搜索甚至可以扩展至频率的模式漂移。

太阳系以外行星的调查为SETI搜索提供了新的目标（Siemion, 2013年）。此外，数字信号处理技术的稳步提升实现了更大带宽的搜索，并提高了频谱分辨率。指向受检测星球的窄带信号 (< 5 Hz) 的搜索频谱范围见图10.4。

图10.4

无线电背景密度与频率曲线的对比



此曲线图显示了增加接收机系统温度的外部因素，并说明了SETI的范围。1至10 GHz频率范围的银河系发射和对系统温度的地面大气贡献率都很低。该图还显示了 0.8 GHz带宽的 Green Bank Telescope Kepler 星球搜索范围。此图来自A. Siemion (2013年)。

Radio-Astro\_104

在巨大空间开展总体天空调查需要更多时间，但在每一个方向所用的时间则更为有限。可以通过制定具体的扫描策略，将与天体相关的信号和与在轨运行或地基发射机相关的信号区别开来。

作为这两种概念结合的全向系统，在其收集区采用了许多小型原件，并将气输出同时集中指向可见天空的所有可能的波速。除非组件数量很大，这一射频阵列的灵敏度有限，但增加数量会带来价格迄今仍无法承受的巨大计算挑战。

### 10.6 信号识别和干扰抑制

多数搜索人员认为，地外文明的信号是窄带的，如1 Hz，而且其密度可能随时间变化。检测这类信号面临的一个根本问题，是确定信号不是自然或人为噪声形成的。

就自然随机噪声而言，与振幅相关的概率已经众所周知。噪声峰值突破搜索信号门限的概率可能是有限的，然而这一峰值可以被作为可能的地外发现记录在案。这种虚假发现的比例取决于采用的门限值，并可针对高斯（白色）噪声进行计算。为降低虚惊比例而提高门限值会削弱接收机的灵敏度。而多个天线同时运转则能够降低虚假发现的比例。当这些天线间距很大时，地面干扰的相关性降低，而且会大幅减少。

人为信号占据了大量射频频谱，这种情况在较低频率上尤为突出。搜索策略应包括对这些信号分门别类并将它们作为可能候选拒收的能力。拒收可能以对信号可能影响观测站的事先了解或观测站的测量结果为依据。成功地将这些干扰信号排除于用于更为详细分析的数据库，是实现成功搜索的重要条件。

射频频谱在无线电通信和其他业务中的普及使用，将增加未来SETI搜索的难度。尤其是对地静止轨道卫星的迅猛增长，更是排除了在许多频率的靠近轨道方向搜索空域的可能。值得注意的是，在SETI看来，所有人为无线电发射，无论授权与否，都是潜在的射频干扰。鉴于射频频谱需求的不断增长，显然应当尽快开展SETI搜索，以尽可能减少射频干扰问题。

## 10.7 需要搜索的候选频段

人们并不事先了解测出的发自地外文明的信号的频率和其他特性，即使在可供地表观测的部分，搜索也不可能覆盖整个射频频谱。因此，必须根据计算猜测选择有限的频段。

前国际无线电咨询委员会（CCIR）700-1号报告（多塞尔多夫，1990年）研究了具体搜索频段选择的依据。许多建议频段的共性与自然现象发生的频率相关。一个基本假设是，地外文明可能选择银河系通用的频率或在多个这类共用频率上发射信号，但条件是其他文明也了解这些频率，并对其接收系统做出相应安排。因此，这些频段涉及与最丰富的星际原子和1420 MHz的分子氢原子（HI）、1612、1665、1667和1720 MHz的羟自由基（OH）和4830 MHz的甲醛（H<sub>2</sub>CO）等的已知频谱线相关的频率。氢和羟基线之间被称为“水坑”的区域成为热门选择，因为人们认为，水基生命形式可能会认为这一频谱区域很重要。甚至有人建议选择含有最轻人造原子，即正电子素的203 GHz频谱线的频段。

划分给RAS和无源感应的多个频段，受到免遭人为发射影响的保护。由于它们受到干扰保护并在很多情况下包括广泛见之于银河系的频谱线，这些都是可用于SETI计划的优秀候选频段。

有关频段选择问题众说纷纭。但由于人们并不事先了解地外信号具有的特性甚至是否存在，全面搜索应当覆盖尽可能广的频率范围。

## 参考文献

- BATES, D. [1988] Radio searches for extraterrestrial civilizations. *Quarterly J. of the Royal Astronom. Soc.*, Vol. 29, p. 307-311.
- COCCONI, G. and MORRISON, P. [1959] Searching for interstellar communications. *Nature*, 184, p. 844-846.
- DRAKE, F. D. [1961] Project Ozma. *Physics Today*, Vol. 14, p. 40-46.
- DRAKE, F. D. and SOBEL, D. [1992] *Is anyone out there?: The Scientific Search for Extraterrestrial Intelligence*. Delacorte Press, New York, United States of America.
- KARDASHEV, N. S. [1964] Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations. *Soviet Astronomy*, AJ, **8**, p. 217-221.
- LAZIO, T. J. W., TARTER, J. C. and BACKUS, P. R. [July 2002] The META Candidates Were Not Transmissions From Intrinsically Steady Sources. *Astronomical J.*, Vol. 124, p. 560-564.
- NASA [July 1973] Project Cyclops. Ames Research Center, Moffett Field, California, United States of America, Report CR 114445, Revised Edition, p. 243.
- OLIVER, B. M. [1987] The windows of SETI: frequency and time in the search for extraterrestrial intelligence. *The Planetary Report*, Vol. VII, **6**, p. 23-25.
- SAGAN, C. and HOROWITZ, P. [September 1993] Five Years Of Project META: An All-Sky Narrowband Radio Search For Extraterrestrial Signals. *Astrophysical J.*, Vol. 415, **218**, p. 218-235.
- TARTER, J. C. [2001] The Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI). *Annual Rev. of Astronom. and Astrophys.*, Vol. 39, p. 511-548.
- TROITSKY, V. S., STARODUBTSEV, A. M., GERSHTEIN, L. L. and RAKHLIN, V. L. [1971] The experience of the search for monochromatic radio emission from stars in the vicinity of the Sun at a frequency of 927 mc/s. *Astronomicheskii Zhurnal*, Vol. 48, p. 645-647.
- SIEMION, A. P. V., DEMOREST, P., KORPELA, E. MADDALENA, R., WERTHIMER, D., COBB, J., HOWARD, A.W., LANGSTON, G., LEBOSKY, M, MARCY, G.W., TARTER, J., [A 1.1-1.9 GHz SETI Survey of the Kepler Field. I. A Search for Narrow-band Emission from Select Targets](#), *Astrophysical J.*, Vol. **767**, p. 94.
- SHKLOVSKII, I. S. and SAGAN, C. [1966] *Intelligent life in the Universe*, Holden-Day, Inc.

## 第十一章

### 地基雷达天文学

#### 11.1 引言

雷达天文学的需求与射电天文相同，即在射频中使用没有干扰的频段。它与射电天文的区别在于它是一种有源业务，发射的同时也接收。另一个区别是目前该领域内仅有三个发射站址：一个在波多黎各、一个在加利福尼亚，一个在克里米亚，工作在430 MHz至8 GHz之间的四个频段中（参见表11.1）。由于可通过发射天线或一个辅助天线接收雷达的回波，在用的接收站址数量大概是发射站址的两倍。目前所有在用的发射和接收天线亦均用于无源射电天文观测或航天器通信。人们重新对日冕进行雷达观测系统发生了兴趣并开始讨论与规划的低频阵列射电望远镜（LOFAR）一起操作一个发射机系统。尚未选择频率，但可能在15 MHz至50 MHz的范围内。

雷达天文学涉及到使用地基雷达系统，以：

- 研究太阳系中大型和小型固体的无线电波反射特性、大小和旋转矢量；
- 测量多普勒频移和时延，以推导用于确定轨道参数，特别是可能在未来危及地球的近地小行星的速度和距离；
- 通过行星际介质和日冕对在其间传播的雷达信号的影响并研究日冕对雷达的反射来研究行星际介质和日冕。

与雷达天文学要求类似的相关学科为采用非相干散射、同温层和流行雷达研究地球的电离层和大气层。

雷达天文学正式始于1946年第一次探测到了月球的回波，但其真正作为天文学的一个分学科却是始于1961年探测到了金星的回波。随后很快探测到了水星和火星等其他行星。这些早期的成功包括确定了金星和水星的旋转周期并将我们对天文单位的了解提高了100倍。这些年也见证了对开发观测方法和仪器的极度重视。对早期观测和仪器开发的介绍可参考Evans and Hagfors [1968]且雷达天文学的早期历史描述可查阅Butrica [1996]。

在始于上个世纪70年代的雷达天文学第二个十年中，随着在当时重新研磨过的305米Arecibo望远镜上安装了2.38 GHz雷达并改进了当时的NASA/JPL Goldstone 64米望远镜上的8.5 GHz系统，所采用系统的灵敏度大大提高。与此同时，英国Jodrell Bank和美国Haystack行星雷达系统停止了运作，使得美国的两个和前苏联（现乌克兰共和国）的一个天线成为唯一的行星雷达天文学发射站址；如表11.1所示，这种情况一直延续至今。

在1972至1992年的二十年期间，雷达天文学为我们了解太阳系做出了许多贡献（简要介绍请参见Ostro [2002]）。发现土星环的颗粒为厘米级或更大，发现了木星被冰覆盖的伽利略卫星不同寻常的散射特性，以2公里的解析度扫描了金星40%的表面，在水星的两极发现了积冰，测量了几十个环形地带和近地小行星及几颗彗星的波长反射特性，获取了两个接近地

球的小行星的高解析度延时多普勒图像。在仪表领域，引入了雷达干涉测量，解决延时多普勒成像中固有的北南混淆，开发了收发分置系统，特别是在Goldstone天线（发射）与新墨西哥的VLA天线（接收）之间，采用了伪无限长度编码方法来克服对快速旋转目标进行成像时的蔓延问题。

在上个世纪90年代，更换了Arecibo望远镜的镜片，采用了双格里高利副反射器系统，以矫正望远镜的球面像差。也在305米望远镜的主反射器的边缘安装了15米高的地面屏蔽，以屏蔽进入接收器的地面辐射。这些修改大大提高了望远镜在1.0 GHz以上的灵敏度并降低了系统温度。当与将S频段发射机的功率加倍至1兆瓦的措施相结合后，这些改进措施使得Arecibo的S频段雷达系统的灵敏度在天顶点提高了10倍，在望远镜20°的最大天顶角上提高了20倍。几乎与此同时，经过改进的速调管略微改进了Goldstone的X频段雷达系统的灵敏度。Goldstone的S频段行星雷达发射机于2001年除役。

在过去的几年中，升级后的Arecibo和Goldstone系统广泛用于研究近地（NEA）和主小行星带，从而发现了近地双体小行星。Arecibo一直被用于研究土星卫星土卫六和土卫八的表面并对土星环进行成像。在水星两极的积冰处获得了更高解析度的图像，对月球极地地区进行了测高并通过分析发射回波的极化特性研究金星表面的表面沉积。

表 11.1

雷达天文学设施

雷达系统							主要辅助接收天线	
位置	纬度	经度	频率 (GHz)	发射机类型和功率 (kW)	天线增益	系统温度 (K)	位置	天线类型
Arecibo <sup>(1)</sup> 波多黎各	18° 21'	-66° 45'	0.430	脉冲 150 平均 2 500 峰值	61	55		
Arecibo <sup>(1)</sup> 波多黎各	18° 21'	-66° 45'	2.380	CW 1000	73.4	26	美国西弗吉尼亚 Green Bank 美国加利福尼亚 Goldstone 美国夏威夷St. Croix	100米抛物面 70 米和34 米抛 物面 VLBA (10 × 25 米抛物面)
Goldstone 美国加利福 尼亚	35° 23'	-116° 51'	8.560	CW 470	73	14	美国新墨西哥 Socorro 美国西弗吉尼亚 Green Bank <sup>(2)</sup>	VLA (27 × 25 米抛物面) 100 米抛物面
Evpatoria 乌克兰克里 米亚	45° 11'	33° 11'	5.01	CW 150	69	45	德国Effelsberg 意大利Medicina	100 米抛物面 32 米抛物面

<sup>(1)</sup> Arecibo望远镜可从垂直最多指向20°。参数为天顶指向。

<sup>(2)</sup> 预计有大量使用。

## 11.2 灵敏度问题

为实现其目标—即对我们太阳系中大型和小型天体的研究—对大型天线、高功率发射机及低噪声前端放大器的需求驱动了雷达天文学的发展。接收信号强度与距离的四次方成反比说明了这种需求。对于前向增益为 $G$ 、连续波（CW）发射机功率为 $P_T$ （Arecibo的430 MHz系统除外，所有行星雷达发射机均为CW，因为对于几乎所有被研究的天体，灵敏度皆取决于平均发射机功率）的天线，天线在有效收集区 $A$ 内从与雷达距离为 $R$ 、横截面为 $\sigma$ 的目标接收到的功率 $P$ 由下式给定：

$$P = \frac{P_T G \sigma A}{(4\pi R^2)^2} \quad (11.1)$$

通常情况下，如果同一天线用于波长为 $\lambda$ 的发射和接收，那么：

$$P = \frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (11.2)$$

雷达系统的整体灵敏度取决于接收信号功率与因天空（微波背景及在较低的频率上，来自我们星系的非热射频辐射）相加噪声影响而引发的均方根（rms）噪声功率起伏、大气、前端放大器及干扰。这些噪声功率的和通常由系统温度 $T_s$ 代表，它与噪声功率 $P_N$ 有关，即 $P_N = k T_s B$ ，其中 $k$ 为玻尔兹曼常数且 $B$ 为相关频率带宽，通常为多普勒增宽。r.m.s.噪声起伏由 $P_N (\tau B)^{-1/2}$ 给定，其中 $\tau$ 为积分时间。

忽略目标特性和其他常量：

$$\text{灵敏度} \propto \frac{P_T G A}{T_s} (\tau/B)^{1/2} \quad (11.3)$$

或在发射和接收均采用同一天线的情况下：

$$\text{灵敏度} \propto \frac{P_T G^2 \lambda^2}{T_s} (\tau/B)^{1/2} \quad (11.4)$$

由此，雷达天文学的要求与射电天文非常相像（大型天线、低噪声前端放大器和没有干扰信号），再加上高功率发射机。由于增益 $G$ 与 $\lambda^2$ 成反比，公式（11.1）和（11.2）意味着频率越高，灵敏度越高。

## 11.3 操作模式和带宽需求

连续波和调制波形均用于雷达天文学，其选择取决于目标天体的属性和实验的目标。在发射单频信号的连续波实验中，由于目标天体的旋转角速度 $\Omega$  rad/s的存在，反射信号发生多普勒增宽，增宽由以下公式给定：

$$\Delta\nu = \frac{4a\Omega v_0}{c} \sin \theta \quad (11.5)$$

其中：

$a$ ：物体半径

$\nu_0$ ：发射频率

$c$ ：光速

$\theta$ ：旋转轴与雷达LoS之间的夹角。

通常，发射圆极化波且在所接收圆极化的两个指向中的反射信号谱提供了有关雷达返照率、波长标度表面光洁度、旋转周期等信息。尽管发射信号每几秒钟切换频率可提高接收信号的检测性，但连续波情况下用于发射和接收的总带宽很少超过十分之几千赫兹。

二维（延时多普勒）成像用于测绘类地行星、小行星及（有望于未来）彗星表面的无线电波反射特性。可通过脉冲调制实现发射信号的必要调制。一些早期系统为脉冲制式，但近期所有的系统均为连续波制式，因为灵敏度通常取决于平均发射功率且连续波发射机可更容易、更便宜地实现高平均功率。因此，现代系统采用基于重复、最大长度、移位寄存器代码的双相调制对连续波信号进行相位调制。这些代码的自相关函数功能属性使其非常适合于行星雷达应用。目前，通常使用中，用于切换两个相隔180度的状态之间相位的最短基本间隔为0.1  $\mu\text{s}$ ，相当于15米的距离分辨率。采用0.1  $\mu\text{s}$ 切换间隔所需的接收机带宽大约为20 MHz且该带宽规定了当前雷达天文学的要求。目标天体和地球的相对移动而造成的多普勒频移可最多补偿相对于发射机频率的接收机频段几个兆赫。当然，就在该频段边缘以外的强干扰可大大降低接收机的性能。

#### 11.4 雷达天文学设施

作为一种在整个无线电频谱中对无干扰频段有严格要求的有源业务，雷达天文学的要求与射电天文相同，但却无法使用受保护的频段。迄今为止，已选择的频率一直受到高功率速调管是否可用，或如8.5 GHz的Goldstone设施那样，高功率发射机需用于航天器通信等其他用途等因素的制约。

表11.1说明了目前用于行星雷达天文学的系统。最为敏感的是位于加州Goldstone的NASA深空网络70米天线上的8.5 GHz系统以及由SRI International、USRA和UMET根据一项与美国国家科学基金会（NSF）达成的合作协议，在NASA行星计划的支持下，在波多黎各运营的305米Arecibo射电/雷达望远镜上的2.4 GHz系统。



参考文献

BUTRICA, A. J. [1996] *To See the Unseen: A History of Planetary Radar Astronomy*. NASA SP-4218, NASA History Office.

EVANS, J. V. and HAGFORS, T., Ed. [1968] *Radar Astronomy*, McGraw-Hill.

OSTRO S. J. [2002] *Planetary Radar Astronomy*. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third Edition, Vol. 12, p. 295-327, Academic Press.

## 附录1

### 划分给射电天文的频段表

第1栏： 给出了频段的频率界限。

第2栏： 说明划分是主要业务（P）还是次要业务（s）。用于无源业务的频段表示为（Pas）；在这些频段中，禁止一切发射，但某些国家例外。其他划分与有源（发射）业务共用。

第3栏： 说明划分限于特定地区的情况，但并不介绍各国特例的完整信息。对于完整的详情，应参考最新版的《无线电规则》。还标示了一些最重要的谱线。

但是，请注意，已知的谱线超过10000种（参见2.4.1节）且在40 GHz以上，各频段均存在多种谱线。

频率范围 (MHz) (1)	地位 (2)	备注 (3)
13.36-13.41	P	
25.55-25.67	P (Pas)	
37.50-38.25	s	
73.00-74.60	P	2区
150.05-153.00	P	1区，澳大利亚，印度
225.00-235.00	s	中国（《无线电规则》第5.250款）
322.00-328.60	P	氦谱线
406.10-410.00	P	
606.00-608.00	P	中国和非洲广播区
608.00-614.00	P s	2区，中国，印度和非洲广播区 1区和3区（非洲广播区除外）
1 400.00-1 427.00	P (Pas)	氢线
1 610.60-1 613.80	P	OH谱线
1 660.00-1 670.00	P	OH谱线
1 718.80-1 722.20	s	OH谱线
2 655.00-2 690.00	s	
2 690.00-2 700.00	P (Pas)	
4 800.00-4 990.00	s	H <sub>2</sub> CO谱线；4 825-4 835 MHz和4 950-4 990 MHz在阿根廷、澳大利亚和加拿大为主要业务（《无线电规则》第5.443款）
4 990.00-5 000.00	P	
10.60-10.68	P	
10.68-10.70	P (Pas)	

频率范围 (MHz) (1)	地位 (2)	备注 (3)
14.47-14.50	s	H <sub>2</sub> CO谱线
15.35-15.40	P (Pas)	
22.21-22.50	P	H <sub>2</sub> O谱线
23.60-24.00	P (Pas)	NH <sub>3</sub> 谱线
31.30-31.50	P (Pas)	
31.50-31.80	P	2区为无源 (Pas)
42.50-43.50	P	SiO谱线s
48.94-49.04	P	CS谱线
76.00-77.50	P	
77.50-79.00	s	
79.00-86.00	P	
86.00-92.00	P (Pas)	SiO谱线
92.00-94.00	P	N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> 谱线
94.00-94.10	s	
94.10-100.00	P	CS谱线
100.00-102.00	P (Pas)	
102.00-109.50	P	
109.50-111.80	P (Pas)	CO谱线
111.80-114.25	P	CO谱线
114.25-116.00	P (Pas)	CO谱线
123.00-130.00	s P	韩国 (128-130 GHz, SiO谱线) 《无线电规则》第5.562D款
130.00-134.00	P	
134.00-136.00		
136.00-148.50	P	CS谱线
148.50-151.50	P (Pas)	
151.50-158.50	P	
164.00-167.00	P (Pas)	
171.00-171.60, 172.20-172.80 173.30-174.00	P	韩国《无线电规则》第5.562D款
182.00-185.00	P (Pas)	H <sub>2</sub> O谱线
200.00-209.00	P (Pas)	
209.00-226.00	P	CO谱线
226.00-231.50	P (Pas)	CO谱线
241.00-248.00	P	CS谱线
248.00-250.00	s	
250.00-252.00	P (Pas)	
252.00-275.00	P	HCN, HCO <sup>+</sup> 谱线

除这些划分以外，《无线电规则》第**5.149**款敦促各主管部门采取一切可行措施，保护射电天文业务在以下频段不受有害干扰的影响：

13 360-13 410 kHz,	4 950-4 990 MHz,	102-109.5 GHz,
25 550-25 670 kHz,	4 990-5 000 MHz,	111.8-114.25 GHz,
37.5-38.25 MHz,	6 650-6 675.2 MHz,	128.33-128.59 GHz,
73-74.6 MHz 在1区和3区,	10.6-10.68 GHz,	129.23-129.49 GHz,
150.05-153 MHz 在1区,	14.47-14.5 GHz,	130-134 GHz,
322-328.6 MHz,	22.01-22.21 GHz,	136-148.5 GHz,
406.1-410 MHz,	22.21-22.5 GHz,	151.5-158.5 GHz,
608-614 MHz 在1区和3区,	22.81-22.86 GHz,	168.59-168.93 GHz,
1 330-1 400 MHz,	23.07-23.12 GHz,	171.11-171.45 GHz,
1 610.6-1 613.8 MHz,	31.2-31.3 GHz,	172.31-172.65 GHz,
1 660-1 670 MHz,	31.5-31.8 GHz 在1区和3区,	173.52-173.85 GHz,
1 718.8-1 722.2 MHz,	36.43-36.5 GHz,	195.75-196.15 GHz,
2 655-2 690 MHz,	42.5-43.5 GHz,	209-226 GHz,
3 260-3 267 MHz,	48.94-49.04 GHz,	241-250 GHz,
3 332-3 339 MHz,	76-86 GHz,	252-275 GHz
3 345.8-3 352.5 MHz,	92-94 GHz,	
4 825-4 835 MHz,	94.1-100 GHz,	

在**275 GHz**以上频率，没有ITU-R频段划分。但是，WRC-12通过《无线电规则》第**5.565**款批准了以下条款：

5.565 275-1 000 GHz频率范围内的以下频段被各主管部门确定用于无源业务应用：

- 射电天文业务：275-323 GHz、327-371 GHz、388-424 GHz、426-442 GHz、453-510 GHz、623-711 GHz、795-909 GHz和926-945 GHz；
- 卫星地球探测业务（无源）和空间研究业务（无源）：275-286 GHz、296-306 GHz、313-356 GHz、361-365 GHz、369-392 GHz、397-399 GHz、409-411 GHz、416-434 GHz、439-467 GHz、477-502 GHz、523-527 GHz、538-581 GHz、611-630 GHz、634-654 GHz、657-692 GHz、713-718 GHz、729-733 GHz、750-754 GHz、771-776 GHz、823-846 GHz、850-854 GHz、857-862 GHz、866-882 GHz、905-928 GHz、951-956 GHz、968-973 GHz和985-990 GHz。

无源业务对275-1 000 GHz范围的使用不排除有源业务对该范围的使用。敦促希望将275-1 000 GHz范围内的频率用于有源业务应用的主管部门采取一切切实可行的措施，在上述275-1 000 GHz频率范围内的频率划分表确定之前，保护这些无源业务免受有害干扰。

1 000-3 000 GHz范围的所有频率均可由有源和无源业务使用。（WRC-12）

## 附录2

### 射电天文台的登记

操作射电天文台的主管部门向国际电信联盟（ITU）无线电通信局（BR）登记这些台站很重要。

登记有多项好处：

- 同频干扰保护，当在作为主要业务划分给射电天文台的共用频段中进行观测时，特别是当跨境保护时非常重要。
- 《无线电规则》中多处脚注规定为射电天文台提供了不受卫星无用发射影响的保护。例如，《无线电规则》第**5.511A**款即规定：  
“...为保护15.35-15.4 GHz频段内的射电天文业务，工作在15.43-15.63 GHz频段内的非GSO MSS馈线链路（空对地）系统内的所有空间电台在15.35-15.4 GHz频段内并在2%以上的时间辐射到任何射电天文观测站点的集总功率通量密度限值在一个50 MHz带宽内不应超过-156 dB(W/m<sup>2</sup>)。”

当审查某个卫星系统是否符合这样一条脚注时，无线电通信局将仅考虑已经登记的那些射电天文台。登记将：

- 允许那些规划在某个射电天文台的周围设置新发射机的主管部门将该天文台考虑在内。当某个台站位于靠近一国边境的地方时，国际登记尤其重要且可能需要进行双边协调；
- 确定登记台站的时间优先顺序。在登记后，在某些频段（如15.35-15.4 GHz）观测的射电天文台可要求在较晚日期在临近或附近频段工作的卫星系统的无用发射给予保护。

射电天文台的登记必须由各国主管部门的电信管理部门进行。必须提交的射电天文台特性述于《无线电规则》附录4的附件2。

《无线电规则》的各部分，包括登记射电天文台所需的参数可在每一届世界无线电通信大会上修订。例如，WRC-03增加了登记一个射电天文台所需的几项新参数（如一个射电望远镜可进行观测的最小仰角，这是《无线电规则》**5.511A**脚注中所述的、计算非静止卫星系统中空间电台集总功率通量密度所必需的）。在登记某个具体台站前，应查询最新版的《无线电规则》。

绝大多数射电天文台在比射电天文划分频段更宽的频谱范围内进行观测。在登记射电天文台时，应注意将观测频率范围分解为作为主要业务和非主要业务划分给射电天文的不同部分，因为对台站的保护只适用于射电天文为主要业务的频段。例如，某个台站操作涵盖15-16 GHz范围的一个接收机，该台站应分三个频段登记：

- 15.00-15.35 GHz, 没有保护;
- 15.35-15.40 GHz, 《无线电规则》**5.511A**脚注适用以及
- 15.40-16.00 GHz, 没有保护。

如果15.00-16.00 GHz频段作为一个整体进行登记, 那么将不会为任何一部分提供保护。出于规划和协调的目的, 登记并不受到保护的频谱范围仍是有益的。

## 附录3

### 射电天文学单位

射电天文工作者采用了一系列不同于多数其它业务使用的单位和规范。本目录旨在译换射电天文工作者和其它业务重点围绕信号强度和天线增益所用的术语。

#### 信号强度

射电天文工作者以扬斯基（Janskys，略为Jy）为信号强度单位，即以宇宙无线电信号的发现者卡尔·扬斯基命名的单位。Jy是每单位带宽的单位面积的功率单位。如（功率频谱通量密度）：

$$1 \text{ Jy} \equiv 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ Hz})$$

多种因素促使射电天文工作者以Jy表示信号强度：

- 射电天文信号非常微弱，因此Jy的数值很小。
- 射电天文工作者针对不同的收集区采用多种不同的天线。为了能够对从不同天线测得的信号强度进行比较，Jy表示了天线收集表面每单位面积的信号强度。通过规范每个单位面积和每个单位带宽，Jy使人们能够对不同射电望远镜测得的信号强度进行直接比较。
- 许多射电天文信号是宽带（例如热气体的热排放）的，接收功率取决于接收机总带宽。Jy通过以单位带宽计算的信号强度将这一点考虑在内。

许多无线电通信业务仅以功率表示信号强度。通用单位是dBm，即超过1 mW的分贝数。dBm是一个对数单位，其实用性在于许多信号强度量级都可以通过地面无线电信号表示，尤其是dBm可用来表示超过200dB或更高范围的发射和接收功率。为便于比较，射电天文的信号强度在如此大的范围内并无变化，1Jy是一强大来源，而典型的射电望远镜灵敏度被缩小至微扬斯基（μJy），即仅约60dB的总体范围。

虽然Jy（功率频谱通量密度）和dBm（功率）是两个不同的单位，但可在某些名义假设的基础上对它们进行比较。用接收机带宽和有效天线收集区乘以Jy即可转换为功率。下表通过假设带宽与部分通用地面信号相关而且天线收集区与全向收集区 $\lambda^2/4\pi$ 相一致，对两者做出比较：

$$\text{功率（单位为mW）} = \text{功率频谱通量密度（单位为Jy）} * 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ Hz}) * 1000 \text{ mW/W} * \\ \text{带宽（Hz）} * [\text{波长（m）}]^2 \div 4\pi$$

$$\text{功率（dBm）} = 10 * \log_{10}[\text{功率（mW）}]$$



一系列通用信号中以dBm为单位的接收信号强度与整个指定带宽中全向天线接收的1Jy信号相一致的实例

信号类型	带宽	频率/波长	与 1 Jy相一致的dBm
陆地移动	12.5 kHz	450 MHz/0.67 m	1 Jy = -204 dBm
GSM	200 kHz	1 800 MHz/0.17 m	1 Jy = -204 dBm
DVB-T	8 MHz	500 MHz/0.6 m	1 Jy = -176 dBm
LTE	10 MHz	2 655 MHz/0.11 m	1 Jy = -190 dBm
Wi-Fi	40 MHz	5 300 MHz/0.06 m	1 Jy = -190 dBm

为正确认识这些数字，参考GSM手机的灵敏度为111 dBm（根据GSM规范），因此1 Jy的信号为低于GSM灵敏度限值的93 dB，而1 μJy的信号则为低于GSM灵敏度限值的约153dB。射电望远镜的灵敏度可比GSM接收机的灵敏度高15个量级。

试图将地面信号强度转换为其Jy等效值的射电天文工作者，可能偶尔看到以每米微伏（μV/m）或其分贝等效值dB(μV/m)<sup>12</sup>表示的信号强度。这仅是对电场振幅（E）的测量，而欧姆定律可用于将E转换为等效功率： $P(W/m^2) = E^2/Z_0$ ，其中  $Z_0 = 377 \Omega$  是自由空间阻抗。在EMC工作中通常会遇到电场振幅（而不是功率），美国联邦通信委员会的非许可设备规则便是一例。利用代数演算可以得出以下转换结果：

$$P(mW) = 1.9 \times 10^{-8} * [E(\mu V/m)]^2 * [f(MHz)]^{-2}$$

$$P(dBm) = -77.2 + E[dB(\mu V/m)] - 20 * \log_{10}[f(MHz)]$$

ITU-R RA.2131号报告也提到这一转换，并根据其电场等效值给出了RAS观测的保护门限值

## 天线

射电天文工作者通常将功率通量密度或频谱功率通量密度（两者皆为一单位面积的功率或功率频谱密度的测量方式）转换为总功率。因此，天线的有效收集区则是比天线增益更为适用的天线性能表示方式。有效天线收集区A<sub>e</sub>是几何收集区A<sub>g</sub>（如确定的话）和孔径效率η<sub>a</sub>的结合： $A_e = \eta_a A_g$ 。射电天文天线增益的通用表示方式，是指来自全部1Jy通量密度（F）的功率在单一极化中聚集引起的接收机温度（以“开尔文”为单位）上升。这被称为以K/Jy为单位的增益（G）。欲在A<sub>e</sub>和G之间进行转换：

$$\frac{1}{2} F A_e = k_B \Delta T_K$$

$$A_e(m^2) = \frac{2k_B \Delta T_K}{10^{-26} F_{Jy}} = 2760 G(K/Jy)$$

其中k<sub>B</sub>为玻尔兹曼常数。

<sup>12</sup> 请注意，dB(μV/m) = 20\*log<sub>10</sub>(μV/m)，而不是10\*log<sub>10</sub>(μV/m)，因为这是电场值，而不是功率值。

无线电通信业务通常以不同的天线增益表达方式说明基本天线的性能：假设信号沿参考天线的主波束传播，天线输出端的信号强度会相对于在标准参考天线输出端获得的信号强度增加（或减少）。全向天线是最常见的参考天线，其有效收集区  $A_e$  为  $\lambda^2/4\pi = 7162/[f(\text{MHz})]^2$ ，因此，具有线性增益  $G$ （涉及全向）的天线有效收集区为  $A_e = G(\text{isotropic}) * 7162/[f(\text{MHz})]^2$ 。以下是将根据  $G$  (K/Jy) 的有效区域与相对于全向的基于线性增益的有效区域相对应的方式：

$$G(\text{全向}) \frac{7162}{f_{\text{MHz}}^2} = 2760 G(\text{K/Jy})$$

$$G(\text{全向}) = 0.4 f_{\text{MHz}}^2 G(\text{K/Jy})$$

在对数单位中：

$$G(\text{dBi}) = -4 + 20\log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 10\log_{10}[G(\text{K/Jy})]$$

反之：

$$G(\text{K/Jy}) = 2.5 f_{\text{MHz}}^{-2} 10^{G(\text{dBi})/10}$$

下表提供了部分同时以两种单位出现的天线增益：

天线	频率 (MHz)	G (K/Jy)	增益(dBi)	$A_e$ (m <sup>2</sup> )
蜂窝基站	1 800	$2.5 \times 10^{-5}$	15	0.07
意大利Medicina 观测站	1 400	0.12	50	331
波多黎各Arecibo 观测站	1 400	11	69	30,360

## 附录4

### dB表的实际使用

分贝（dB）是显示相对于明示或暗示参考电平的物理数量（通常为功率或强度）比例的对数单位。分贝的比例是两个电量（IEEE定义）比例的以10为底的对数的十倍。一分贝是一贝尔（bel）的十分之一，而贝尔是以亚历山大·格拉汉姆·贝尔命名的不常用单位。

分贝被广泛用于各类科学和工程测量，重点用于声学、电子学和控制理论。电子学中的放大器增益、信号衰减和信噪比通常以分贝表示。分贝具有许多好处，如能够方便地表示极大或极小的数值，并能够通过简单的加减法进行比例的乘法运算。

（以上内容是基于维基百科的一篇内容更为广泛的文章，可查询其内容并将它用于dBm和dBw以及以毫瓦和瓦计算的比例等。）

#### 利用dB求得1%的精度

我们大多数人都熟悉对数分贝表：

因子	dB
1/1000	-30
1/100	-20
1/10	-10
1	0
10	10
100	20
1000	30
Etc.	

但并非所有人都了解11 dB为 $4\pi$ ，而14 dB是增加了24倍，且两者都达到了1%的精度。

3 dB  $\approx$  2 和5 dB  $\approx$   $\pi$ 这对数字重合，给出了精度达1%的以下列表：

因子	dB	误差
1	0	0
1.25	1	0.7%
$\pi/2$	2	0.9%
2	3	-0.2%
2.5	4	0.5%
$\pi$	5	0.7%
4	6	-0.5%
5	7	0.2%
$2\pi$	8	0.4%
8	9	-0.7%
10	10	0
$4\pi$	11	0.2%
16	12	0.95%
20	13	-0.2%
25	14	0.5%
Etc.		

这一易于记忆的列表能够实现精度达1%的快速计算。

### 其它对数表

作为备选对数比单位的奈培 (neper)，采用的是自然对数 (基数e)。

分贝和奈培并不是首个对数表。天文学家自古以“量级”说明易于肉眼识别的星体亮度的最微小差异。这一点目前已得到确定，使+5量级的差异相当于亮度下降到1%。因此，+1的量级恰好等于-4 dB。

## 附录5

### 首字母缩略语表

A/D	模拟到数字
AIPS	天文图像处理系统
ALMA	阿塔卡马大型毫米波/亚毫米波阵列
ANC	自适应噪音消除
ASTRO	南极亚毫米波望远镜和远程天文台
ATA	艾伦望远镜阵列
BIMA	伯克利-伊利诺伊-马里兰协会
BNetzA	联邦网络局
BPL	宽带电力线接入
BPSK	二进制相移键控
BR	无线电通信局
BSS	卫星广播服务
CARA	南极天体物理学研究中心
CARMA	用于毫米波天文学研究的合成阵列
CCIR	国际无线电咨询委员会
CCV	词汇协调委员会
CISPR	国际无线电干扰特别委员会对
CMB	宇宙微波背景
CME	日冕物质抛射
CORF	国家科学院无线电频率委员会
COSPAR	空间研究委员会
CPM	大会筹备会议
CRAF	射电天文频率委员会
CRF	天体参考框架
CT	计算机断层扫描
CW	连续波
dB	分贝
DNA	脱氧核糖核酸
DVB-T	数字广播 - 地面
EESS	卫星地球探测业务
e.i.r.p.	有效全向辐射功率或等效全向辐射功率
EMC	电磁兼容性
EOP	地球旋转参数
epfd	等效功率通量密度
ESA	欧洲航天局

EU	欧盟
FET	场效应晶体管
FFT	快速傅立叶变换
FPA	焦平面阵列
FSS	卫星固定服务
FX	相乘前的傅立叶变换
GaAs FET	砷化镓场效应晶体管
GBT	绿岸望远镜
GHz	千兆赫 (=1000 000 000赫兹)
GMRT	巨米波电波射电望远镜
GMSK	高斯滤波最小频移键控
GNSS	全球导航卫星系统
GPS	全球定位系统
GSM	全球移动通信系统
GSO	对地静止轨道
HI	中性氢
HII	电离氢
HEMT	高电子迁移率晶体管
HF	高频
IAU	国际天文学联合会
ICSU	国际科学理事会
IEEE	电气和电子工程师协会
IF	中频
INR	干扰噪声比
ISAS	宇宙科学研究所
ISM	工业、科学和医疗
ITU	国际电信联盟
ITU-R	国际电联无线电通信部门
ITU-T	国际电联电信标准化部门
IUCAF	射电天文和空间科学频率划分跨联盟委员会
IVS	国际大地测量和天文VLBI服务
JAXA	日本宇宙航空研究开发机构
JPL	喷气推进实验室
Jy	扬斯基 (=1×10 <sup>-26</sup> W/平方米/赫兹-260=分贝 (W/平方米/赫兹))
kHz	KHz (=1 000赫兹)
LAN	局域网
LEO	低地球轨道
LOFAR	低频阵列
LoS	视线
LTE	长期演进

MHz	MHz (=1 000 000赫兹)
MPIfR	马克·斯普朗克射电天文研究所
MSS	卫星移动业务
MWA	默奇森宽场阵列
NASA	美国国家航空航天局
NDACC	大气成分变化检测网络
NEA	近地小行星
NEO	近地物体
NIR	近红外
NRAO	国家射电天文台
NRC	国家研究理事会
NSF	美国国家科学基金会 (美国)
OoB	带外
OVRO	欧文斯谷射电天文台
pc	秒差距 (=3.09x10 <sup>16</sup> m=3.26光年)
PET	正电子发射断层扫描
pdf	功率通量密度
PLC	电力线通信
PLT	电力线通信
PSK	相移键控
RA	无线电通信全会
RAFCAP	亚太地区射电天文频率委员会
RAG	无线电通信顾问组
RAS	射电天文业务
RF	射频
RFI	射频干扰
RLS	无线电定位业务
rms	均方根
RNSS	卫星无线电导航业务
RQZ	无线电静默区
RR	无线电规则
RRB	无线电规则委员会
SCRPM	规则和程序问题特别委员会
SETI	搜寻地外文明计划
SFCG	空间频率协调组
SG	研究组
SIS	超导体-绝缘体-超导体
SKA	平方千米阵列
SMA	次毫米波阵列
SNR	信噪比 (=S/N)

SNR	超新星遗迹
SOS	空间运营服务
spfd	频谱功率通量密度
SRI	斯坦福研究院
SRS	空间研究业务
THz	太赫兹 (=1 000 000 000 000赫兹)
TRF	地球参考框架
UHF	超高频
UMET	大都会大学
URSI	无线电科学国际联盟
USRA	大学空间研究协会
UWB	超宽带
VHF	甚高频
VLA	甚大阵
VLBA	超长基线阵列
VLBI	甚长基线干涉测量法
VSOP	VLBI空间天文台计划
WARC	世界无线电行政大会
WiFi	无线保真
WMAP	威尔金森微波各向异性探测器
WP	工作组
WRC	世界无线电通信大会
WSRT	韦斯特博克综合孔径射电望远镜





国际电信联盟  
销售与市场部  
Place des Nations  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland  
传真: +41 22 730 5194  
电话: +41 22 730 6141  
电子邮件: sales@itu.int  
网站: www.itu.int/publications



瑞士印刷  
2015年,日内瓦

图片鸣谢: ATCA David Smyth