

射电望远镜

〔澳〕W. N. 克里斯琴森 〔瑞典〕J. A. 霍格玻姆 著



科学出版社

79.845
866

射电望远镜

〔澳〕W. N. 克里斯琴森 著
〔瑞典〕J. A. 霍格玻姆

陈建生 译

王绶琯 郭成光 校

科学出版社

1976

内 容 简 介

本书对近二十年来射电望远镜的发展作了全面的介绍，并为射电望远镜天线的设计提供了必要的理论基础。

本书可供射电天文、射电望远镜、微波天线等方面的科研与工程技术人员以及高等院校有关专业的师生参考。

W. N. Christiansen, J. A. Högbom

RADIOTELESCOPES

Cambridge Press, 1969

射 电 望 远 镜

[澳] W. N. 克里斯琴森 著

[瑞典] J. A. 霍格玻姆 著

陈建生 译

王绥瑄 郭成光 校

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1977 年 5 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1977 年 5 月第一次印刷 印张：7 3/4

印数：0001—3,600 字数：173,000

统一书号：13031·505

本社书号：746·13—5

定 价： 0.80 元

中译本序言

我们非常高兴地看到《射电望远镜》中文版的问世。在过去十年里,我们关注着中国射电天文事业的成长,甚至还为它作过些许工作。我们希望,这本书对于我们年青的同事们,在他们增长天线技术知识以及应用这些知识来进一步发展中国的射电天文事业方面会有所帮助。本书第一版的某些部分的写作,正是当我们之中的一位在北京天文台同射电天文组共事时起草的。我们要感谢我们的中国同事们在那段时间里对手稿所提出的有益意见。

最后,我们衷心感谢我们的朋友和同事们为《射电望远镜》一书的中文翻译所付出的劳动。

W. N. 克里斯琴森

J. A. 霍格玻姆

序 言

最初的射电天文观测使用的是短波无线电通讯天线。在射电天文学早期,使用的雷达型天线的束宽约在 1° (厘米波) 到 10° (长波) 之间, 它很快就不能满足射电天文学工作者的需要了。

在本世纪四十年代末和五十年代初, 发明了许多新型的射电望远镜。其中一些最重要的是根据光学干涉仪原理制成的。最初是利用海面反射提供第二个射线路径; 但后来造的干涉仪都有一对间距可变的天线。继这些干涉仪之后, 发展了强有力的“孔径综合”技术, 它成为许多新型望远镜的基础, 并适合于观测不变的辐射源; 同时还发明了一些应用上不受这种局限的新射电望远镜。其中最著名的是一维栅式射电望远镜、复合干涉仪和二维十字天线。在这时期, 第一次利用地球自转从一维天线综合出二维天线。极长基线干涉仪也迅速发展起来了。同时, 象抛物反射面望远镜这样一些老式天线的孔径也大大地增大了。

这些努力的结果, 使现在射电天图的角分辨本领要比二十年前高出几个数量级, 而极长基线干涉仪已使射电天文学工作者能够确定小到千分之一角秒的天体的角直径。此外, 现在还可以同时获得天空上许多点而不只是一个点的信息。

可惜有关这方面进展的报告不是散见于各种杂志上, 就是还没有成文发表。本书作者在这一时期曾用了大部分时间投入于射电望远镜的设计, 我们的目的在于为射电天文的新手扼要介绍一下近二十年来射电望远镜的进展, 以及为他们

提供足以了解射电望远镜设计的基本知识。我们也试图介绍我们自己在设计工作中所取得的一些经验。本书是远隔万里的两位作者利用业余时间写成的，虽然它缺乏象一本精心编写的教程所具备的润色和剪裁，但我们希望原稿在远隔重洋的两位作者相互传阅之后，不至于再留下什么重大的不妥之处。

书末列出了一些我们认为有用的参考文献，推荐给读者进一步阅读。一些较新的综述性文章所介绍的许多工作，这里没有提到，或者只部分地提到。我们还要对引用了他们有价值的贡献而没有列出姓名的作者表示歉意。

我们要向读过本书手稿各部分的许多射电天文学工作者表示谢意。同时，凡是书中错误之处，乃由作者负责。

我们特别要感谢 C. A. Muller 教授，B. Y. Mills 教授，J. P. Wild 博士，S. F. Smerd 博士，R. F. Mullaly 博士，B. J. Elliott 先生和 K. J. Wellington 博士。

我们还要向参加准备手稿工作的 D. E. Wood 小姐，K. Magarey 夫人，Focquin de Grave-Polak 夫人，Winkelhag 小姐和 M. Conley 小姐表示感谢。最后，承蒙 E. M. 克里斯琴森耐心地组织，本书才得以问世。

W. N. 克里斯琴森

J. A. 霍格玻姆

目 录

中译本序言	vi
序言	vii
第一章 射电望远镜导引	1
1.1 射电望远镜的用途	1
1.2 射电天文工作者研究的对象	2
1.3 连续孔径射电望远镜	6
1.3.1 抛物反射面天线	6
1.3.2 其他反射型射电望远镜	9
1.4 非连续孔径射电望远镜	12
1.4.1 射电干涉仪	12
1.4.2 骨架射电望远镜	13
1.4.3 孔径综合	15
1.4.4 间距和方向范围不完整的天线	16
1.4.5 灵敏度和分辨率的独立性	18
第二章 一些理论	19
2.1 有效面积和天线偏振	19
2.2 射电亮度, 天线温度, 亮温度以及若干简单的与之有关的天线关系	23
2.3 场强方向图和照明分布	26
2.4 天线方向图的计算: 富里叶变换	30
2.4.1 均匀照明的线天线	31
2.4.2 均匀照明的大矩形孔径	33
2.4.3 圆环和均匀照明圆孔径	34
2.4.4 非均匀照明的天线	37
第三章 可动抛物反射面(旋转抛物面)	42

3.1	孔径的照明分布	43
3.2	反射表面	49
3.2.1	偏离理想形状的某些效应	50
3.2.2	结构挠曲(deflection)对反射面性能的影响	52
3.2.3	表面的反射率	57
3.2.4	网状或栅状反射面	59
3.3	照明天线	62
3.3.1	主焦点照明	62
3.3.2	多路照明和成象	69
3.3.3	卡塞格林式望远镜	71
3.3.4	交叉偏振	73
3.3.5	多频段照明	73
3.4	天线的转动	74
3.4.1	赤道装置	74
3.4.2	地平装置	75
3.4.3	射电中星仪	77
第四章	其他类型的连续孔径天线	78
4.1	天线阵	78
4.1.1	天线阵的场强方向图	78
4.1.2	天线阵的扫描	83
4.2	圆柱抛物面	86
4.2.1	机械特点	86
4.2.2	电性能	87
4.3	特殊类型抛物反射面天线	92
4.3.1	Kraus 型固定抛物反射面	92
4.3.2	多金属板天线	93
4.4	球反射面	96
4.4.1	改正镜	96
4.4.2	球反射面的线照明器	98
4.5	发展的前景	99

第五章 再谈一些理论	100
5.1 相关望远镜概述	100
5.2 相关望远镜的有效面积	102
5.2.1 以可用相关功率表示的定义	102
5.2.2 A_e 和组元天线特性之间的关系	103
5.2.3 余弦有效面积和正弦有效面积	105
5.2.4 有效面积的复数形式:包络图形	106
5.2.5 相关温度	107
5.2.6 相关有效面积的全天空积分	108
5.2.7 乘积方向图的应用:十字望远镜	110
5.3 望远镜转移函数	112
5.3.1 转移函数的引入	112
5.3.2 转移函数的作图	113
5.3.3 总功率望远镜	115
5.4 用射电望远镜测量天空亮度分布:天线平滑	116
5.4.1 电扫描	117
5.4.2 机械扫描	119
5.4.3 用望远镜转移函数表示的天线平滑	119
5.5 宽带系统	121
5.5.1 宽带望远镜系统	121
5.5.2 一个简单的相关干涉仪	123
第六章 非连续孔径天线	125
6.1 线孔径	125
6.1.1 栅形天线	125
6.1.2 复合栅天线	130
6.1.3 方向瓣的整形和复原	142
6.2 二维非连续孔径	146
6.2.1 十字天线	146
6.2.2 T形天线	152
6.2.3 环形天线	156

6.3	由多个分立天线组成的射电望远镜中的若干问题	159
6.3.1	流过传输线的功率的衰减	160
6.3.2	电扫描	161
6.3.3	成象	166
第七章	孔径综合	168
7.1	相关干涉仪	168
7.2	综合的方法	170
7.2.1	可动的天线对	170
7.2.2	地球自转的利用	175
7.3	孔径综合法对极高分辨率观测的应用	182
7.3.1	长基线干涉仪	183
7.3.2	月掩食法	184
第八章	灵敏度	187
8.1	检测的极限	187
8.2	随机噪声	189
8.2.1	带宽, 积分时间和噪声起伏	189
8.2.2	噪声起伏和增益稳定性	191
8.2.3	噪声起伏和接收机灵敏度	193
8.3	总功率望远镜	194
8.3.1	系统中的噪声功率	194
8.3.2	带前置放大器的系统中的噪声功率	195
8.3.3	一个总功率望远镜对于点源流量密度的灵敏度	197
8.3.4	一个总功率望远镜对于展源 (extended source) 亮度的灵敏度	198
8.4	相关望远镜	200
8.4.1	带前置放大器的相关系统	201
8.4.2	相关望远镜对于点源流量密度的灵敏度	203
8.4.3	相关望远镜对于展源亮温度的灵敏度	204
8.5	综合望远镜的灵敏度	205

8.6 成象和它对有效灵敏度的影响:巡天灵敏度的定义	206
附录 1—4	209—215
参考文献	234

第一章 射电望远镜导引

1.1 射电望远镜的用途

几十万年里,人类一直在观察着太阳,月亮,恒星,流星和彗星. 这些天体十分遥远,不能被触到,听到,嗅到或尝到. 只是通过目视观测,人类才慢慢地了解了这些神秘物体的运动规律. 五百多年前,随着透明玻璃的制造和使用,尽管进展缓慢,但却必然地导致了光学望远镜的发明,这使得对天体的观测能够比以前精细得多. 研究光学仪器所遵从的物理学规律表明,望远镜的口径要大大超过光的波长,才能揭示出被观测天体的精细结构. 为此,在最近一个世纪里,制成了一些口径非常大的望远镜,利用这些望远镜和附属的摄谱仪所得到的关于宇宙的知识,比过去几十万年所得到的要丰富得多[†].

近百年来,从理论上已经知道,太阳和恒星能发出电磁辐射,其范围从短波到长波,或者说,从X射线到无线电辐射. 十九世纪末,人们曾试图接收来自太阳的无线电辐射,但这些尝试都未获得成功. 一直到无线电理论和技术大大发展之后,无线电波才初次对天文学有所贡献. 这项新的天文成果有着预料不到的重要性,射电天文学迅速地成了天文学的一个重要分支. 主要的原因是,无线电波的波长比光波的波长要长一百万倍左右. 因此,对光波不透明的空间区域,对无线电波却常常是透明的,反之亦然. 然而,由于两者的波长相差百万倍,射电望远镜要象光学望远镜那样观测到天空的细节却是极其困难的. 如果要看到同样的细节,射电望远镜就必须比光学

[†] 光学望远镜口径的增大,主要还是为了收集非常弱的天体的光.——译者注

望远镜大一百万倍。例如,接收 20 厘米波长的辐射需要口径大约为 1000 公里的射电望远镜,才能与大型光学望远镜所提供的细节(分辨本领)相同.获得高分辨本领(区分两个靠近的天体的能力),是近三十年来射电天文学工作者的主要目标之一.这导致了建造庞大的机械结构(相当于放大的光学设备),此外,也导致了发明与光学设备完全不同的新型设备。

1.2 射电天文工作者研究的对象

一个天体直接可观测的量,包括相对于某个天球坐标系的角位置、角大小以及到达望远镜的辐射功率在一定波长(或频率)范围内的流量密度。射电天文学工作者可观测到的天体的角大小,从地球大气不规则性所确定的下限一直到几度。所研究的天体的辐射流量密度也包含好几个数量级,但常常是极其微弱的。

流量密度 S 是以与辐射入射方向相垂直的单位面积上所收到的功率来测量的。单位是瓦特每平方米每单位频宽(周每秒或赫),可写为 $\text{瓦米}^{-2} \text{赫}^{-1}$ 。

流量密度是测量中所用频率的函数,这个函数就是源的射电频谱。图 1.1 用对数标尺表示若干源的射电频谱。图中的频率范围从 10 兆赫($\lambda = 30$ 米)到 30,000 兆赫($\lambda = 1$ 厘米),包括了可供地面观测的部分的频率范围。这个大气的“射电窗口”在低频端被电离层反射所截止,高频端受大气中水和氧的分子吸收带所截止。

这种流量密度的标度表明,即使是最强的源所涉及的能量也是多么的微小。目前的设备可以测出小到 $10^{-29} \text{瓦米}^{-2} \text{赫}^{-1}$ 的流量密度。目前一个大型射电望远镜能在 10 兆赫频宽上收集到投入 10^4米^2 面积上的辐射,而接收机能够测出 $10^{-29+7+4} = 10^{-18}$ 瓦的功率。射电望远镜属于人类所建造的最

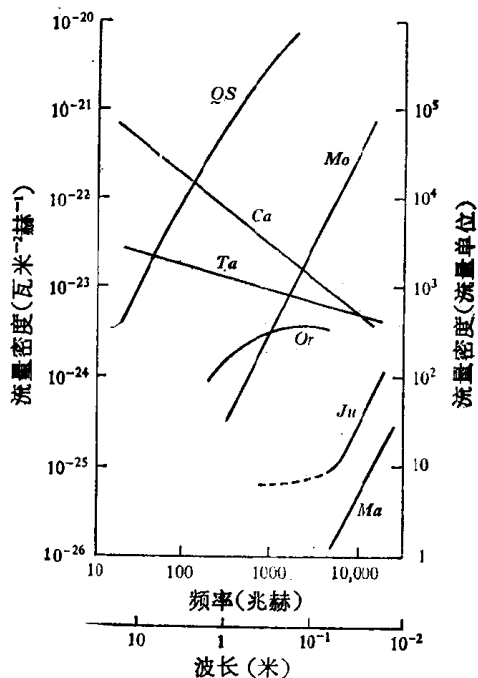


图 1.1 某些著名射电源的频谱. QS 为宁静太阳, Mo 为月亮, Ca 为仙后座射电源, Ta 为金牛座射电源(蟹状星云), Or 为猎户座星云(一个光学薄的源), Ju 为木星, Ma 为火星

灵敏的设备之一, 外界的干扰、尤其是人为的发射(它的功率常常超过 10^5 瓦)很容易使测量报废。

图 1.1 的频谱可以分为两大类:

a) **热辐射**. 在射电天文通常所遇到的频率和强度的范围内, 辐射定律的瑞利经典近似式已足够精确地给出这一类辐射的频谱. 因此, 在温度 T °K 时, 一个“黑体”辐射器应当有着流量密度 $S \propto \nu^2 T$. 这样, 对于黑体辐射器谱指数(频率函数的指数)为 $\alpha = 2$. 行星、月球和太阳的谱属于这种普通的类型(此外, 太阳和木星还含有变化的非热辐射成分), 与之相应的射电亮温度和用其他方法测定的这些天体的温度相当符

合. 太阳亮温度从频率标尺的一端到另一端的变化量约为100倍. 高温辐射来自太阳的外层大气(日冕), 它的温度达几百万度, 并且对低频辐射是不透明的. 对于高频辐射, 它是透明的. 因此, 到达地球的高频辐射是从冷得多(约 10^4 K) 的太阳表面层来的. 半透明区域只能发出通常黑体辐射的一部分, 这部分辐射正比于不透明度(光学深度). 对于非常“薄”(主要由电离氢组成)的区域, 不透明度又正比于 $1/\nu^2$. 由于黑体辐射正比于 ν^2 , 因此半透明区域谱指数 $\alpha = 0$ (“平的”谱), 而流量密度不依赖于频率, 一直到了低频段, 这种(半透明)区域才变成完全不透明, 而频谱曲线有着黑体辐射器的斜率. 猎户座星云的频谱就是这种普遍情况的一个例子, 但它由于星云中存在有几个不同密度的区域而变得复杂.

b) 非热辐射. 存在着比电子和离子间随机碰撞产生射电辐射的效率高得多的过程, 这些过程统称为非热辐射. 其中最普通的, 看来是相对论性电子穿过磁场时受到加速而产生的同步加速器辐射(有时称为磁韧致辐射). 这种理论允许谱指数可以有一定的范围, 并且也允许个别的谱中有某些弯曲, 正如实际上从许多射电源上所观测到的那样. 同步加速器机制发出的辐射应当有线偏振, 而这已在许多射电源里观测到, 包括银河系的普遍“背景”辐射. 非热辐射源是属于天文工作者所研究的最强和最有意义的射电源. 看来许多这样的源都极其暗弱, 远在光学望远镜威力范围之外. 目前正在大力研究这些射电源, 以及它们和宇宙论课题的关系, 例如最大尺度的宇宙的历史和几何等课题.

除了如图 1.1 所示的平滑的连续谱之外, 还存在着可用特殊接收设备来研究的谱线. 最著名的是中性氢原子的 1420 兆赫 ($\lambda = 21$ 厘米) 谱线, 以及在 1667 兆赫 ($\lambda = 18$ 厘米) 附近的羟基谱线族. 氢的某些(高 n) 复合线也已被发现. 射电

谱线之所以极为重要的原因之一，是因为我们能够根据这些谱线的多普勒频率位移来测定视向速度。利用中性氢 21 厘米谱线的观测，已经绘出了银河和许多河外星系一般结构和运动的天图。

太阳是最强的也是最变化多端的射电源。除了热致的“宁静”太阳的辐射之外，还存在太阳活动区的非热辐射。在辐射“爆发”时，它的流量密度可以增大到 10^{-18} 瓦米⁻²赫⁻¹，或者在活动高年时还要更强些。但是它依然远小于太阳在光学频段里的正常辐射流量。

天空其他射电辐射源都比太阳弱，但不象光学天文相差那么大。地球大气对无线电波的散射远小于对光波的散射。如果需要的话，某些射电天文测量可以在白天进行。在射电窗口的上限波长，即 $\lambda = 20$ 米附近大部分的银河系普遍背景辐射在每单位立体角里发出的射电辐射（或称射电亮度），是可以和宁静太阳的辐射相比拟的。在 3 米波长，它降到小于宁静太阳辐射的 1%。而在厘米波段，背景甚至没有什么影响了。这些变化显示宁静太阳和背景的频谱之间的区别。

北天的两个源，即著名的仙后座和天鹅座的射电源，当波长较长时，在地面上接收到的射电能流与宁静太阳可以不相上下。其他射电源都比较弱，而对于较弱的源，可能测到的数目迅速地增加。如果所有射电源的辐射功率都相等，又均匀地分布在欧几里德空间里，那么流量密度 $S \geq S_0$ 的射电源总数 n 将正比于 $S_0^{-1.5}$ 。由于它在宇宙论上的重要性，所以十多年来， n 和 S_0 之间的关系一直吸引着射电天文工作者的注意。

如果射电源的角大小超过射电望远镜的主响应（瓣），就说它可被分辨。在这种情况下，射电望远镜所测到的是在望远镜主瓣内那一部分射电源所辐射出来的流量。这个量称为

射电源个别区域的射电亮度 B ，我们将在下一章里讨论它。

1.3 连续孔径射电望远镜

1.3.1 抛物反射面天线

为天文研究而专门设计的第一架射电望远镜，是由 Grote Reber^[101] 于 1937 年建成的。这是一个旋转抛物面，是光学反射望远镜的无线电类比，也是赫芝在他早期无线电波试验中所用过的第一架定向无线电天线的后裔。

几何光学对于抛物反射面射电望远镜的研究只能起有限的作用。光线、直线传播、几何阴影等概念作为精确的波传播方程的近似，当现象的尺度远大于波长时，这些近似是可以应用的。这些概念对于光学很有用，因为光的波长 ($\sim 5 \times 10^{-5}$ 厘米) 与大部分光学仪器 (反光镜，透镜，肉眼等) 相比是很微小的。需要专门的实验才能显示出光的衍射效应。另一方面，在射电天文里，我们遇到的波长是与人造的设备同数量级 (毫米到几十米)，因而“光线”、“阴影”和类似的概念仅能作为射电望远镜工作模型的粗糙描述。

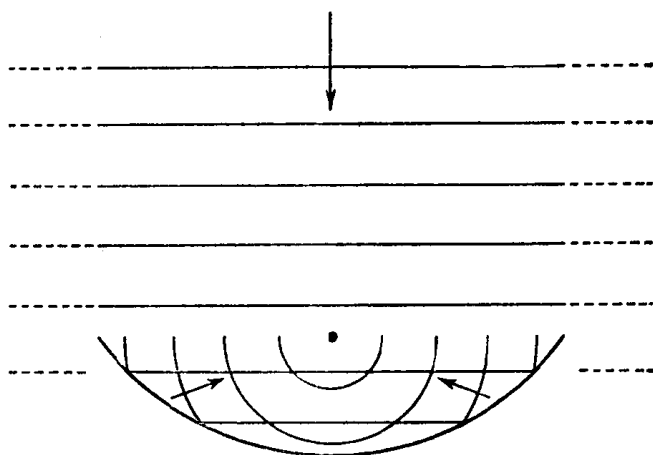


图 1.2 抛物反射面对平面波的衍射及合成的收敛球面波系统