

天体物理基础和方法丛书

射电天文方法

王绶琯 吴盛殷 等 编著
崔振兴 阎元宜

科学出版社



55.7
125

天体物理基础和方法丛书

射电天文方法

王绶琯 吴盛殷 等 编著
崔振兴 阎元宜

科学出版社

1988

DL76/23
15

内 容 简 介

射电天文学方法是研究在波长约为1毫米到几十米的范围内,应用当代的天线、无线电接收机、数字控制和处理等技术,对极其微弱的天文目标进行高精度的辐射定标、高精度测量、高质量成图的方法。全书共分两部分:第一部分第一章至第六章由浅入深系统地介绍射电望远镜、干涉仪、甚长基线干涉仪和综合孔径系统的原理和结构,主要侧重于物理概念的阐述。第二部分第七章至第十二章主要是第一部分的应用:分别介绍了辐射定标、定位、偏振、频谱的测量方法,以及特殊射电源的测量和数字技术的应用等,并提供了必要的数据和资料。

本书可供天文和有关的无线电工作者,以及有关专业高年级学生、研究生阅读参考。

天体物理基础和方法丛书

射 电 天 文 方 法

王绶琯 吴盛殷 等 编著
崔振兴 阎元宜

责任编辑 夏墨英

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

*

1988年2月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1988年2月第一次印刷 印张: 13

印数: 0001—950 字数: 289,000

ISBN 7-03-000137-0 / P·19

定 价: 3.10 元

前 言

射电天文学肇始于三十年代初 K. G. Jansky 对银河系射电的发现。这一发现证实了当代的无线电技术足以识察天文世界传来的无线电信息。五十余年来,天体射电的探测和研究导致了人对宇宙认识一次新的飞跃。

五十余年来,射电天文学的发展中始终贯穿着射电天文方法发展的主线。天体射电——作为当代科学中新开垦的处女地,蕴藏着无数有待发掘的宝藏。直到现在,射电天文方法的每一重要进展,都带来了重大的天文发现。

射电天文工作者不断地从同时期的无线电技术(以及其他有关技术)的迅速发展吸取“营养”,针对性地发展了用以探测天文现象的方法。这种方法的持续进步不但给射电天文研究以巨大的推动,而且也当代实用技术作出贡献。

射电天文方法,是精确测量天体无线电辐射的方法。被测量的物理量为特定天体的特定辐射强度。可以表为

$$I_p = I_p(\alpha, \delta, t, \nu),$$

其含义是:在给定的频率 ν , 测定方位为 (α, δ) 的天体在时间为 t 时的辐射 I_p 。脚标 p 表示给定的偏振模式。

对 I_p 的测量包含有两个内容:

(1) I_p 的定标 $\hat{I}_p$ ——辐射的“绝对测量”值。

(2) 测量辐射的精确度 ΔI_p ——通常称为“灵敏度”(也可以看作是辐射测量的“分辨率”)。

测量 I_p , 只有在明确的 (α, δ) , t 和 ν 的定义下才具有意义。这就是需要定出:

- (3) 被测天体的方位均值 (α, δ) ——方位定标。
- (4) 方位测量的“空间分辨率” $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ 。
- (5) 进行测量时的时间均值 t ——时间定标。
- (6) “时间分辨率” Δt 。
- (7) 测量所用的频率均值 ν ——频率定标。
- (8) “频率分辨率” $\Delta\nu$ 。

射电天文测量的水平体现在以上各种测量的“分辨率”和定标的精度上。上列 8 项中，一部分主要是由“通用”技术解决，例如时间分辨率、时间定标、频率定标等。另一部分则主要是针对天文应用而得到发展的技术和方法，其中处于关键地位的是灵敏度 ΔI 和空间分辨率 $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ 。这种关键性是易于理解的，因为它们分别代表着“看得见”和“看得清”的限度。

五十余年来射电天文方法的进步是惊人的。我们虽不准备在这里评述这一时期的历史，但是应当指出，当代无线电技术（以及与射电天文有关的其他技术）的更新率如此之高，以致书中一切关于具体技术内容的叙述都必将很快失去时效。为此，我们在涉及必要的元件、器件、材料、仪器…的介绍时，将侧重于它们的作用原理，以及把它们作为当前技术水平的示例。

全书分为两部分¹⁾。第一部分六章及有关附录，由王绶琯、吴盛殷、崔振兴、阎元宜撰写。这一部分在第一章“导论”之后，系统地介绍各类射电望远镜和射电干涉仪的工作原理、作用和结构。在叙述中我们侧重物理概念，而将一些数学推导以及可供工作参考的实用数据和材料归入附录。这一部分是本书的主体，旨在向读者循序阐明当前射电天文方法的基

1) 本书不包括雷达天文。

本构思和实际应用。书中的许多叙述借助于配图，图上的文字与正文并重。

第二部分——第七至第十二章，各章独立介绍一项射电天文方法的专题，分别由七位作者执笔：傅其骏，“绝对定标”；罗先汉，“偏振测量”；彭云楼，“脉冲星测量”；秦志海，“谱线测量”；梁宝鑫、崔振兴，“定位与射电源表”；邱育海，“数字技术”。这些专题是射电天文方法的重要组成部分，具有很强的技术性。本书中反映了到1984年为止的内容。

本书附录中包含对射电天文工作者有用的数据和材料，是正文的重要补充。

四十年代以来射电天文学不乏专著，各有所长，足资参考。以下四种是本书中引用较多的著作：

[1] Christiansen, W. N., Högbom, J. A., *Radio Telescopes*, Cambridge Press, 1969.

(中译本：《射电望远镜》，陈建生译，王绶琯、郭成光校，科学出版社，1977年。)

[2] Bracewell, R. N., *Radio Astronomy Techniques*, Handbuch Der Physik, Ed. Flugge, S., Freiburg, Vol. L. IV, 42—129.

[3] *Methods of Experimental Physics*, Vol. 12, Part B: Radio Telescopes, Ed. Meeks, M. L., Academic Press, 1976.

[4] *Methods of Experimental Physics*, Vol. 12, Part C: Radio Observation, Ed. Meeks, M. L., Acad. Pr. 1976.

其中[1]，[2]两种可以作为通述的典型，对射电天文方法原理的陈述，多有可取之处。[3]，[4]两册集射电天文各项技术的专题，足以供实际工作之参考。

全书内容的校核由王绶琯，崔振兴负责。周莉参加了本书的部分编写。书中插图的描绘均出自赵景芝之手，她还为稿件的誉写付出了巨大的劳动。

王绶琯

1985 年于北京

目 录

前言

第 一 部 分

第一章 导论	1
§ 1.1 射电天文的研究对象——天体射电的特点...	1
1.1.1 大气无线电窗口	1
1.1.2 划分给射电天文的频率(波长)范围	2
1.1.3 射电望远镜所接收的天体信息	2
§ 1.2 射电天文的基本设备——射电望远镜概述...	6
1.2.1 射电望远镜的主要性能	6
1.2.2 射电望远镜的主要类别	10
1.2.3 射电望远镜中的基本物理过程	11
§ 1.3 射电天文的测量方法概述.....	16
§ 1.4 本章要点复述.....	18
1.4.1 射电天文测量的基本内容	18
1.4.2 射电望远镜的基本性能之一——灵敏度	19
1.4.3 射电天文测量的两种途径	19
第二章 射电望远镜原理	20
§ 2.1 天线孔径.....	20
2.1.1 二维孔径的权分布、转移函数、方向图	20
2.1.2 天线有效面积和孔径效率	21
2.1.3 相关干涉类作为射电望远镜天线孔径的基础 结构	22

§ 2.2 天体射电图象测量原理	33
2.2.1 扫描成象与天线平滑效应	33
2.2.2 分立采样原理	36
2.2.3 机械扫描与电扫描	38
§ 2.3 接收机中的过程	40
2.3.1 总功率接收机	40
2.3.2 相关接收机	42
§ 2.4 灵敏度	44
2.4.1 系统噪音及前置放大器的作用	45
2.4.2 信号的混淆与损失	46
2.4.3 噪音对于干涉信息的混淆	48
2.4.4 最低可测信号和最低可测射电源	49
2.4.5 “分辨率限制”问题	50
§ 2.5 本章要点复述	53
2.5.1 天体流密度 S 的测量归结到 $A_{\max}$ 的求出	53
2.5.2 相关干涉法在设计方向图形上的优点	54
2.5.3 扫描成象——几个极其有用的关系	54
2.5.4 接收机与灵敏度	55
第三章 连续孔径射电望远镜	56
§ 3.1 旋转抛物面射电望远镜	56
3.1.1 旋转抛物面天线的基本性能和参数	58
3.1.2 抛物面天线的馈源和照明问题	64
3.1.3 天线反射面误差的影响及其消减	69
3.1.4 旋转抛物面射电望远镜的跟踪问题	74
§ 3.2 特殊类型的连续孔径射电望远镜	75
3.2.1 抛物柱面射电望远镜	76
3.2.2 带状抛物面射电望远镜	77
3.2.3 可变轮廓射电望远镜	77
3.2.4 球面射电望远镜	78
§ 3.3 本章要点复述	79

3.3.1	抛物面射电望远镜的方向图形	79
3.3.2	对抛物面射电望远镜的机械要求	80
3.3.3	旋转抛物面射电望远镜与柱形、带形、球形 反射面	80
第四章	射电干涉仪	82
§ 4.1	“总功率接收型”干涉仪	82
4.1.1	Michelson 型干涉仪	82
4.1.2	栅式干涉仪	87
§ 4.2	相关干涉仪	89
4.2.1	双天线相关干涉仪的结构和主要参量	90
4.2.2	复合干涉仪	91
4.2.3	人工条纹与“条纹跟踪”	95
4.2.4	频带宽度的消条纹效应和人工时延	96
4.2.5	实际干涉仪的接收过程	101
4.2.6	干涉参量的全面记录	103
4.2.7	可见度函数	103
§ 4.3	本章要点复述	104
4.3.1	总功率接收型干涉仪作为非连续孔径射电 望远镜	104
4.3.2	相关干涉仪的几个主要特征	105
4.3.3	两个待讨论的问题	106
第五章	综合孔径射电望远镜	107
§ 5.1	综合孔径射电望远镜的基本原理与主要性能	107
5.1.1	综合孔径射电望远镜的基本公式及其涵义	107
5.1.2	转移函数与综合功率方向图	111
5.1.3	综合孔径系统的灵敏度	115
5.1.4	条纹信息的保持	117
§ 5.2	实际综合孔径射电望远镜	120
5.2.1	三维性质及实用坐标系统	120
5.2.2	东-西阵地球自转综合	124

5.2.3	转移函数 $C(u, v)$ 在 $(u - v)$ 平面上的覆盖	128
5.2.4	图象处理与动态范围	130
5.2.5	实际综合孔径射电望远镜总体结构	136
§ 5.3	各种误差及相位的改正措施	136
5.3.1	安装和机械误差	136
5.3.2	参考系变动所引起的误差	137
5.3.3	传播、传输和电路系统中的误差	137
§ 5.4	本章要点复述	139
5.4.1	综合孔径射电望远镜的基本工作原理	139
5.4.2	采样问题	139
5.4.3	坐标选择问题	140
5.4.4	动态范围问题	140
第六章	甚长基线干涉仪 (VLBI)	142
§ 6.1	甚长基线干涉仪的作用和基本结构	144
6.1.1	甚长基线干涉仪作为双天线相关干涉仪的延伸	144
6.1.2	甚长基线干涉仪的观测对象和工作要求	146
6.1.3	实现甚长基线干涉的技术要素	148
6.1.4	一个典型甚长基线干涉仪的结构方框	153
6.1.5	甚长基线干涉阵	153
§ 6.2	甚长基线干涉的技术限制和一些对策	154
6.2.1	频带宽度问题	155
6.2.2	相位起伏问题	158
6.2.3	自校准方法	162
§ 6.3	甚长基线干涉仪各个组成部分的结构	166
6.3.1	天线现场部分	166
6.3.2	回放及处理部分	170
§ 6.4	本章要点复述	172
6.4.1	甚长基线干涉方法的主要问题	172
6.4.2	相位稳定度问题	173
6.4.3	频带宽度	173

6.4.4 自校准问题	173
-------------------	-----

第 二 部 分

第七章 天体射电的绝对定标	175
§ 7.1 基本原理	176
§ 7.2 天线温度的测量	178
7.2.1 接收机的校正和稳定性	179
7.2.2 噪音功率标准	179
7.2.3 背景辐射	182
§ 7.3 流量密度的绝对测量	186
7.3.1 天线有效接收面积的测量	186
7.3.2 大气吸收	189
7.3.3 射电流量测量	190
§ 7.4 面源(天区)亮度的测量	192
§ 7.5 射电标准源	194
7.5.1 射电标准源的建立	194
7.5.2 对校准用的射电标准源的要求	195
7.5.3 射电流量标度中存在的问题	196
第八章 射电天体的偏振测量方法	201
§ 8.1 偏振状态的描述	201
§ 8.2 米波及分米波偏振计	205
§ 8.3 微波偏振计	209
§ 8.4 干涉偏振计	214
§ 8.5 偏振测量与校正问题	217
第九章 脉冲星的测量和搜索	221
§ 9.1 脉冲星的测量	221
9.1.1 脉冲星射电辐射的基本特征	221
9.1.2 消色散接收方法	223
9.1.3 周期和周期变率的测定	228

§ 9.2 脉冲星的搜寻方法·····	232
9.2.1 简介 ·····	232
9.2.2 搜寻方法实例 ·····	232
第十章 射电天文谱线测量·····	236
§ 10.1 引言 谱线测量的概况及意义 ·····	236
§ 10.2 谱线测量基础 ·····	238
10.2.1 对谱线测量设备的基本要求·····	238
10.2.2 射电谱线频率·····	240
10.2.3 射电谱线强度·····	240
10.2.4 射电谱线宽度 ·····	242
§ 10.3 单通道扫描频谱仪·····	243
§ 10.4 多通道滤波频谱仪·····	245
§ 10.5 自相关频谱仪·····	249
§ 10.6 声光频谱仪·····	254
第十一章 射电源定位和射电源表的编制·····	260
§ 11.1 射电源定位·····	260
11.1.1 双天线干涉仪定位的基本原理·····	260
11.1.2 短基线干涉仪定位测量方法·····	263
11.1.3 VLBI 定位法 ·····	268
11.1.4 月掩射电源定位法·····	271
11.1.5 定位测量的误差分析·····	275
§ 11.2 射电源表的编制·····	281
11.2.1 源表的番号和源名·····	282
11.2.2 可信度和完整性·····	283
11.2.3 覆盖天区, 极限流量和源数·····	284
第十二章 数字技术在射电天文中的应用·····	287
§ 12.1 模拟量与数字量以及它们之间的转换·····	288
12.1.1 模拟量与数字量·····	288
12.1.2 采样、量化及有关问题·····	289
12.1.3 低 bit 相关·····	290

§ 12.2 接收机硬件.....	292
12.2.1 基本考虑.....	292
12.2.2 数字相关器.....	295
12.2.3 实时数据采集子系统 (DAS).....	301
§ 12.3 计算机的联机应用.....	303
12.3.1 软件.....	303
12.3.2 接口.....	304
12.3.3 射电望远镜的实时控制.....	305
12.3.4 接收机控制与监视.....	306
12.3.5 数据采集.....	306
12.3.6 实时改正及数据监视.....	307
12.3.7 联机应用实例.....	307
§ 12.4 计算机的脱机 (Off-Line) 应用.....	310
12.4.1 概述.....	310
12.4.2 误差改正.....	311
12.4.3 成图.....	311
12.4.4 图象处理.....	312
附录 A1 地球大气的射电“窗口”	315
附录 A2 分配给射电天文使用的频率	316
附录 A3 天球坐标系	320
附录 A4 射电天文常用的 Fourier 变换公式	324
附录 A5 干涉仪模式的天线有效面积	332
附录 A6 天线参数测量的射电天文方法	335
附录 A7 干涉仪基线与射电源坐标的几何关系	347
附录 A8 可用作基准的射电源汇编	356
附录 A9 主要天区普查所得射电源表索引	372

第 一 部 分

第一章 导 论

本章作为这一本书的总的引子,将用简单的示例,阐明射电天文方法的物理内容,并给出本书中所用的各种主要物理量的定义。

§ 1.1 射电天文的研究对象——天体射电的特点

1.1.1 大气无线电窗口

广阔宇宙空间中存在着各种波段的电磁辐射,而地面上所能收到的仅仅是可以透过地球大气的那一部分辐射。大气允许透过的电磁波段范围被形象地称为“大气窗口”。传统的光学天文学只是从波长不及 $0.4\ \mu\text{m}$ (紫光)到接近 $0.7\ \mu\text{m}$ (红光)的大气窗口中获得宇宙信息。射电天文学则利用了波长大致上从 $1\ \text{mm}$ 到 $30\ \text{m}$ 的大气窗口。一些红外天文工作用了半透明的窗口,而空间天文学则破“窗”而出,到大气外去进行任何波段的天文观测。

射电天文所用的“窗口”基本情况是:在长波端主要受电离层吸收,波长愈长吸收愈强。这种吸收主要基于电子与中性分子的碰撞,程度随电子密度和碰撞频率而增加。因此,对不同的地理纬度和不同时间,吸收程度也不相同。在中纬度地区,波长 $3\ \text{m}$ 的无线电波在垂直穿过电离层时,白天和夜晚的吸收分别约为 $0.05\ \text{dB}$ 和 $0.005\ \text{dB}$ 。

射电窗口的短波端,即毫米波端,主要受到水汽、氧气和臭氧的吸收,云、雾、雨、雹在这个波段也有很大的影响。

射电窗口的主要情况和数据参见附录 A1。

1.1.2 划分给射电天文的频率(波长)范围

透过大气无线电“窗口”的波长(频率)范围大部分对应于定位业务(雷达)采用的波段,同时也是地面通讯和电视广播业务使用的范围。由于航天业务同样需要不受地球大气的拦阻,所以也和射电天文使用了相同的波段。这些情况促使这个波段的无线电技术迅速发展,对射电天文学起了十分有益的作用。但是另一方面,由于航天、定位、通讯、电视广播等业务在这一波段中发出强大的无线电波,给射电天文观测造成极其严重的干扰。国际电讯联盟(ITU)通过国际协调,在无线电法规中规定了各种业务的频率划分,其中也包括了分配给射电天文学的频率范围。这些频率照顾到天文学上重要的谱线所在,如 1400—1427 MHz 的中性氢谱线区, 1664.4—1668.4 MHz 的羟线区等;同时也在各个不同波段上划出一些频率范围,以便不受其它业务的干扰,如 37.75—38.25 MHz, 322—329 MHz, 2690—2700 MHz 等等。

附录 A2 中列出的乃是 1979 年无线电法规中分配给射电天文的各个频率范围。为了避免无线电干扰,在确定一切重大射电天文设施时,有必要参照这个法规中有关频率分配的规定。

1.1.3 射电望远镜所接收的天体信息

无线电辐射和吸收起因于带电粒子运动速度的变化(或能态的变化)。天体射电是天体上带电粒子辐射的集合效应。束缚在原子或分子中的带电粒子集体给出的辐射局限在分

立的窄频带中,称为线谱。非束缚的带电粒子集合体,辐射通常占比较宽阔的频段,表现为连续谱。由于天体中大量带电粒子的辐射是随机发生的,因此天体射电呈现为噪音的形式。对于它的测量主要是随时间平均的功率测量。我们把一具射电望远镜收到的天体射电和辐射流密度 S_ν 相联系。 S_ν 的定义为:处在某一被测方向的天体的 ν 射电波(即中心频率为 ν 的单位频带宽度的射电波)穿过平行于波前平面的单位面积的射电功率。采用 MKS 系统,量纲为 $\text{WM}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ 。在射电天文工作中,辐射流密度的单位为 Jansky (缩写为 Jy)。1 Jy 等于 $10^{-26} \text{WM}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ 。如果射电望远镜的天线在这一特定方向的有效接收面积为 A ,接收机的频带宽度为 $\Delta\nu$,则在无耗损情况下天线输出端所收到的中心频率为 ν 的天体射电功率为

$$P_\nu \Delta\nu = S_\nu A \Delta\nu. \quad (1.1)$$

这表明, S_ν 可以由观测得到的 $P_\nu \Delta\nu$ 推算得出,代表观测者收到的天体射电信息。

有效面积 A 是天线的一个参量,由校准定出。它的定义可以认为如 (1.1) 式所表达,为无耗损天线输出端接收到的电波功率 $P_\nu \Delta\nu$ 与电波通过波前平面上单位面积的功率 $S_\nu \Delta\nu$ 之比。有效面积有着面积的量纲,通常可以表为天线孔径几何面积乘以一个“效率因子”。但它不一定都是对应于一个具体的几何面积(例如,一具偶极子天线就不用几何面积的概念,但同样可以定义出一个有效面积)。对于固定于天线上的坐标基准, A 是方向角的函数,也就是说,天线对于从不同方向投来的电波有不同的有效面积。在第二章和第七章中,我们将介绍用以测量天线有效面积的实验。

天体发出的信息可以用辐射强度 B_ν 来表达,定义为从天体上垂直于辐射方向的一个单位面积、在单位频率范围、向单