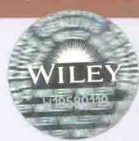


Interferometry and Synthesis
in Radio Astronomy (Second Edition)

射电天文的干涉测量 与合成孔径 (上册)

(原书第二版)

〔美〕 A.R.Thompson J.M.Moran G.W.Swenson,Jr. 著
李 靖 孙伟英 王新彪 张升伟 译



科学出版社

射电天文的干涉测量与合成孔径(上册)
(原书第二版)

Interferometry and Synthesis
in Radio Astronomy (Second Edition)

[美] A. R. Thompson J. M. Moran G. W. Swenson, Jr. 著
李 靖 孙伟英 王新彪 张升伟 译

科学出版社

北 京

图字:01-2015-2060 号

内 容 简 介

本书第1章简要介绍了干涉测量技术及其发展。第2章概况介绍了干涉及合成孔径成像原理。第3章分析了干涉仪响应,包括强度和可见度函数之间的傅里叶变换关系。第4章介绍了合成成像所需的大地坐标系和参数。第5章介绍了天线单元以及干涉仪的合成孔径天线阵列。第6~8章系统介绍了接收机系统设计和响应,包括构型变化对灵敏度的影响及数字相关器的量化效应。第9章讨论了甚长基线干涉仪(VLBI)的特殊需求。第10章介绍了可见度函数与傅里叶变换,并介绍了如何利用可见度函数导出射电图像,对谱线观测进行了讨论。第11章讨论了利用Clean反卷积算法、最大熵法、自适应定标和多频合成等非线性技术改善射电图像。第12章介绍了天体测量学和大地测量学中的精确观测。第13章讨论了导致射电干涉仪整体性能下降的因素。第14章介绍了Van Cittert-Zernike定理的验证、空间相关、散射以及相干传播。第15章讨论了射电干扰对射电干涉仪的影响。最后一章介绍了一些相关的技术,包括强度干涉测量法、月掩星观测和光学干涉测量等。

本书适合从事干涉或合成成像技术的天文学、电子工程、物理学以及相关领域大学生、硕士研究生及学者学习和参考,同时也适合射电系统工程师参考。

Copyright © 2001 by John Wiley & Sons, Inc.

© 2004 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, ISBN 978-0-471-25492-8, by A. R. Thompson, J. M. Moran, G. W. Swenson, Jr., Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

图书在版编目(CIP)数据

射电天文的干涉测量与合成孔径:原书第二版. 上册/(美)A. 理查德·汤普森(A. Richard Thompson)等著;李靖等译. —北京:科学出版社,2016. 9

书名原文:Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy

ISBN 978-7-03-049835-9

I. ①射… II. ①A… ②李… III. ①射电天文学-干涉测量法 IV. ①P164

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 212401 号

责任编辑:周 涵/责任校对:彭 涛

责任印制:张 倩/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年9月第一次印刷 印张:18

字数:343 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

献给

*Sheila, Barbara, Janice,
Sarah, Susan, and Michael*

*...truste wel that alle the conclusiouns that han ben founde, or elles
possibly mighten be founde in so noble an instrument as an
Astrolabie, ben un-knowe perfitly to any mortal man...*

GEOFFREY CHAUCER

A Treatise on the Astrolabe

circa 1391

原书作者

A. Richard Thompson

National Radio Astronomy Observatory

James M. Moran

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

George W. Swenson, Jr.

University of Illinois at Urbana-Champaign

译者序

宇宙是从什么时候诞生的？又是怎样诞生的？生命是如何起源的？人类大约从公元前 400 年就开始了对宇宙的探索，但人类对于宇宙的正确认识始于 1543 年哥白尼提出的日心说。1609 年，开普勒揭示了地球和行星都在椭圆轨道上围绕太阳公转；同年，伽利略首先利用望远镜观测天空，用大量观测数据证实了日心说的正确性。1687 年，牛顿提出了万有引力定律，揭示了天体运动内在的力学原因。弗里德里希·威廉·赫歇尔首创采用取样统计的方法，利用自己设计的大型反射望远镜测出了天空中大量选定区域的星数以及亮星和暗星的比例，并于 1785 年首次获取银河系结构图，奠定了银河系的概念。1924 年，哈勃利用造父视差法测量仙女座大星云等的距离，确认了河外星系的存在。

综上所述可以看出，每次对宇宙认识的重大突破都是在理论的指导下，通过大量的观测数据进行证实，这些可靠的观测数据来自观测设备——望远镜。随着望远镜口径的增大，角度分辨率也得到不断提高，但单一天线的角度分辨率远远不能满足天文学的观测需求。直径为 8m 的大型望远镜的衍射极限约为 $0.015''$ 。FAST 是迄今为止世界上最大的单口径天线，其直径为 500m，对应 3GHz 频率角度分辨率也只有 $0.5''$ 。而射电干涉技术能够提供的目标绝对位置精度为 $0.001''$ ，相对位置精度为 $0.00001''$ 量级或更高。

可以说，射电干涉仪是认知宇宙、探索宇宙最重要的观测手段，2016 年 2 月第一次探测到引力波的激光干涉引力波天文台 (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO) 也是干涉仪，只不过其工作频率为光学频率。

2010 年 3 月，国务院第 105 次常务会议批准了中国科学院组织实施战略性先导科技专项。空间科学战略性先导科技专项为首批启动的先导专项，其目的就是研究空间科学、探索宇宙的奥秘。

由 WILEY-VCH 出版公司出版，美国 A. Richard Thompson, James M. Moran, George W. Swenson, Jr. 编著的 *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy* 一书系统介绍了在天文观测中具有重要作用的射电干涉仪涉及的所有研究内容，是空间天文和空间探测领域一本不可多得的好书。

希望此书的翻译和出版能够供我国从事空间科学研究工作的科技工作者学习以及阅读参考，推动我国空间天文和空间探测研究的更快发展，为空间科学战略性先导科技专项贡献微薄之力！

祝贺量子科学实验卫星发射成功！

译者

2016 年 8 月 16 日于酒泉卫星发射中心

第二版序言

半个世纪以来,射电干涉技术应用于天文学观测取得了显著的科学进步。自本书第一次出版的 1986 年始,第一个用于甚长基线干涉仪(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)的甚长基线阵列(Very Long Baseline Array, VLBA)的研究进展和包括在轨天线的 VLBI 网络的全球化,提高了谱线观测重要性以及设备观测射电频谱低频和高频的性能。在射电频谱的高频端,毫米波阵列包括 BIMA (Berkeley-Illinois-Maryland Association) 射电望远镜, IRAM (Institut de Radio Astronomie Millimétrique) 射电望远镜,野边山射电天文台(Nobeyama Radio Observatory, NRO)以及欧文斯谷射电天文台(Owens Valley Radio Observatory, OVRO)目前的观测能力相对于 1986 年得到了大大提高。亚毫米波阵列(Submillimeter Array, SMA)以及国际合作研制的阿塔卡玛大型毫米波天线阵列(Atacama Large Millimeter Array, ALMA)正在建造中。在射电频谱的低频端,由于电离层的干扰和大视场成像,探测频率可低至 75MHz 的甚大阵列(Very Large Array, VLA)以及探测频率可低至 38MHz 的巨米波射电望远镜(Giant Meter-wave Radio Telescope, GMRT)已经在调试中。澳大利亚射电望远镜以及多单元射电链路干涉仪网络提高了厘米波段的探测能力。

鉴于上述的科学技术进步,对原书进行了本次修订。本书内容不但更新至迄今为止的射电干涉技术的发展情况,而且扩展了其范围,提高了其可理解性和通用性。为了与射电天文通用符号保持一致,修订了第一版中采用的一些符号。每一章都加入了新内容,包括新的图和很多新的参考文献。第 3 章介绍了干涉仪响应的基本分析,第一版第 3 章中的主要内容的一些外围讨论被压缩并移至后面的章节中。对第一版第 4 章中极化的内容进行了扩展。第 5 章中增加了天线理论的简要介绍。第 6 章包含了设备构型变化时相应的灵敏度的讨论。第 10 章包含了谱线观测的讨论。第 13 章增加了大气相位校正新技术,以及毫米波段现场测试数据和技术的介绍。新增的第 14 章内容包括 Van Cittert-Zernike 定理的验证、空间相关和散射的讨论,部分内容来自于第一版的第 3 章。

特别感谢修订过程中进行审读及提供其他帮助的专家和学者。他们有 D. C. Backer, J. W. Benson, M. Birkinshaw, G. A. Blake, R. N. Bracewell, B. F. Burke, B. Butler, C. L. Carilli, B. G. Clark, J. M. Cordes, T. J. Cornwell, L. R. D'Addario, T. M. J. Dame, J. Davis, J. L. Davis, D. T. Emerson, R. P. Escoffier, E. B. Fomalont, L. J. Greenhill, M. A. Gurwell, C. R. Gwinn, K. I. Kellermann, A. R. Kerr, E. R. Keto, S. R. Kulkarni, S. Matsushita, D. Morris, R. Narayan, S.-K. Pan, S. J. E. Radford,

R. Rao, M. J. Reid, A. Richichi, A. E. E. Rogers, J. E. Salah, F. R. Schwab, S. R. Spangler, E. C. Sutton, B. E. Turner, R. F. C. Vessot, W. J. Welch, M. C. Wiedner, J. -H. Zhao。感谢 J. Heidenrich, G. L. Kessler, P. Smiley, S. Watkins, P. Winn 对本书文字和图表的整理和准备。感谢 P. L. Simmons 对本书文字和图表整理、准备以及编辑所做的大量工作。感谢美国国家射电天文台(National Radio Astronomy Observatory, NRAO)台长 P. A. Vanden Bout 以及哈佛-史密松森天体物理中心(Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, CfA)主任 I. I. Shapiro 的鼓励和支持。NRAO 由美国联合大学股份有限公司(Associated Universities, Inc.)管理,与美国国家科学基金会有合同关系。CfA 由美国哈佛大学和华盛顿史密松森学会管理。

A. RICHARD THOMPSON
JAMES M. MORAN
GEORGE W. SWENSON, JR.

夏洛茨维尔,弗吉尼亚州
坎布里奇,马萨诸塞州
厄巴纳,伊利诺伊州
2000 年 11 月

第一版序言

应用于天文学和天体测量学的射电干涉技术在过去四十年里得到了巨大发展。能够达到的角分辨率从度量级提高到毫角秒量级,改善了六个量级。随着合成成像阵列的发展,射电领域的技术在提供天文学图像最精细的角度细节方面超越了光学领域的技术。该研究进展也给天体、地极和地壳运动的测量提供了新功能。这些研究进展所涉及的理论和技术仍然在持续发展,但迄今已达到足够的成熟度,能够提供详细论述和解释。

本书主要供希望利用干涉或合成成像技术的天文学、电子工程、物理学以及相关领域大学生以及学者学习和参考。撰写时也考虑了射电系统工程师的需求,并且包括了重要参数的讨论以及所涉及设备类型的容差。本书旨在阐明干涉技术的基础理论,对实现的细节不做讨论。特定设备的硬件及软件实现细节通常都是专门的,并随着电子工程及计算机技术的发展而改变。在理解本书所述原理的基础上,读者应该能够领会大多数天文台用户指南中的说明书和设备详细信息。

本书不是来源于任何讲座,但本书所包含的内容可以用作大学的教材。一个掌握射电干涉技术的教师,应该能够根据天文学、工程学或者其他领域的需要给出具体指导。

本书第1章和第2章对射电天文学的基础理论、射电干涉发展的短期历史以及干涉仪的基本操作进行了简要回顾。第3章讨论了干涉测量与部分相干理论的潜在关系,第一遍阅读时可忽略这一章。第4章介绍了描述合成成像所需的坐标系和参数。第5章介绍了多单元合成阵列的天线构型。第6章到第8章系统介绍了接收机系统设计和响应,包括数字相关器的量化效应。第9章讨论了甚长基线干涉仪(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)的特殊需求。以上这些内容详述了复可见度函数的测量,由此引出了第10章和第11章所讨论的如何导出射电图像的方法。第10章给出了基本的傅里叶变换法,第11章给出了同时考虑了定标和变换的更加健壮的算法。第12章介绍了天体测量学和大地测量学中的精确观测。第13章讨论了导致射电干涉仪整体性能下降的因素,即在大气、行星际空间和星际介质中的传播效应。第14章讨论了射电干扰对射电干涉仪的影响。本书花了一定的篇幅讨论了传播效应,因为传播效应涉及很大范围内的复杂现象,这些现象限制了测量的精度。最后一章介绍了一些相关的技术,包括强度干涉测量法、散斑干涉测量法以及月掩星观测。

参考文献包括已发表的一些开创性的论文、其他出版物以及与本书有关的一些回顾和评论。本书也引用了大量的关于设备和观测的描述,当某些章节需要解

释干涉技术的原理或起源时,会详细给出早期的研究过程。由于本书涉及内容非常广泛,在有些情况下不同的物理量会使用同一个数学符号。最后一章之后给出了主要符号和使用量表。

本书素材仅少部分来源于已出版的文献,大部分来自于多年的积累,包括平时的讨论、研讨会、未出版的报告以及各种观测的记录。感谢我们的很多同事为此做出的贡献。特别感谢给本书进行重要审阅或其他支持的人,他们有 D. C. Backer, D. S. Bagri, R. H. T. Bates, M. Birkinshaw, R. N. Bracewell, B. G. Clark, J. M. Cordes, T. J. Cornwell, L. R. D'Addario, J. L. Davis, R. D. Ekers, J. V. Evans, M. Faucherre, S. J. Franke, J. Granlund, L. J. Greenhill, C. R. Gwinn, T. A. Herring, R. J. Hill, W. A. Jeffrey, K. I. Kellermann, J. A. Klobuchar, R. S. Lawrence, J. M. Marcaide, N. C. Mathur, L. A. Molnar, P. C. Myers, P. J. Napier, P. Nisenson, H. V. Poor, M. J. Reid, J. T. Roberts, L. F. Rodriguez, A. E. E. Rogers, A. H. Rots, J. E. Salah, F. R. Schwab, I. I. Shapiro, R. A. Sramek, R. Stachnik, J. L. Turner, R. F. C. Vessot, N. Wax, W. J. Welch。来自于其他出版物的图表在使用时进行了说明,感谢这些图表的作者和出版者同意本书使用这些图表。感谢 C. C. Barrett, C. F. Burgess, N. J. Diamond, J. M. Gillberg, J. G. Hamwey, E. L. Haynes, G. L. Kessler, K. I. Maldonis, A. Patrick, V. J. Peterson, S. K. Rosenthal, A. W. Shepherd, J. F. Singarella, M. B. Weems, C. H. Williams 在原稿的准备上所做的贡献。感谢美国国家射电天文台前一任台长 M. S. Roberts 和现任台长 P. A. Vanden Bout, 哈佛-史密松森天体物理中心(Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, CfA)前一任主任 G. B. Field 和现任主任 I. I. Shapiro 的鼓励和支持。J. M. Moran 的大部分工作是利用假期在加利福尼亚大学和伯克利大学的射电天文实验室里完成的。J. M. Moran 感谢在此期间 W. J. Welch 的友善和帮助。G. W. Swenson, Jr. 感谢 1984~1985 年度的古根海姆基金会的基金支持。最后,感谢我们所在的研究机构即国家射电天文台(National Radio Astronomy Observatory, NRAO)的支持。NRAO 由美国联合大学股份有限公司(Associated Universities, Inc.)管理,与美国国家科学基金会有合同关系。CfA 由美国哈佛大学、华盛顿史密松森学会以及伊利诺伊大学共同管理。

A. RICHARD THOMPSON
JAMES M. MORAN
GEORGE W. SWENSON, JR.

夏洛茨维尔,弗吉尼亚州
坎布里奇,马萨诸塞州
厄巴纳,伊利诺伊州

1986 年 1 月

目 录

(上册)

1 介绍与历史回顾	1
1.1 射电干涉的应用	1
1.2 基本术语与定义	2
1.3 射电干涉的发展	10
1.4 量子效应	32
参考文献	33
引用文献	35
2 干涉与合成孔径成像导论	44
2.1 平面分析	44
2.2 带宽影响	46
2.3 一维合成孔径	48
2.4 二维合成孔径	54
引用文献	56
3 干涉仪响应分析	57
3.1 强度和可见度函数之间的傅里叶变换关系	57
3.2 互相关函数和维纳-辛钦定理	64
3.3 接收机系统的基本响应	64
附录 3.1 类噪声信号的数学表达式	68
引用文献	70
4 几何关系和偏振测量	72
4.1 天线间距坐标和 (u, v) 轨迹	72
4.2 (u', v') 平面	75
4.3 条纹频率	76
4.4 可见度函数频率	76
4.5 基线定标	77
4.6 天线安装	78
4.7 波束宽度和波束形状的影响	80
4.8 偏振测量	81

附录 4.1	时角-赤纬坐标系和方位角-俯仰角坐标系的转换	97
附录 4.2	偏振椭圆携带的泄漏参数信息	97
引用文献		99
5	天线与阵列	102
5.1	天线	102
5.2	可见度函数采样	105
5.3	阵列导论	108
5.4	跟踪阵列的空间传递函数	114
5.5	线跟踪阵列	118
5.6	二维跟踪阵列	122
5.7	阵列构型总结	134
5.8	影响阵列设计的其他重要因素	135
参考文献		136
引用文献		137
6	接收机系统响应	141
6.1	频率转换、条纹旋转和复相关器	141
6.2	噪声响应	154
6.3	带宽影响	167
6.4	可见度函数平均效应	172
附录 6.1	边带的部分抑制	175
引用文献		176
7	模拟接收机系统设计	179
7.1	接收机的主要子系统	179
7.2	本振及相位稳定度概述	186
7.3	信号通道的频率响应	197
7.4	极化失配误差	202
7.5	相位开关	203
7.6	自动电平控制与增益定标	209
附录 7.1	边带分离混频器	210
附录 7.2	光纤的色散	210
引用文献		211
8	数字信号处理	216
8.1	二维高斯概率分布	216
8.2	周期采样	218
8.3	量化采样	221

8.4 数字采样精度	235
8.5 数字延时电路	239
8.6 数字信号的正交相移	239
8.7 数字相关器	240
附录 8.1 $\sum_{q=1}^{\infty} r_{\infty}^2(q\tau_s)$ 求值计算	252
附录 8.2 二阶量化概率积分	253
附录 8.3 四阶量化修正	254
引用文献	255
符号表	258
英中文对照索引	269

1 介绍与历史回顾

本书的主题大致可以描述为利用射电干涉原理,对宇宙辐射源产生的自然射电信号进行测量。这种测量方法主要用于天文学、天体测量学和大地测量学等领域。本章作为介绍,内容主要包括射电干涉技术的应用、一些基本术语与概念,以及设备和使用的历史发展等。

1.1 射电干涉的应用

射电干涉和合成阵列的基本组成是两单元干涉仪,用来测量来自天空的射电辐射的精确角度。对于许多天文目标的测量来讲,单一射电天线的角度分辨率是不够的。角度分辨率被实际应用限制为几十角秒。例如,波长为 7mm 的 100m 直径天线的波束宽度约为 $17''$ 。在光学波段,直径约为 8m 的大型望远镜的衍射极限约为 $0.015''$,由于对流层湍流有影响,传统技术在地面上可得到的角度分辨率被限制在 $1''$ 左右。在天文学进展中,能够用光学和其他谱段的电磁波识别检测到物体,并以足够的精度测量射电源的位置尤为重要。在射电和光学谱段范围内,以类似的角度分辨率对目标源强度、偏振和频谱等参数进行测量也非常重要,射电干涉测量使此类研究变得可行。

天体测量学中关注的是星体及其他宇宙目标角度位置的精确测量,包括地球轨道运动以及物体自身运动产生的视差所引起的天体位置微小变化研究。这些测量是宇宙距离尺度建立的关键步骤。天体测量也给检验广义相对论和建立太阳系动力学参数提供了一种方法。天体测量过程中的关键是建立天体位置的参考坐标系,以遥远的大质量物体作为位置参考的坐标系比较理想。对于射电距离测量,目前河外致密射电源提供了建立此类坐标系统的最佳特征目标。射电技术提供的目标绝对位置精度为 10^{-3} 角秒量级,小角间距物体相对位置精度为 10^{-5} 角秒量级或更低。穿过地球大气进行的星像光学测量,位置精度约为 $0.05''$ 。然而,Hipparcos(伊巴谷)卫星星像的测量精度为 $\sim 1\text{mas}$ ^①,NASA 空间干涉任务(space interferometry mission)光学测量承诺的位置精度为 $\sim 4\mu\text{as}$ 。

作为测量过程的一部分,天体观测包括设备相对于天体参考坐标系的定向。因此,地基观测为地球提供了相对方向参数变化的测量。除了众所周知的旋转轴

① $1\text{mas}=0.001''$ 。

的进动和章动外,地轴相对地球表面还存在无规则的移动,此移动称为极移,归因于太阳和月球的引力效应引起的地球赤道的隆起,以及地球地幔、地壳、海洋和大气的动力效应。相同原因使地球旋转角速度增加,表现为对世界时系统必须进行修正。在地球动力学研究中方位参数的测量非常重要。20 世纪 70 年代,人们清楚地认识到射电技术能够提供这些效应的精确测量,20 世纪 70 年代后期,第一个致力于世界时和极移监测的射电计划由美国海军天文台、美国海军研究实验室、NASA 和国家大地测量局联合提出并开展研究。极移也可通过卫星观测进行研究,特别是 GPS 卫星,但远距离射电源提供了地球转动测量的最佳标准。

除了揭示地球在运动和方向上的角度变化外,精确干涉测量能对两个距离为 $\sim 100\text{km}$ 或更远的天线矢量进行天文定位,定位精度比传统大地测量技术的精度更高。甚长基线干涉测量技术(VLBI)的天线间距为几百或几千公里,第一次利用 VLBI 测量天线间距,就可以将不确定性从 1967 年的几米降低到几毫米。位于不同构造板块的远距离站点间的相对平均位移为每年 $1\sim 10\text{cm}$,并被 VLBI 网络大量跟踪。干涉技术也曾用于月球车的跟踪和航天器位置的确定。在本书中,我们主要关注来自天体的自然信号的测量。射电干涉测量能够获得高角度分辨率的部分原因是射电信号可以用电子学的方法进行处理,并且地球中性大气在短波波段引起的相位变化不甚严重。未来在地球大气层以上的观测技术将在红外和光学波段提供更高分辨率。然而射电波在天文学研究中仍然至关重要,射电能够揭示在其他谱段没有辐射的天体,并能穿透会引起光学波段图像模糊的银河尘埃云。

1.2 基本术语与定义

本节写给不是很熟悉射电天文学基础知识的读者,在接近射电干涉测量主题之前,先简单回顾一些背景信息是有意义的。

宇宙信号

来自宇宙源的辐射在天线处感应出的电压通常称为信号,尽管在一般工程意义上它不包含信息。这些信号由自然过程产生,并且几乎普遍表现为高斯随机噪声。也就是说,接收天线的终端电压作为时间的函数可描述为一系列非常短的随机脉冲,所形成的波形的幅度是高斯分布。在带宽 Δf 内,射电频率波形的包络表现出随机变化,持续时间为 $1/\Delta f$ 。对于大多数射电源信号,其特征表现为信号不随时间变化,至少在射电天文典型的分钟或小时量级的观测时间内信号不发生变化。这种类型的高斯波形被假定为与电阻、放大器产生的噪声电压特性相同。一般假设这类波形具有平稳性和各态历经性,即统计平均和时间平均收敛到同一值。

大多数射电源的功率谱是连续的。功率谱显示的是功率随频率的缓慢变化,相对大多数设备的带宽而言功率谱可认为是恒定的。图 1.1 给出三个射电源的连续功率谱。银河系天鹅座 A 和类星体 3C48 的射电辐射是同步辐射[参见 Rybicki and Lightman (1979), Longair (1992)两篇文献],其中磁场中的高能电子辐射是其轨道运动的结果。辐射电子通常符合极端相对论,在此条件下每个电子的辐射都集中在其瞬时运动方向上。当电子轨道运动在或接近包含观测者的平面时,观测者便能够观测到所产生的辐射脉冲。观测到的辐射偏振主要是线偏振,圆偏振分量一般很小。但是,一个射电源的总的线偏振通常不是很高,原因是法拉第旋转和射电源内磁场方向的变化导致其偏振具有随机性。电子产生的电磁脉冲功率集中在回旋频率的高次谐波上,电子能量连续分布导致其射电频谱是连续的。这些电子的单个脉冲太多以至于不可区分,其电场表现为均值为零的连续随机过程。作为频率函数的频谱变化与电子能量分布的斜率有关。如图 1.1 中的类星体,比射电银河更加致密,其电子密度足够高且磁场足够强,会在低频段产生辐射自吸收。

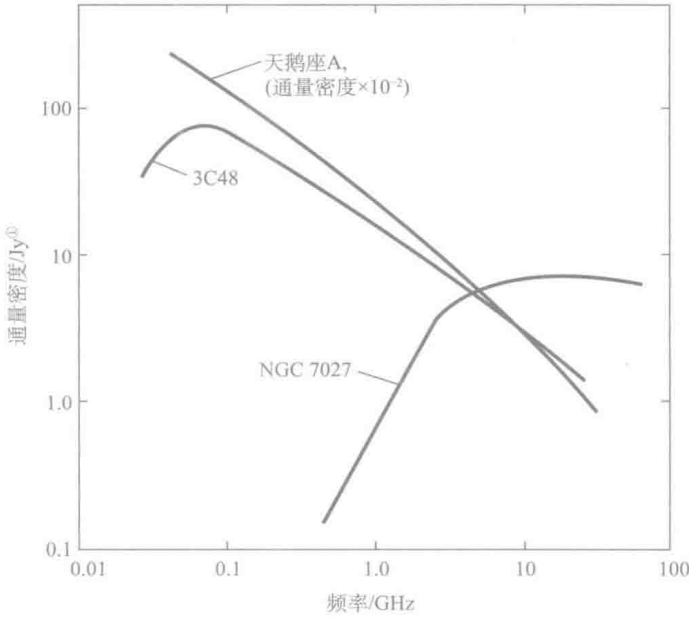


图 1.1 三个离散射电源的连续功率谱:银河系天鹅座 A、类星体 3C48、银河系电离星云 NGC7027
数据来源为 Conway, Kellermann and Long (1963); Kellermann and Pauliny-Toth (1969); Thompson (1974)

NGC7027 的频谱如图 1.1 所示,它是银河系内的行星状星云,其中心恒星的辐射使气体电离。射电等离子体中自由电子和离子之间自由碰撞产生热射电辐

① $1\text{Jy}=10^{-26}\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。