

SHEN CHANG JI XIAN GAN SHE CE LIANG JI SHU

甚长基线 干涉测量技术

林克雄 编译

宇航出版社

甚长基线干涉测量技术

林克雄 编译

宇航出版社

内 容 简 介

本书从实用的角度出发,较全面、系统地介绍甚长基线干涉测量(VLBI)技术,包括基本原理、几何原理、信号与噪声分析、数据处理方法及误差讨论、实验方法和仪器设计,并详细介绍了第三代VLBI设备的数据捕获和数据处理系统。

本书可供天文、地球物理、大地测量及空间技术等部门中从事天文和大地测量的科技人员及相应专业的高等院校师生参考。

甚长基线干涉测量技术

林克雄 编译

宇航出版社 出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

测绘出版社印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张: 13.75 字数: 317千字

1985年8月第一版 第一次印刷

印数: 1—3000

统一书号: 15244.0009 定价: 3.20元



前 言

甚长基线干涉测量（通常简称为 VLBI）技术是六十年代末才发展起来的一门新兴的测量技术。在天文和大地测量的许多方面，它的测量精度往往比其他测量方法的精度高出两个数量级以上，因而对于天文、地球物理、大地测量及空间技术都有十分重要的意义，甚至有必定要被这些部门所采用的趋势。尽管进行这种测量需要昂贵的设备，还是有越来越多的国家开始应用这门技术。在美国，航空与航天局的哥达德宇航中心和喷气推进实验室把它的应用列为重要研究课题之一，而且从事天文和大地测量的研究单位和大学，也开始广泛采用这门技术。

在我国，已有少数单位在开展这方面的研究工作，还有许多部门已经认识到这门技术的重要性，对它有极大的兴趣。但是，由于至今国内外还没有一本较全面、系统地介绍这门技术的实用的参考书，人们对它依然比较陌生，它在我国的发展相对来说还是比较缓慢的。编译本书的目的，就是期望有更多的人能更快地了解和掌握这门技术。

VLBI 涉及的面很广，编译本书时，笔者不可能也不试图把关于 VLBI 的所有理论、工程和应用问题都包括进去，而仅从实用的角度出发，介绍了 VLBI 的最基本的理论、数据处理方法和仪器设计。笔者相信，掌握了本书介绍的基础知识，查阅有关的论文或参加这方面的研究工作就不会有很大的困难。

本书第一章简要说明 VLBI 的基本原理、发展简史及应用。第二章介绍 VLBI 的几何原理，说明如何利用 VLBI 进行天文和大地测量。第三章对信号和噪声进行了详细的理论分析，最后导出信噪比的计算公式。这也是 VLBI 仪器设计的基本依据。第四章详细论述了数据处理所用的数学方法和具体步骤，并分析了用近似方法可能产生的系统误差。第五章讨论了 VLBI 实验所采用的参数的选择。第六章介绍早期 VLBI 实验所用的仪器。第七章介绍 VLBI 的实验方法及结果分析。第八章根据第三章的结论阐述了新的 VLBI 设备的设计思想，并详细介绍第三代 VLBI 设备——MARK III 数据捕获系统的各个部分。鉴于 VLBI 实验常在国际间进行，各国使用的仪器都必须相互兼容，对仪器进行详细介绍是非常必要的。这章还介绍了水蒸汽微波辐射计，因为它也可以做为 MARK III 系统的一部分。第九章介绍 MARK III 数据处理系统的各个部分，包括相关器的逻辑设计及利用小型计算机进行数据处理的程序设计特点。附录 A——F 补充了第三章的理论分析。附录 G 给出用于精密天文和大地参数解算所需要的地球物理模型。附录 H 介绍了干涉条纹搜索的具体计算步骤，它与所用的相关器有密切联系，也是第四章介绍的处理方法的发展。

本书的第二章至第七章以及附录 A 至附录 F，经原作者 A.R.惠特尼 (A.R. Whitney) 博士的同意，由他的博士论文（马萨诸塞理工学院，1974 年）译出，编译者进行了某些补充、删节和修改，更正了原文的印刷错误，增加了一些注解。第六、七两章内容较旧，但编译者认为，保留这两章会使读者对 VLBI 实验的全貌有更清楚的了解。其余各章及附录 G、H 由笔者根据美国马萨诸塞理工学院的 Haystack 射电天文台提供的资料编写。

3 Apr 102

笔者感谢 Haystack 射电天文台惠特尼博士和 A.E.E. 罗杰斯 (A.E.E. Rogers) 博士的热心指导和帮助。在本书准备出版时, 笔者还得到国家测绘局测绘科学研究所领导和一些同志的支持和鼓励, 他们对原稿提出许多宝贵意见。对此笔者也表示衷心的感谢。

笔者水平有限, 从事这方面工作的时间又很短, 缺点和错误在所难免, 诚恳希望读者批评指教。

编译者

一九八三年四月

目 录

第一章 绪论

§1.1 干涉测量技术	(1)
§1.2 VLBI 的基本原理	(3)
§1.3 VLBI 的发展经过	(6)
§1.4 VLBI 的应用	(8)
§1.5 早期的频率切换 VLBI 实验	(10)

第二章 VLBI 几何原理

§2.1 基本的 VLBI 几何原理	(13)
§2.2 干涉测量的分辨力	(16)
§2.3 测量的灵敏度	(18)
§2.3.1 延迟和条纹率的灵敏度与模型参数的改变的关系	(18)
§2.3.2 对 $\angle\tau$ 和 $\angle\nu$ 某些特性的说明	(20)

第三章 信号和噪声分析

§3.1 观测量的最佳估计	(23)
§3.1.1 观测值的最大似然估计量 (频率域的分析)	(23)
§3.1.2 观测值的最大似然估计量 (时间域的分析)	(27)
§3.2 信号-噪声分析	(30)
§3.3 相关幅度和条纹相位的概率密度函数的计算	(35)
§3.3.1 $Ta \ll Ts$ 时的概率密度函数	(35)
§3.3.2 “无信号”情形的概率密度的另一种推导方法	(38)
§3.4 无限削波对相关系数和信噪比的影响	(40)
§3.5 群延迟和相位延迟率估计	(44)
§3.5.1 单频道延迟估计	(44)
§3.5.2 多频道延迟估计	(45)
§3.5.3 单频道延迟率估计	(45)
§3.5.4 频率切换延迟率估计	(46)
§3.6 信号检测特性	(47)
§3.6.1 信号的检测概率	(47)
§3.6.2 无信号时最大相关幅度的分布	(48)
§3.7 重要结果的总结	(50)

第四章 数据处理方法

§4.1 基本的数据处理过程	(53)
§4.2 基本延迟和延迟率估算方法	(54)

§4.3	VLBI 1 的计算方法	(56)
§4.4	VLBI 2 的计算方法	(58)
§4.4.1	交叉谱计算	(58)
§4.4.2	延迟和延迟率的初步确定	(59)
§4.4.3	延迟和延迟率的精确确定	(60)
§4.5	所采用的数据处理方法可能引起的系统误差分析	(63)
§4.6	VLBI 1 和 VLBI 2 程序的完成和检验	(70)
§4.6.1	VLBI 1 和 VLBI 2 程序的完成	(70)
§4.6.2	VLBI 1 和 VLBI 2 程序的检验	(70)
§4.7	VLBI 3 程序的简要说明	(71)
第五章	三测站频率切换 VLBI 实验的设计	
§5.1	实验的概况和目标	(72)
§5.2	观测频率的选择	(72)
§5.3	频率窗口的选择	(73)
§5.4	预计的系统性能和测量精度	(74)
第六章	早期 VLBI 实验的仪器设计	
§6.1	基本系统的说明	(76)
§6.2	馈电喇叭系统	(77)
§6.3	射频放大系统	(77)
§6.4	本机振荡器系统	(79)
§6.4.1	振荡器的噪声特性	(79)
§6.4.2	高频本机振荡器	(80)
§6.4.3	低频本机振荡器	(81)
§6.5	频率转换器和中频系统	(82)
§6.6	记录系统	(83)
§6.6.1	模拟与数字记录系统的比较	(83)
§6.6.2	NRAO 的 MARK I 记录系统	(84)
§6.7	频率标准	(85)
§6.7.1	现有各种频率标准的特性	(85)
§6.7.2	频率稳定性要求	(86)
§6.7.3	实际使用的频率标准	(87)
§6.8	OVRO 的天线和接收机	(87)
第七章	实验的经过、分析和结果	
§7.1	准备和测试	(89)
§7.2	实验的经过	(90)
§7.2.1	观测的安排和射电源的选择	(90)
§7.2.2	观测频率	(91)

§7.2.3 单次观测	(91)
§7.2.4 存在的问题	(92)
§7.3 用 VLBI 1 和 VLBI 2 进行的数据处理	(92)
§7.3.1 时钟同步的粗略确定	(92)
§7.3.2 校正相位的确定	(92)
§7.3.3 用 VLBI 1 和 VLBI 2 进行的数据处理	(93)
§7.3.4 观测结果实例	(93)
§7.3.5 延迟和延迟率闭合试验	(107)
§7.4 基线和源位置结果	(108)
§7.4.1 基线的计算	(109)
§7.4.2 基线闭合试验	(112)
§7.4.3 事后计算的残差特点	(112)
§7.4.4 VLBI 结果与传统大地测量结果的比较	(114)
§7.4.5 源位置结果	(115)
§7.5 结论	(117)
第八章 MARK III 数据捕获系统	
§8.1 MARK 系统的发展趋势	(118)
§8.2 MARK III 数据捕获系统的设计思想	(119)
§8.2.1 关于信噪比	(120)
§8.2.2 系统内部延迟误差的校正以及和时钟的同步问题	(121)
§8.2.3 对各种影响的修正	(122)
§8.2.4 自动化和灵活性	(122)
§8.3 MARK III 数据捕获系统硬件	(123)
§8.3.1 系统综述	(123)
§8.3.2 天线和接收机	(127)
§8.3.3 MAT 和 TTY 分配器	(131)
§8.3.4 中频分配器	(135)
§8.3.5 视频转换器	(137)
§8.3.6 格式转换器和译码显示器	(140)
§8.3.7 延迟校正器	(144)
§8.3.8 5 兆赫频率分配器	(147)
§8.3.9 磁带记录器	(148)
§8.4 水蒸汽微波辐射计	(151)
§8.4.1 基本原理	(151)
§8.4.2 结构	(154)
§8.4.3 数据处理	(156)
第九章 MARK III 数据处理系统	

§9.1 MARK III 数据处理系统的技术特点	(157)
§9.2 数据处理系统结构	(158)
§9.3 CAMAC 接口	(161)
§9.4 相关器的设计	(164)
§9.4.1 相关器设计的某些简化处理及对结果的影响	(164)
§9.4.2 相关器的逻辑结构	(167)
§9.4.3 MARK III 系统相关器设计的某些特点	(170)
§9.5 MARK III 系统软件	(173)

附录

关于附录的几点说明

A. 模拟互相关估计值的协方差分析	(178)
B. 规格化模拟互相关估计值的协方差分析	(180)
C. 模拟互相关和自相关估计值的互协方差分析	(183)
D. 无限削波信号的规格化互相关估计值的均值和方差	(185)
E. 直线逼近的最小二乘法复习	(190)
F. VLBI 1 和 VLBI 2 所用的计算方法的偏差	(193)
G. 高精度 VLBI 所采用的物理模型	(196)
H. MARK III 数据处理系统条纹搜索程序计算方法	(205)

参考文献

第一章 绪 论

§ 1.1 干涉测量技术

早在十九世纪初，托马斯·杨 (Thomas Young) 就发现了光的干涉现象。后来，迈克尔逊 (A.A. Michelson) 利用光干涉原理成功地进行了光速的测定和长度的测量，并广泛地发展了干涉仪的应用。在 1920 年，迈克尔逊和皮兹 (F.G. Pease) 又试图利用光波干涉原理进行天文测量，以测出亮度很高的星球（如猎户座 α ）的直径。当时迈克尔逊所用的仪器原理如图 1-1 所示。

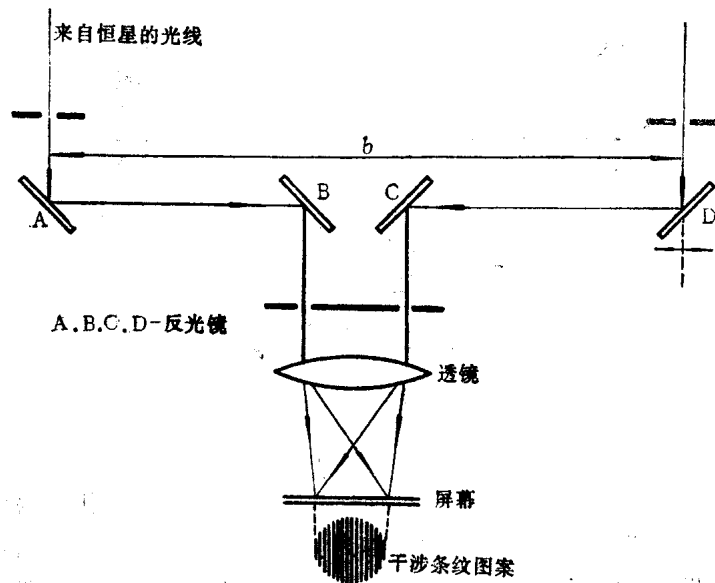


图 1-1 迈克尔逊用于天文测量的干涉仪原理图

图 1-1 所示的仪器工作原理是这样的：来自远方星球的光线经过反光镜 A、B 以及 C、D 分为两路光。如果发自光源的光是相干的，则经过透镜后，可以在屏幕上形成干涉条纹图案。所谓干涉条纹，即为两路光波汇合到一起时，由于相加和相减的结果而在屏幕上出现的亮暗相间的条纹。如果把反光镜 D 按箭头所示的方向左右移动，则右边的光路径就改变，从而改变了两路光波相互之间的相位关系，光波的干涉条纹也会起变化。由这个变化，可测出反光镜 D 所移动的距离，从而可进一步计算出星球的角直径，再根据用三角测量方法得到的星球到太阳的距离，可以算出星球的线直径。

我们把反光镜 A 和 D 之间的距离记为 b ，并称之为基线。为使干涉系统有较高的分辨力，必须加长基线 b ，就如增加望远镜的口径可以提高它的分辨力一样。当时迈克尔逊所

用的干涉仪基线长达六米多，可测定的最小角直径为 0.02 弧秒，成功地测得猎户座 α 的角直径为 0.047 弧秒，推算出它的直径为 4.1×10^8 公里。然而，当基线再加长时，由于种种原因，光波的干涉变得很难维持，而且也很难校准反光镜 D 的位置使它在一个光波波长范围之内，因此，这种光干涉测量方法的应用受到了限制。尽管如此，用光干涉原理测量不太长的长度，至今仍是最精密的长度测量手段之一。

与光波相比，维持无线电波的干涉以及处理无线电信号要容易得多。因此，也可以设计一种无线电干涉仪，用它来测量基线长度 b 以及射电源的位置等各种参数。图 1-2 是无线电干涉仪的一种方案。两个抛物面接收天线同时对准一个射电源，接收射电源发出的射频信号，通常是频带非常宽的噪声信号。由于两天线相隔一定的距离，又由于源的方向并不总是与基线方向垂直，因此，其中一个天线接收到电波波前的时刻要比另一个天线接收到同一波前的时刻有所延迟。此外，由于地球的自转，基线相对于源的方向也不断改变，也即所测得的延迟时间以及两路电波的相互相位关系也是不断随时间变化的。通过对延迟以及相位变化率的测量，可以推算出源的方位以及基线的长度。

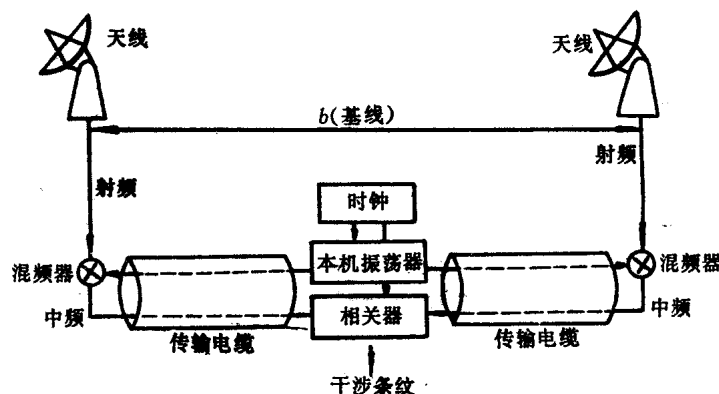


图 1-2 无线电干涉仪的一种方案

由于源信号的频带非常宽，为了便于处理信号，通常用一个本机振荡信号来和所接收的源信号进行混频。如果本机振荡信号的频率为 f_0 ，并将混频后的输出信号限制在带宽 B 以内，则混频的结果就得到频率范围为 $0 \sim B$ 的中频信号，它是源信号在 f_0 附近变化的信号，换句话说，就取出了频率在 $f_0 - B$ 到 $f_0 + B$ 范围内的源信号样品。用一个时钟（频率标准）来对接收到的两路信号定时，就可以测出其延迟值来。本振信号通常由频率标准信号经过适当的倍频后得到。由于源的射频信号一般是连续的，而且其初始条件未知，因此，不能利用时钟信号直接测定两信号到达的时间差，而只能把两路信号送到一个相关器，分析它们的相关情况。当两路信号相关最好时，所得到的时间差就是我们所要求的延迟的估计值。也就是说，只能采用最佳估计的方法来求得延迟的最近似值。

为使整个干涉系统有足够高的测量精度，要求时钟信号极为精确。电波传播速度即为光速，一微秒的时间测量误差就会引起约三百米的视距离误差。即使有了极为精确的时钟，当基线进一步加长（例如，几十公里以上）时，时钟及信号处理设备到两观测站的电缆不仅铺设有困难，而且由于各种外界原因而引起的电缆长度和介电系数的改变，会使时

钟信号及源信号的相位有不可容忍的变化。这就大大限制了可测量的基线的长度，从而限制了干涉系统的角分辨率及其应用。

§ 1.2 VLBI 的基本原理

甚长基线干涉测量● 相对来说是一门比较年轻的技术，只有十几年的历史。它与一般干涉测量技术的区别就在于它的基线可以非常长，直到几千公里。它之所以直到最近十几年内才发展起来，是因为高精度的频率标准的诞生以及现代电子技术、计算技术的进步，才使 VLBI 有可能进行，并且能达到远远超过传统的天文和大地测量的精度。目前的 VLBI 相对精度已达到 10^{-8} 以上，即在五——七千公里基线上测得的基线误差在四厘米以下^[66]，比传统大地测量高出两个数量级。

图 1-3 是 VLBI 的原理示意图。与一般无线电干涉仪不同的是：两测站经混频后的信号不是直接进行相关，而是分别记录在各测站的磁带上。当然，源信号频带非常宽，是无法直接记录下来的，只能记录混频后具有一定带宽的信号。此外，不用公共的时钟，而是各测站有独立的时钟，时标信号也同时记录在磁带上。观测结束后，再将两测站记录的磁带送到数据处理中心，进行数据回放和相关处理。利用这种办法，只要两个测站可以同时看到射电源，基线的长度就几乎不受限制。由于上述原因，VLBI 有时也被称作“独立时间标准干涉测量”。

我们来分析一下按这种方案进行的 VLBI 的基本原理。因射电源（通常是类星体）距离地球很远，尽管基线很长，在基线之间的信号辐射角度还是远远小于 λ/b (λ 为电波波长)，此时，可以认为到达两测站的电波波前是平面型的●。按图 1-3 的几何关系，两测站收到某一波前的时间差 τ ，（对于其中一个测站来说，即是延迟值）为

$$\tau_r = \frac{1}{c} b \cos \theta, \quad (1-1)$$

这里 c 为光速， b 为基线长度， θ 为基线与源方向的夹角。因地球自转， θ 为时间的函数，因而 τ ，也是时间的函数。我们在第二章的几何分析中将会看到，对于多个源进行 τ ，和

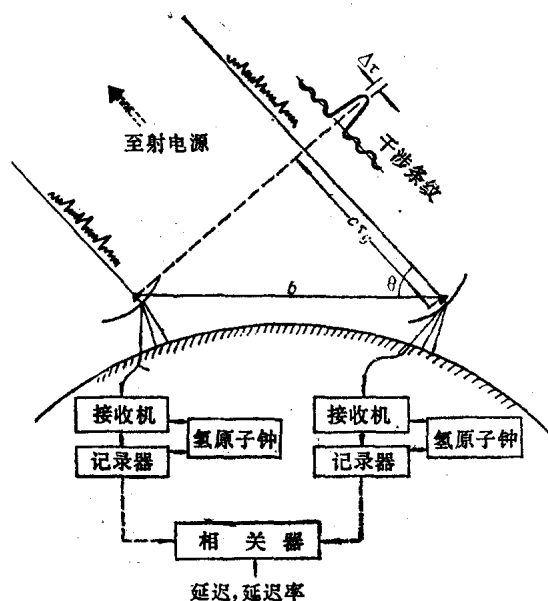


图 1-3 甚长基线干涉测量示意图

- 甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry) 常常缩写为 VLBI。
- 也可以观测人造卫星发射的信号来进行 VLBI。此时，由于卫星高度有限，电波的波前就不是平面型，而是球面型的了。在进行几何分析时必须对此加以考虑。

$\dot{\tau}$, ($\dot{\tau}$, 即 τ , 对时间的导数) 的多次测量, 就可以解出基线矢量的三个分量和源的位置来。此外, 我们还将看到, 延迟的测量精度对基线长度并不敏感。换句话说, VLBI 精度与基线的长度关系不大。

由于传播介质的影响及仪器本身的原因, 我们无法直接求得按几何关系定义的时间延迟 τ , 只能通过对两测站记录的信号进行互相关的办法, 来找出信号相关最好时的时间差 τ , 然后再对 τ 加以各种修正, 使它最接近 τ_s 。当然, τ 值包含有相关处理时必定会产生的误差 $\Delta\tau$ (见图 1-3 所示)。此外, 因源信号的初始状态未知, 如果只观测一个稳定的频率 f (相应的波长为 λ), 则相关处理得到的结果 τ 还会有观测频率 f 的一个周期 (λ/c) 的不确定性, 即有

$$c\tau = n\lambda + \Delta\lambda, \quad (0 \leq \Delta\lambda < \lambda) \quad (1-2)$$

其中 n 为整数。若将上式用频率表示, 则为

$$2\pi f\tau = 2\pi n + \phi, \quad (0 \leq \phi < 2\pi) \quad (1-3)$$

这里, ϕ 即为两信号的相位差。这就是通常所说的“ 2π ”不确定性问题。如果同时观测许多频率, 即假定所观测的诸频率信号带宽均为 B , 则不确定性将只在 $\frac{1}{B}$ 的范围内。

不确定性问题, 根据罗杰斯(A.E.E.Rogers)^[10]的建议, 可以采用非常巧妙的办法来解决, 这就是所谓的“频率切换”技术(也称为“带宽合成”技术)。罗杰斯认为, 除了可以观测一个带宽为 B 的“窗口”外, 还可以顺序或同时观测其他一些“频率窗口”。“频率窗口”可以这样设置: 每个“窗口”有一定的带宽, 当然, 每个带宽都不大于 B , 各“窗口”都对应着一个中心频率, 各中心频率之间的间距可大于带宽 B , 中心频率最低的“窗口”和中心频率最高的“窗口”之间跨越非常大的带宽。对于这些“窗口”的采样必须是同时或循环的, 从而使几分钟的一次观测期间, 每一个“频率窗口”能被采样多次。当两测站所记录的磁带送到一起进行处理时, 从每个“窗口”得到的数据可以作为不同次观测进行处理, 从而推算出每个窗口的条纹相位 ϕ 。事实上, 从 (1-3) 式可以得出

$$\frac{d\phi}{df} = 2\pi\tau. \quad (1-4)$$

此式表明, 从各“窗口”观测得到的相位-频率曲线是一组平行的斜线, 而所要找的延迟值即是这组平行的斜线的斜率, 即在一个给定的时刻, 对于不同频率, 有一个不同的条纹相位, 它使得两测站记录的信号相关最好(以后我们将用相关幅度的大小来描述相关的好坏), 但时间差 τ 却是一样的。因此, 如果在很宽的频率范围内对许多 $\phi-f$ 曲线进行采样, 就可以得到很精确的时间差, 即所要找的延迟值。此时, τ 的误差大约为

$$\Delta\tau = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{f_{\max} - f_{\min}}, \quad (1-5)$$

其中, $f_{\max} - f_{\min}$ 为有效带宽, 即“窗口”间的最大频率间距, 而 $\Delta\phi$ 即为在每一个“窗口”内所估计的条纹相位 ϕ 的误差。 $\Delta\phi$ 与测量系统的信噪比成反比。

为了使条纹相位的估计没有 2π 的不确定性, 必须适当选择频率“窗口”的间距。例如, f_1 和 f_2 必须很靠近, 以便使估计的条纹相位 $\phi(f_1)$ 和 $\phi(f_2)$ 的差远远小于 2π ,

从而可很容易选中适当的 $\phi-f$ 斜线。往后的间距可适当加大，例如可选 f_3 使之满足

$$f_3 - f_2 \leq \frac{f_2 - f_1}{\Delta\phi} \quad (1-6)$$

即可。

如果把相关幅度与用于找出相关幅度最大值的各延迟值残差的函数关系（通常叫做延迟分辨函数或延迟不确定函数）画出来，则如图 1-4 所示。图 1-4 (a) 是相对频率分别为 0、1、4、6、24、36 兆赫的六个频率“窗口”，每个“窗口”的带宽 B 都为 360 千赫。图 1-4 (b) 和 1-4 (c) 分别为相应的延迟分辨函数。每一微秒就有一个非常窄的尖峰（间距与最小窗口间距成反比），每个尖峰的周围为结构复杂的幅度较低的边瓣。尖峰的宽度为十五毫微秒，大约与最大窗口间距成反比，尖峰之间的边瓣精细结构是由内部窗口的间距决定的。每个窗口的 360 千赫带宽所产生的宽阔包络包围着整个函数，延迟的不确定性就在 $\frac{1}{360}$ 千赫范围内。

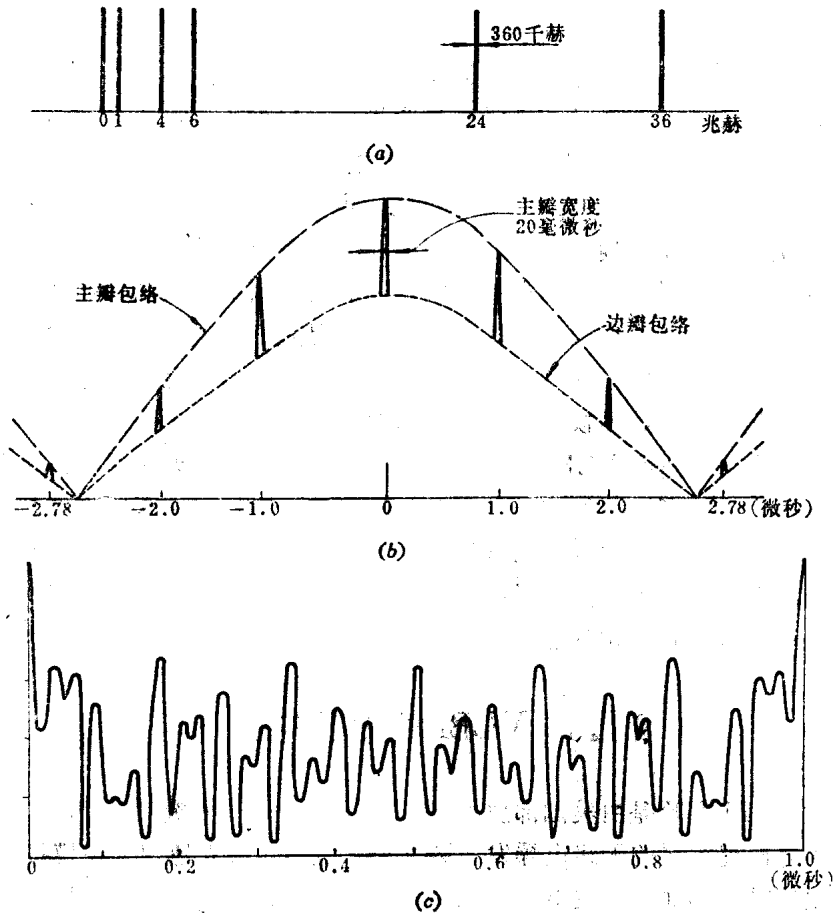


图 1-4 频率窗口和延迟分辨函数

(a)各频率窗口分布 (b)相应于某频率窗口的延迟分辨函数（边瓣的精细结构未画出，以虚线表示） (c)0 到 1 微秒之间的边瓣精细结构（略去边瓣包络的总的趋势）

由此我们看到,窗口间距的选择非常重要:最小间距必须足够小,以使不确定性在预计范围之内。增加最大间距固然能使主峰的宽度变窄,从而使延迟值的确定更精确,但如果间距太大,则边瓣变得太高,反而无法辨别主峰。关于延迟分辨函数的数学表达式,请参阅第四章。

这样一来,VLBI的数据处理就可以概括为以下三个步骤:(1)用一个预先估计的概略值去确定延迟分辨函数的适当的多值解;(2)在这些多值解中(不确定范围中)找出主峰;(3)求出主峰的最大值,此时则得到所要求的延迟值。

这种用多个频率通道的带宽来合成宽带宽的技术可以使干涉系统具有很高的分辨力。它的原理和采用合成孔径天线以获得很大的等效天线孔径,从而可大大提高方位分辨力的原理极为相似。

延迟或延迟率概略值的估计,可以用预先知道的测站位置、射电源的方位等参数通过所用的数学模型来求得。当然,这些参数不需要很精确,只要通过它们计算出的延迟概略值在上述不确定范围内即可。反过来,一旦通过对数据进行相关处理而精确确定了延迟值后,就可以利用最小二乘法来对这些参数进行平差,以求出这些参数的最适合的值。利用VLBI进行精密测量时,要顾及各方面的影响,如岁差、章动、极移、大气层对电波传播的延迟等影响。我们将在附录G给出有关的数学模型。显然,原则上也可以用同样的办法来对一切与VLBI有关的地球物理参数求解。这就是VLBI技术有广泛的用途之原因所在。

对相位延迟率(即所谓的“条纹率”)的测量,也可以得到类似的结果。不过,仅仅测量条纹率,解不出基线矢量的地极分量。我们将在第二章详细讨论。

由于VLBI是通过相关处理来求得精确的延迟值的,因此,按照上述的方法,就要求:(1)测量系统有足够高的信噪比,以便能找到延迟分辨函数中正确的主峰,而不是噪声引起的假主峰;(2)用于定时的时钟足够精确;(3)在得到延迟值后对天文或大地参数求解时,还要求有足够好的物理模型来对各种因素对VLBI的影响加以修正,即有适当的数据处理手段。以上就是进行VLBI的关键。关于信噪比,它与天线面积、射电源信号在天线端产生的等效温度、所记录的信号带宽以及数据记录的时间长度的乘积的开方成正比,与两测站接收机的等效噪声温度的乘积的开方成反比,因此,往往根据实际情况对这些参数进行适当的选择和调整,使测量系统的信噪比足够高而造价较低。VLBI的发展过程,就是对以上三点进行研究和改进的过程。

§ 1.3 VLBI的发展经过

最早的一次VLBI实验是由美国佛罗里达大学的一个研究小组在1965年进行的^{〔1〕〔2〕},目的是研究木星的无线电爆发。数据在基线两端独立地记录在模拟磁带上。两测站未采用独立的时钟,而是通过电话线来传送定时脉冲。本机振荡器信号是以接收到的WWV信号●为参考源而得到的。记录器的带宽只有2.4千赫,接收的信号频率也只有

● WWV为美国国家标准局无线电台的呼号。该电台提供标准无线电和音频频率、精密时间信号等。发射频率为2.5、5、10、15、20、25、30及35兆赫。

18 千赫。这样的系统测量精度显然很低。

直到 1967 年, 加拿大的研究人员才用真正独立的时间和频率标准进行了观测频率在微波范围的 VLBI^[8]。接着, 美国的 NRAO-Cornell^[4] 及 MIT-NRAO●^[6] 小组也分别进行了同类的测量。加拿大用的是佛罗里达大学所用的设备的改进型, 它是一种模拟式记录和处理设备。由于采用视频记录器, 记录的带宽扩展到 4 兆赫, 同时还采用一些专门的技术, 使数据回放时能很好地同步。NRAO 研制的仪器是全数字式的记录系统, 与大量通用计算机系统兼容, 从而提高了 VLBI 的可靠性和灵活性。不过 NRAO 的设备带宽只有 360 千赫, 因此信噪比比加拿大人所用的设备低。

当时 NRAO 及 MIT 所进行的 VLBI 主要目的是绘制高分辨力的射电源分布图。至于射电源结构的研究目标则仅限于谱线结构(例如 OH 的谱线结构), 因为其他方面可以由多普勒频移来鉴别, 它们的相对位置也可以由不同特性之间的条纹率差来确定^[6]。当时主要由于标准频率精度的限制, 并不试图进行高精度的射电源绝对位置或基线分量的测定。所用的频率标准为铷原子钟, 其稳定度在几秒钟到几小时内为 10^{-12} 量级, 即相当于每日零点几微秒误差。以这样的频率标准来测定源的位置, 精度将为几个弧秒, 基线长度测定精度将为几十米, 无法与短基线干涉测量或传统大地测量相竞争^{[7][8][9]}。

1967 年末, 研究人员第一次采用氢原子钟来进行 VLBI。氢原子钟的频率稳定性比铷原子钟至少高十倍, 可达 10^{-14} 的量级, 即相当于每日几个毫微秒。这样一来, 利用 VLBI 进行许多测量突然变得切实可行, 至少原则上是如此。按照当时的估计, 用这样精确的时钟进行的延迟和延迟率的测量精度可使源位置的确定准确到零点几个弧秒, 基线分量的测定准确到几厘米。然而, 由于与频率标准无关的问题上升为主要问题, 在当时要达到上面估计的精度实际上是不可能的。这些问题是: 一方面, 当时的记录系统主要用于精确确定条纹率, 而由于初始条件未知, 不可能测出总的相位延迟。另一方面, 群延迟的测量精度与所记录的带宽成反比(见 (1-5) 式), 对于 360 千赫带宽的记录设备来说, 只有零点几个微秒, 远远发挥不了氢原子钟的高精度优点。

按照罗杰斯的频率切换(即带宽合成)办法, 可以把带宽增大一百倍, 即扩展到合成带宽 36 兆赫, 因而可使群延迟的测定准确到一毫微秒左右。从此, VLBI 技术有了突破性进展, 变得切实可行了。

从 1968 年到 1969 年底, 在美国进行了一系列的频率切换 VLBI 实验。这些实验的结果, 特别是 1969 年 10 月第一次成功的频率切换 VLBI 实验的结果, 虽然未达到当时所预期的精度(主要原因是仪器信噪比低), 却完全证明了对 VLBI 所进行的一系列理论分析是正确的, 同时, 也展示了 VLBI 技术的前景。于是人们把这次实验所用的仪器称为 MARK I 系统。由于这些实验与本书的理论分析有密切联系, 我们将在 § 1.5 详细介绍。1970 年以来, 除了继续改进这些实验所用的 MARK I 系统外, 还进行了大量的实验, 并扩大了 VLBI 技术的应用研究。经改进的 MARK I 系统已经达到了相当高的测量精度(相对精

● NRAO——National Radio Astronomy Observatory (美国国立射电天文台) 的缩写。MIT—Massachusetts Institute of Technology (美国马萨诸塞理工学院) 的缩写。

度 10^{-8})。为了提高信噪比以及相关处理的速度,从 1971 年起还研制了第二代 VLBI 系统,即 MARK II,把带宽扩展到 4 兆赫,并用硬件进行相关处理。1975 年开始,又在 Haystack 射电天文台研制第三代系统(称为 MARK III 系统),把带宽扩展到 56 兆赫,并发展了系统软件,使之成为全自动的、具有很大灵活性的现代化 VLBI 设备,能满足各种应用对 VLBI 实验的要求。这样,VLBI 技术便进入完善和较成熟阶段,它的应用研究也更加广泛和深入。

MARK III 系统虽有很高的信噪比,有可能用相对说来较小的天线(如直径四米的天线),但整个系统仍十分复杂和昂贵,这就限制了它在大地测量中的广泛应用。造成这种局面的主要原因是:迄今为止的 VLBI 设备都是在天文测量的目的下发展起来的,它用类星体作为射电源,信号极弱。如果采用人造卫星作为射电源,信号可增强十万倍以上,于是,可以不用定向天线系统,可以不用带致冷器件的接收机,可以缩短观测时间(从而降低对时钟稳定性的要求),可以减小带宽(从而减少记录的数据量),因而可使系统简化到可以手提的地步。近年来,正在研究这种专门用于大地测量的地面干涉终端系统,并已初步显示了良好的结果。可以预计,几年后,利用 VLBI 原理的这种卫星大地测量设备将会进入实用阶段,有可能成为最精密的大地测量仪器^[66]。

§ 1.4 VLBI 的应用

VLBI 是当前最精密的天文和大地测量手段。至少,在测量射电源位置及测站位置的精度方面,还没有任何其他手段能与之相比。例如,利用改进了的 MARK I 系统(360 千赫带宽,合成带宽 100 兆赫~800 兆赫)在 1977~1978 年测得的资料以及附录 G 所介绍的物理模型,在五千到七千公里基线上测得的基线长度误差在四厘米以下^[66]。在源位置测定方面,按 1979 年公布的实测结果(作者与文献[66]作者同),也已达到 0.015 弧秒(低赤纬射电源除外)的精度,两个相距较近的源的分辩力,则达 0.001 弧秒。利用 MARK III 系统,精度会更高。

关于 VLBI 的实验结果及其应用,在美国及其他国家出版的科学、天文、大地测量、地球物理等杂志以及有关天文学和地学的国际会议文集上都有许多文章介绍[●]。为节省篇幅,在介绍应用时,我们既不可能列出各种应用的详细实验结果,也无法具体介绍各种应用的依据,只能列举这些应用涉及的各方面。还必须强调指出,VLBI 是一门新技术,它的许多应用研究还刚刚开始,因此这里所介绍的是很粗略的,也可能被以后的研究证明是不实用的。但无论如何,其中绝大多数至少已有初步的实验结果,而这些结果又是其他手段无法达到的。毫无疑问,VLBI 不仅为天文学和地学提供了崭新的测量方法,而且它的高精度测量结果会极大地促进这些学科的研究工作,并为它们开拓新的领域。

前面已说到,延迟和延迟率的精确测定需要先用已知的、较粗略的各种参数来求出它

● 有人用计算机检索并统计出,迄今为止所发表的与 VLBI 技术及其应用有关的论文和报告,共近 2000 篇,其中被认为重要的有 500 篇(截至 1982 年)。