

VLBI在建立准惯性参考系上的作用

须同祺 万同山

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

提 要

本文对以下问题作了论述: 现用基本参考系的局限性, VLBI在建立准惯性参考系上的作用, 射电源星表的进展, 射电源星表误差来源的分析和考虑, 综合射电源星表建立的需要, 光学、射电和空间天体测量星表联系的必要性, 用中国 VLBI 网进行天球参考系工作的一些初步考虑。

一、建立河外源参考系的需要和VLBI的作用

现在通用的天球参考系是基本星表, 例如 FK5。它是根据太阳系动力学和恒星运动学理论, 通过对亮恒星的观测建立的。为了维持这个系统的精度, 需要涉及有较长历元间隔的观测, 以确定自行。这样早期观测的误差就影响到自行精度, 不同的星群的系统运动也会影响自行结果。也就是说, 引起参考系的畸变。岁差常数和章动理论的误差, 将引起参考系统的转动。或者说在确定天体位置和描述天体运动中, 会引入一个附加的虚假运动。例如通过在光学星表系统中得到的河外源的虚假“自行”, 可用来估算岁差常数的改正^[1]。所以 Fricke 说^[2], 恒星参考系不是最好的参考系。

由于用射电天体测量可以直接对河外源进行测量, 无需借助中间参考星表, 减少了观测误差, 另外射电天体测量可以独立测定赤纬和赤经差。所以用射电干涉方法测定河外射电源位置, 建立一个较理想参考系, 就成为天体测量追求的目标。

近些年来, 建立以河外源为参考的参考系工作, 有了很大发展。其原因主要来自两方面: (1) 观测精度的提高。特别是射电天体测量的精度, 从70年代末到80年代初的几十毫角秒, 提高到现在的1毫角秒, 甚至更高; (2) 空间天体测量的开始。由于将来的空间天体测量星表须要转换到射电参考系, 使其成为惯性参考系。

二、射电源的射电星表进展

基本星表是由单个星表综合而成的。随着单个星表精度的提高, 不断对原先的基本星表修正, 使得修订后的基本星表精度进一步提高, 系统误差得到降低。射电星表也有类似情况。现在的射电星表已经改变过去只在少数几条基线上进行测量, 发展成为全球 VLBI 网观

*国家自然科学基金重点资助项目。

1992年8月13日收到。

测, 以至将来的地面—空间 VLBI 网测定。

1991 年第 21 届国际天文学联合会根据参考系工作组的推荐, 对今后的天球参考系作了相应的决议^[8]。决议中指出要以河外源为参考来建立天球参考系, 对各别射电观测星表进行综合, 研究星表间的系统差。另外这个天球参考系应尽可能接近 J2000.0 的 FK5 赤道和春分点, 同时还要进行和 FK5、空间天体测量星表及太阳系天体建立的动力参考系相比较与联系。因此在现阶段, 利用 VLBI 为建立以河外源为参考的参考系, 研究观测误差和星表系统差, 并和光学观测技术配合, 将光学参考系和射电参考系相联系, 是天体测量的重要工作之一。

表 1 列出几个精度较高的观测星表, 以及国际地球自转服务(IERS)近期的三个综合星表。表中 $\sigma_{\alpha} \cos \delta$ 和 σ_{δ} 分别为赤经和赤纬的均方误差, s 为形式误差 rms。

表 1 射电源的射电星表

| 作者/星表 | 源数 | $\sigma_{\alpha} \cos \delta$ (mas) | σ_{δ} (mas) | 参考 |
|------------|-----|-------------------------------------|-------------------------|-----|
| Fanselow等 | 117 | 3.6 | 3.8 | [4] |
| Ma等 | 82 | 1.2 | 2.8 | [5] |
| Robertson等 | 26 | 0.4 | 0.6 | [6] |
| JPL1986-2 | 120 | 1.6 | 1.9 | [7] |
| Sovers等 | 106 | 1.3 | 1.6 | [8] |
| Ma等 | 182 | ≤ 1.0 | ≤ 1.0 | [9] |

综合星表

| 星表 | 源数 | 主要源 | | 次级源 | | 补充源 | | 参考 |
|-----------|-----|-----|--------|-----|--------|-----|--------|------|
| | | 源数 | S(mas) | 源数 | S(mas) | 源数 | S(mas) | |
| RSC(IERS) | | | | | | | | |
| 90 C 01 | 228 | 51 | 0.3 | 40 | 2.4 | 137 | 4.6 | [10] |
| 91 C 01 | 396 | 57 | 0.3 | 122 | 2.4 | 217 | 2.2 | [11] |
| 92 C 01 | 422 | 65 | 0.20 | 152 | 2.11 | 205 | 1.95 | [12] |

表 1 表明, 现在的射电星表的精度已在毫角秒水平。但无论是单个星表, 还是综合星表中的每个源的观测精度, 精度好坏相差很大, 有的甚至达上百倍。而且一般说南半球的观测误差要大于北半球的观测误差。表 1 中三个综合星表都是由 IERS 综合个别 VLBI 网观测星表而得。RSC(IERS)90 C 01 由 GSFC、JPL、NGS 和 USNO 四个观测星表综合而成, RSC(IERS)91 C 01 和 92 C 01 则是由 GSFC 和 JPL 两个观测星表综合而成。图 1 (甲)、(乙)和(丙)中分别为三个综合星表的分布图。图 1 表明综合星表的共同源只占少数, RSC(IERS)90 C 01 只有 51 颗, 而 RSC(IERS)92 C 01 也只有 65 颗。由图亦可见, 射电源的分布虽然得到不断加密, 但仍然不很均匀。由对观测星表误差源和星表系统的初步研究表明, 误差的部分来源是岁差常数和章动误差、星表本身的系统差^[7,13]、以及所选源的结构及其微小的变化^[14,15]。星表的系统差在同一系列(例如 GSFC 系列)的几个星表间是发现不出的, 只有通过不同系列星表的相互比较, 才能显示其存在。例如 Arias 等^[16] 通过星表系统比较, 得到 NGS 和 JPL 系列星表在赤纬上的系统差要大于赤经上的系统差; USNO 和 GSFC 系列间在赤纬上有较大系统差; 而 GSFC 和 JPL 系列则在赤经和赤纬两方向都有较

大系统差存在。由于以上原因, Argue 等^[17]和 Johnston 等^[18]分别给出 223 个河外源表和 400 个源的加密计划的推荐星表, 以便通过增加特别是南半球射电源的观测次数, 增加共源数量, 研究和监测源结构及其变化, 研究观测误差起因和星表间的相互比对, 建立一个类似现用基本星表一样的综合射电表。

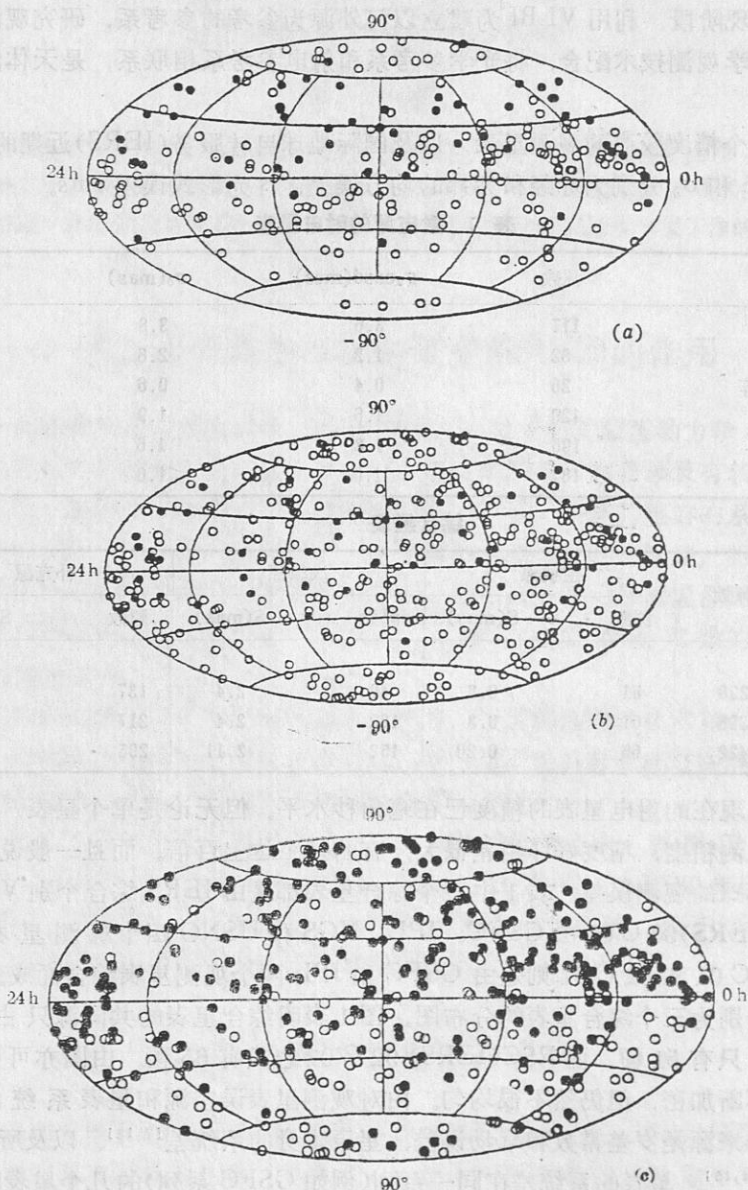


图 1 (a)RSC(IERS)90C01 源的分布
(b)RSC(IERS)91C01 源的分布
(c)RSC(IERS)92C01 源的分布
图中黑点表共同源

三、参考系联系

射电参考系的建立, 空间天体测量卫星的发射, 都和大量长期的天文观测资料的重新整理, 深入研究分不开的。要做到这一点, 就需要射电和光学参考系的联系。

在依巴谷天体测量卫星观测计划中, 安排了射电星的光学测定。又利用依巴谷天体测量卫星和空间望远镜配合观测, 将河外源的光学位置联系到依巴谷星表系统。进行联系的其他方法还有例如用脉冲星来进行参考系联系, 利用地面光学望远镜测定射电星位置和自行, 以及射电源光学对应体位置^[10]等。但无论用那种方法, 射电观测总是一个不可缺少的方面。

射电星可以提供光学和射电参考系的直接联系, 按现在 VLBI 灵敏度, 射电星的流量应大于几 mJy, 而且其光学和射电图像应符合到 $0''.002$ 。现在已有 22 个射电星可用, 其中大部分是密近双星 RS CVn, 角距小于 $0''.004$, 流量小于 50mJy^[20]。由于射电星的流量有剧烈变化, 所以积累 VLBI 观测的数据甚为缓慢。又由于射电星不是河外的, 必须通过观测以确定自行。Niell^[21]等用 5—6 个天线组网观测 8 个射电星, 形式误差约 $0''.003$ 到 $0''.3$, 精度主要取决于射电辐射的强度, 在观测期间强度从 9mJy 变到 400mJy 不等。Lestrade 等^[22]观测了 Algol 和参考源 MW0309+41 的相对位置, 相距 $70'$, 精度好于 2mas, 由于采用了 VLBI 相位基准法(Phase referencing), 积分时间长达 1—4 小时。

观测 RSCVn 时的一个困难是流量剧烈变化的时间尺度为一天, 没有一个源可以稳定到 10mJy 水平, 但爆发可持续数天, 而在爆发的不同阶段, 流量可能在一小时的时间尺度上改变。因此, 用 VLBI 混合图法(hybrid mapping)只能用快拍法(snapshot), 因而需要较多的天线。

关于利用脉冲星作参考系联系, 需要用 VLBI 测量脉冲星的天球坐标, 并和地球自转矢量相联系, 同时通过 VLBI 对另外的致密源观测, 又把脉冲星联系到射电参考系, 这可用 VLBI 相位基准法, 但只限于和脉冲星靠近(典型的相距 $<5^\circ$)的河外源。另外通过脉冲星的到达时间的测量又和地球公转相联系。由这两组数据比较, 可以测定春分点相对于射电参考系的位置, 也可监测其变化率。据分析, 两种测量的精度是相当的^[23]。Bartel 等进行过这种测量^[24], 利用 NRAO 43m 天线, OVRO 40m 天线和西德 100m 天线, MK-3 VLBI 系统, 测量了 PSR0329+54 和 PSR 1133+16, 位置精度在 VLBI 射电参考系中为几mas, 但和脉冲星定时测量的位置有 $0''.45$ 的分歧, 据认为是定时噪声系统差引起, 尚有待探讨。

射电参考系的维持涉及源结构变化的监测, 因为在 VLBI 的分辨率下, 大多数射电源都呈现有一定的结构, 而这种结构有很多是变化着的, 并反映为位置的微小变化。在洲际基线上, mas 级的源结构变化将引起厘米级的测地误差^[25]。因此, 源结构变化的监测是维持射电参考系保持高精度所必需的, 尤其是 VLBI 测地学精度已跨入毫米级, 就更为必要了。监测射电源的结构变化要求做 VLBI 混合图像, 而为了可靠地成图, 要求好的 UV 覆盖, 较高的信噪比的数据, 用 4 个以上的天线进行组网观测是必要的^[25]。Johnston 等的 400 个源的计划的第二阶段将加密并利用 VLBA 研究可能存在的源结构问题, 由 NRL/USNO 负责该工作^[26], 同时还包括射电星的射电和光学观测, 类星体的光学观测, 太阳系天体的射电

观测, 毫秒脉冲星观测等等, 所有这些工作将和其他单位合作进行。

Fricke^[2]曾指出, 对于河外射电源参考系和基本参考系间的严格比较, 需要: (1)共同源的光学位置和射电位置; (2)两者有可比较的精度; (3)有足够的共同源数。实际上现在离开这些条件, 都还有一定距离。因而采用多种联系方式, 进行系统间相互比较和校验, 是建立参考系间联系的重要方面。这包括如里克、普尔科沃、薇茨坦和波恩等用照相方法求得的绝对自行; 由空间望远镜得到的自行; 将由 VLBI 或 VLBA 取得的高精度的射电星位置及自行; VLA 或其他的精度较低的射电星位置及自行等等。所有这些资料, 都将在参考系联系上作出贡献。

四、射电参考系研究和 VLBI 技术

在射电参考系的研究中, 需要观测的对象主要有两类: 一类是河外射电源。要求致密, 射电频谱为坦谱, 同时应有光学对应体。因此用于参考系的射电源应仔细选取。Johnston 等^[27]认为, 为提高现在的参考系精度, 应选取小于 1 毫角秒尺度的致密源。此外, 射电源的致密辐射还应该和光学对应体相符合。由于这些选源的要求, 在目前 VLBI 灵敏度下, 符合要求的源就有限了。随着灵敏度的提高, 参考系的射电源加密将有可能, 因为可检测的射电源数目和源流量的 (-1.5) 次方成正比, 根据预计 VLBA 将达到每平方度一个源^[28]。另一类是射电星。它是一些恒星系统, 一般是 RS CVn 星或其他类的密近双星(例如 Algol, Cyg X-1, LSI 61303), 这些星有时有充分的辐射强度, 而且射电辐射是致密的。但在高分辨率下, 射电星的射电辐射也呈现结构, 例如已用 6 个天线组成的 VLBI 网测得 UX Ari 的混合图, 呈现核晕结构, 间距达 2mas^[29]。

射电参考系观测的基本要求是定位测量的精度, 而这个精度 $\delta\theta$ 和干涉网的分辨率 θ 及信噪比 SNR 有关, 即 $\delta\theta = 0.5 \frac{\theta}{\text{SNR}}$ ^[30]。但是, 这里定义的精度系随机误差引起。在参考系研究中, 还应考虑系统差的问题, 即 $\delta\theta' = \frac{\Delta D}{D} \Delta\Theta$ ^[30], 这里 D 表示基线长度, ΔD 为由源到两测站的距离差, $\Delta\Theta$ 表待测源和参考源或校准源的间距。

由上面的讨论可见, 参考系观测要求高分辨率(VLBI 网的基线长)和高灵敏度(SNR 大), 而且两者是相联系的, 例如, VLBA 比中国 VLBI 网的分辨率高 2.5 倍, 观测灵敏度高 ~10 倍, 因而定位精度约高 25 倍。Johnston 等的 400 个源的加密计划利用的北半球的天线有 Green Bank(43m), Maryland Point(26m), Hat Creek(26m), Hawaii(25m), Fairbanks(26m), 南半球有 Tidbinbilla(70m), Hobart(26m), Hartebeesthoek(26m), 均用 MK3 系统。这个 VLBI 网的分辨率比中国 VLBI 网约高 3 倍, 灵敏度也约好 2—3 倍, 则定位精度就好 6—9 倍。

利用 VLBI 相位基准法(phase referencing)有可能加长相干积分时间, 从而检测到弱源。但利用相位基准法需要满足条件^[31]: 在待测源邻近($<5^\circ$)有一个基准源(reference), 该源有足够强度($\geq 0.5\text{Jy}$), 而结构相位应通过成图获得, 以便改正。Lestrade 等^[22]成功地用相位基准法测量了 Algol 和基准源 MW0309+41 的相对位置, 积分时间达到 4.2 小时,

理论上积分时间还可延长, 但受到仪器的稳定性所限。Lestrade 的 Algol 测量精度和理论预期相符合(分辨率/SNR), 约 $< 2\text{mas}$ 。该实验用了 NRAO, OVRO 和 VLA(等效口径 130m) 等大型天线和 MK3 系统。这个方法将可用于射电参考系的加密观测。由于定位精度的提高, 源结构影响将愈来愈大。因此, 在射电参考系的研究中, 多天线的组网观测是很必要的。

1993 年将投入工作的 VLBA, 除技术性能外, 一个最重要进展是它将能连续地工作, 而且相关处理的能力(同时处理 190 条基线)也相适应, 从而为广泛的天文课题提供了条件, 这在 VLBI 发展史上是不曾有过的。在 VLBA 正式工作后, 对源结构的研究将是很容易进行的工作。

五、中国 VLBI 网的作用

综上所述, 射电参考系是一个基本参考系, 通过它将其他参考系联系起来。这样的参考系不能由一两个射电星表来完成, 需要通过较多有共同源的星表综合处理而成, 目的是尽可能消除星表间的系统差。其次是分析和改善各种误差来源, 以提高整个综合星表的精度。这就要求有较高的位置测量精度, 从而要求相应的分辨率和灵敏度, 还要求仪器的稳定性良好。

中国 VLBI 网建议书(1986 年 1 月)和总体方案(1986 年 8 月)的科学目的中, 包括利用河外源建立天球参考系的研究, 这一研究至今仍是国际上基本天体测量的主要目标。

国外在发展射电参考系工作中, 有一个由少到多, 从精度低到高精度的发展过程。从目前几个射电星表看, 基本上由 GSFC、JPL、NGS、NRL、USNO 等和测地、导航有关部门进行, 而测地、导航等是比较经常性的研究工作。

从国际 VLBI 网的发展来看, 在参考系研究方面, 中国 VLBI 网的定位精度较低, 而且分辨率和天线数均不利于研究源结构。要提高精度, 就需要增加观测次数, 并取得国际合作来弥补。因此, 关于利用中国 VLBI 网进行参考系研究, 我们认为可从两方面考虑:

1. 用中国 VLBI 网观测。中国 VLBI 网的“科学目的”中, 除前面讲的任务外, 还有一个任务是测地工作。可以考虑将测地和参考系两项适当结合。根据 IERS 综合射电星表情况, 对源的选取条件上, 选用(1)中国网能够观测的; (2)已列入综合射电星表中的源, 特别是那些观测精度较差的源, 和不属于综合星表共同源的射电源; (3)为改善分布而增补的射电源。这个星表选星数量可以不多, 例如, 在这个初始观测纲要中, 包括约 20 个已列入 IERS 综合星表的共同源, 已列入 IERS 综合星表的其他源 40 个左右, 及增补的源约 20 个。期望其平均精度不低于综合星表的平均精度(由所有综合星表所含射电源的表列误差的平均得到), 即 $4-5\text{mas}$ 。在这个初始星表中, 大部分是可以比较的源。这将是一个带有一定特色的星表, 因为它是针对目前综合星表的不足, 通过观测取得的星表。同时通过观测, 又可以检验仪器的实际性能, 为联网观测提供依据。

2. 组网观测。如上所述, 中国 VLBI 网在参考系研究方面的观测能力是有限的。但通过联网, 可以相应在分辨率和灵敏度上都有所改善。而且现代的 VLBI 研究课题, 也往往希望进行联网观测。有些外国天文家例如德国的 Walter^[32], 为此也问过中国网的进展情况。

由于上面第1点的实践,对中国VLBI网的实际性能也受到检验。在这基础上,对中国网而言,只要观测目标对中国网是合适的,就应争取联网,在联网中发挥中国网应有的作用。

但现在中国网暂时还只有上海一个天线。为加快我们对射电参考系的工作,应争取上海天线参加联网观测,并通过联网检验仪器的性能,也为以后更多的组网提供依据。例如以上海天线参加现在澳大利亚对南天射电源的观测计划。表2给出几个南半球的台站位置,表中同时列出上海和Kashima站的位置。从表2可得南半球几个台站的南、北基线分量受到一定限制。但如增加上海和Kashima台后,将对赤纬测定有利。又在共同观测时间上,上海和这几个台站都有4个小时以上的共同观测时间,而表2中几个台站(除去Hart站)的共同观测时间也有2小时以上。其赤纬范围可从 $+34^{\circ}$ — -40° 。从图1(c)可见,就是对RSC 92 C 01星表而言,在这个赤纬范围,射电源的分布也还需要一定加密补充。因此上海天线参加到这个计划中(同时加入Kashima天线),并在其观测纲要中,适当增加一些补充源,这对于提高南天射电源位置精度,加密南天射电源分布,都是极为有利的。

表 1 几个南半球台站、上海和Kashima站的经纬度

| 台站名 | 纬度 | 经度 |
|----------|-----------------|-----------------|
| HART | $-25^{\circ}.7$ | $-27^{\circ}.4$ |
| 上海 | 31.2 | -120.4 |
| HOBART | -42.8 | -149.0 |
| KASHIMA | 36.0 | -140.4 |
| MOPRA | -31.3 | -149.1 |
| NARRABRI | -30.3 | -149.6 |
| PERTH | -31.8 | -115.9 |

参 考 文 献

- [1] 王叔和, 须同祺, 陆佩珍, 天文学报, 31 (1990), 161.
- [2] Fricke, W., Veröffentlichungen ARI Heidelberg, No. 31, (1985).
- [3] Arias, E. F., Feissel, M. and Lestrade, J. -F., IERS Technical Note 7, (1991), 7.
- [4] Fanselow, J. L. et al., A. J., 89 (1984), 987.
- [5] Ma, C. et al., A. J., 92 (1986), 1820.
- [6] Robertson, D. S. et al., A. J., 91 (1986), 1456.
- [7] Walter, H. G., in IAU Colloquium No. 127, p. 376. (1991).
- [8] Sovers, O. J. et al., BIH Annual Report(1988), D-17.
- [9] Ma, C. et al., A. J., 99 (1990), 1284.
- [10] IERS Annual Report (1990), I-11.
- [11] IERS Annual Report (1991), I-15.
- [12] IERS Annual Report (1992), I-15.
- [13] Sovers, O. J., in IAU Colloquium No. 127, p. 130, (1991).
- [14] Cotton, W. D., NASA Conference Publication (1979), 2115.
- [15] Charlot, P., Journées Systemes de Reference Spatio-Temporels, (1988), 57.
- [16] Arias, E. F. et al., IERS Technical Note 7, (1991), 41.
- [17] Argue, A. N. et al., Astron. Astrophys., 130, (1984) 191.
- [18] Johnston, K. J. et al., in IAU Symposium No. 129, p. 317. (1988).
- [19] de Vegt, C., The Messenger, No. 69, (1992), 28.
- [20] Arias, E. F. and Lestrade, J. -F., in IAU Colloquium No. 127, p. 202. (1991).
- [21] Niell, A. E. et al., in IAU Symposium No. 129, p. 327. (1988).
- [22] Lestrade, J. -F., et al., in IAU Symposium No. 129, p. 323, (1988).

[23] Shapiro, I. I., *Am. Geophys. Union Trans.*, 51 (1970), 266.
 [24] Bartel, N. et al., *A. J.*, 90 (1985), 318.
 [25] Tang, G., Technical Report No. 181 (1988), 3-22, Chalmers University of Technology, Sweden.
 [26] McCarthy, D. D. et al., in IAU Colloquium No. 127, p. 309, (1991).
 [27] Johnston, K. J. et al., in IAU Colloquium No. 127, p. 123, (1991).
 [28] Ma, C. et al., in IAU Colloquium No. 127, p. 135, (1991).
 [29] Lestrade, J. -F., in IAU Symposium No. 129, p. 265, (1988).
 [30] Ried, M. J., in *Adv. Space Res. Vol. I*, No. 2, pp. (2) 421, (1991).
 [31] Alef, W., *Very Long Baseline Interferometry Techniques and Applications*, p. 261, (1989).
 [32] Walter, H. G., (1992) private communication.

(责任编辑 刘金铭)

The Role of VLBI in the Construction of the Quasi-inertia Reference System

Xu Tongqi Wan Tongshan

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

In this paper the following problems are discussed, namely the limitations of the current fundamental reference system, the role of VLBI in the construction of a quasi-inertia reference system, the progress of the catalogues of radio sources in the last few years, the analysis and considerations on the error sources of the radio sources catalogues, the necessity for the construction of a synthesis catalogue, the requirement of the link between the optical catalogues, radio catalogues and space astrometric catalogue, and some preliminary considerations of the research on the celestial reference frame with the Chinese VLBI network.