

基本参考系和射电天体测量

须同祺 李正心

(中国科学院上海天文台)

提 要

本文对基本参考系的作用、FK4的现状和进展、射电天体测量对改进和扩展基本参考系的意义和关系、射电参考系的进展等作了论述。

一、前 言

在天文地球动力学、天体测量、天体物理以及大地测量等各个领域的研究中，都需要一个确定的坐标系作为参考。这个参考系实际上是由一些有精确位置和已知其运动(自行)的亮星组成的基本星表来体现的。

随着射电干涉方法的出现和射电天体测量精度的日益提高，天文学家普遍注意到射电天体测量在改进和扩展以基本星表表示的参考系中的重要性。

二、基本参考系的重要性

对于所采用的参考坐标系，总希望在这个参考系中对天体或地面点位置的测定和其相应的研究，都不会产生由于参考坐标系本身的不完善而引起的附加运动。但一个实用的基本参考系，总是通过一些观测来建立和维持的。因此总会带来一定的误差，并影响具体的研究结果。例如：

1. 板块的旋转速率为每年几个毫角秒，相应的经度变化也在每年几个毫秒的量级。但是基本星表FK4的自行平均误差达到 $0''.002$ /年，其他星表如N30和GC的星，自行平均误差则为 $0''.005$ /年和 $0''.010$ /年。因此，当前星表的误差和待测板块运动的速率相比，至少是数量级相当，甚至更大。

2. 在长期极移的研究中，目前还难于避免由于观测纲要的改变而引入的星表误差的影响。

3. 在编制小行星历表时，由于在小行星周围一般都不易找到合适的基本星表中的星，因此定位精度较低，一般在 $0''.2$ 左右。这样大的定位误差，使外推的天体运动在几周的短时间

1986年4月16日收到。

1987年7月30日收到修改稿。

内,误差可能要达到零点几角秒,从而失去小行星历表的作用。

4. 根据对天体位置及自行的精确测定来研究恒星、星系的运动学和动力学问题时,参考系的微小转动,会引起虚假的系统转动。例如对行星的观测发现的黄道倾角长期减小的现象(每世纪减小 $0''.3$),其值大于根据行星理论所得的计算值。如果这个观测值是真的,那末目前对近距星系角速度的估计值应该增大几乎一倍。这个差异实际上很可能是基本星表自行系统的误差所引起的。

5. 如果有了远距早型星精确的距离及自行,就可能改进奥尔特常数的测定精度。现在这两方面的数据精度都不够理想,特别是南北半球的自行系统缺乏均一性,影响了这项工作的进展。有了更精确的恒星距离和自行资料以后,就有可能检验银河系轴对称稳态模型的真实性和真实性。例如检验在速度场中与银道面相垂直的方向上的运动分量是否处于统计平衡之中,以及对于任一星族而言,速度椭球轴的比值是否与银河系轴对称稳态模型所要求的奥尔特常数相符合。这些数据也提供了精确的恒星空间速度,为银河系动力学的研究开辟了一条新的途径。例如有可能对一些年轻恒星(B及A型),在星协或星协群诞生的时-空顺序进行追踪,确定这些年轻恒星的生成区域。根据一些年轻恒星的精确空间运动和年龄,可以描述银河系中的旋涡结构,并导出它们的典型速度,从而去研究星系激波,以及测定恒星在旋臂中和在旋臂之间的诞生率。

6. 利用月掩星资料的分析,可以求得月球绕地球的公转运动相对于原子时系统的加速度。根据目前统计,月掩星观测的误差中,星位误差约占50%。如果能够提高星表的精度,既可以重新归算月掩星的历史观测资料,求得更为可靠的加速度值,又可和近代人卫观测测定的月球潮汐加速相比较,从而可研究引力常数可能出现的长期变化。

以上所举只是和基本参考系有关的少数几个例子。可以说,基本参考系对天文学的各个分支,对与天文学、地学有关的各门学科,具有极为重要的意义,所以它一直受到整个天文界的高度重视。本世纪中期以后,人卫、激光、射电和空间技术的出现和迅猛发展,使测量精度跃进到厘米级。为了对这些测量结果进行研究,就需要基本参考系具有 5×10^{-8} 弧度($0''.001$)的精度。这也就是为什么以依巴谷空间天体测量卫星和空间望远镜为代表的空间计划如此受到整个科学界重视的原因。如何将基本参考系的研究提高到人类进入空间时代所要求的水平,是当前天体测量学面临的重大课题。

三、FK4情况及进展

目前广泛使用的基本参考系是FK4基本星表。它的情况是:只限于亮星,而且星数很少;在 $5^\circ \times 5^\circ$ 范围内,只有一颗基本星。在平均历元上,基本星位置的平均误差,对赤经和赤纬都是 $0''.04$ 。具有显著的区域性系统差,而且南半球比北半球更大。自行的平均误差为 $0''.002$ /年。到1980年,在两个坐标方向上,由于自行误差引起的积累误差已达 $0''.1$ 。其次在FK4系统中,存在一种每年 $0''.005$ 到 $0''.007$ 的转动,它以误差形式引入到自行之中。

由于上述原因,不久将由FK5来代替FK4,并作为今后的基本参考系。在修订FK4的过程中,对FK4原有的缺点作了很多修正。例如将星等从原来的7.5等扩大到9等,并力

争在 $3^\circ \times 3^\circ$ 范围内有一颗基本星; 修订了 FK4 的系统差, 改善了星位的个别改正; 还修订了岁差常数和春分点改正等。通过这些修订, 希望个别星位的平均误差减小到 FK4 的一半或更小。但对于暗星, 估计不可能达到如亮星一样的精度。

Fricke 1985 年在文 [1] 中指出, 由于恒星的自行以及由于我们现在还没有足够清楚地了解一些双星或聚星的子星的相对运动, 使得恒星参考系不可能是一个最好的参考系。并说这个问题早在 18 世纪就为天文学家赫歇尔和拉普拉斯所指出。他们还认为河外星系是最适用于作为天球参考系的参考点。这就导致本世纪的里克和普尔科沃天文台用照相法求相对河外星系的恒星自行的工作, 此项工作由于结果有较大的分歧, 还在讨论之中。

目前使用的基本参考系, 都涉及到岁差和春分点。在讨论修订岁差常数时, 虽然加入了银河系自转, 但由于很难把岁差同银河系自转完全分开, 所以还可能在参考系中存在微小的系统差。另外在决定赤经零点时, 因受到观测对象和方法不同的影响, 一些误差将直接影响赤经的系统误差。所以现在都希望能建立这样一个参考系, 即它的坐标轴方向将不再和地球太阳系甚至银河系的任何平面或方向发生联系。这一点将在 VLBI 技术出现后成为可能。

四、射电天体测量与基本参考系

射电天体测量的出现, 使得对河外射电源进行直接的测量成为可能。VLBI 技术的出现与发展, 又使得对这些河外射电源的测量达到了空前高的精度。因此可以说, 射电天体测量的出现与发展, 对解决基本参考系问题创造了极为有利的条件。

一般来说, 在空间找三个不共线的固定点, 就可以建立一个参考系。当然, 在具体实践中, 情况要复杂得多。对这些点的要求是点位固定不动, 或是至少在一段时间内觉察不到它们的运动。当前最理想的目标就是河外射电源。河外射电源的自行很小, 甚至在它们的横向运动等于其后退速度时, 自行也不会超过 $10^{-6}''$ /年。因此, 可以认为它们在一段相当长的时间内是不动的。不足的方面是河外射电源的亮度一般都很暗, 不易为普通的望远镜所观测到。自从射电干涉测量技术出现以后, 对这些河外射电源进行高精度的测量就成为可能。射电干涉测量还有它自己的特点, 即可以独立测定河外射电源的赤纬和赤经差。因此用射电干涉方法精确测定河外射电源的位置, 建立一个较为理想的参考坐标系, 早已成为天文学家追求的一个目标。

但是, 射电参考系建立以后, 还需要和当前的光学参考系相联系。迄今为止, 已有上百年的、大量的和各种各样的天文观测资料。如星位、自行、视差和光度等, 以及由此而得到的次一级的资料, 如测时、测纬和其他的观测结果。对这些资料重新进行整理, 进一步检验过去一些假设是否成立, 以及地极的长期运动究竟是否存在等这一类长期争论不休的问题, 以再次发挥它们的作用。所有这些问题的进一步解答, 都需要通过射电参考系和光学参考系的比较、联系来解决。通过比较和联系, 可以得到基本参考系的系统改正, 进而可以得到有关岁差常数的精确值, 以及太阳系空间运动和银河系自转等基本参数。

自从空间天体测量的计划提出以后, 天文学家就对这两个参考系的联系问题作了考虑。Röser [2] 指出, 由于依巴谷卫星不能对黄道(或赤道)和春分点进行直接的观测, 因此从这

一点来说,依巴谷卫星的观测并不是绝对的。也不能用依巴谷卫星直接观测河外射电源,以确定该系统和河外射电源参考系之间的转换关系。因而就需要把依巴谷卫星的观测与河外射电源参考系或者 FK5 基本参考系联系起来。Lestrade 在文[3]中也指出,依巴谷空间天体测量卫星所得到的测量结果是根据十万颗恒星相对于任意参考面的坐标定义的,并没有联系到作为地面测量的任何基本面上去;其次,这个参考系相对于银河系有一个每年约 7 毫角秒的转动。因此它并不能作为行星或恒星动力学研究的惯性参考系。现在最理想的参考系是由射电方法测定的河外射电源的位置来定义的。因此,由依巴谷卫星观测建立的参考系必须和射电参考系相联结。

关于射电—光学参考系的联系方式,一般有下列两种:

1.在现有的基本参考系中,测定河外射电源的光学位置,并和射电观测结果相比较。由于河外射电源的光学亮度都较低,一般要用大型光学望远镜,且采用逐级过渡的办法。另外,在银河系中,有一些光学亮度大(但射电流量弱)的射电星。这些射电星可用现有的 FK4 基本星表或其他和 FK4 有联系的星表作参考,其中有些射电星本身就是基本星,这样就可直接将光学星位和射电观测相联系,减小因联系引起的误差。

2.通过空间技术。对亮于 13 等的射电星,直接用依巴谷天体测量卫星测定其位置。较暗的河外射电源,则通过依巴谷卫星测定其周围较亮的参考星的位置,然后用空间望远镜求出这些参考星和目标星的相对位置差,再将这些位置差与依巴谷卫星的观测相联系,最后确定河外射电源的位置。

对河外射电源参考系和基本参考系间的严格比较,Fricke 在文[4]中指出,一共需要三个条件:(1)同一目标的光学位置和射电位置;(2)两者有可比较的精确度;(3)有足够的共同目标。这就需要通过空间和射电的观测结果来进行。

五、射电源和射电星观测近况

随着射电干涉测量技术日益广泛的应用和发展,测量精度也随之提高,从七十年代的百分之几角秒,提高到八十年代的千分之几角秒,甚至更高。1980年 Walter[5]用表 1 所列 4 个七十年代中期的射电源星表中的 28 个共同源组成的综合射电源星表,其精度估计结果见表 3A 部分。在表 1 星表中,除序号 2 为联线干涉测量结果外,其他都是 VLBI 的观测结果。

表 1

序 号	星 表 名	平均精度	平均历元
1	Clark et al.[6]	$\pm 0''.05$	1973.7
2	Elsmore and Ryle[7]	3	1975.5
3	Wade and Johnston[8]	3	1975.5
4	Purcell Jr. et al.[9]	5	1974.5

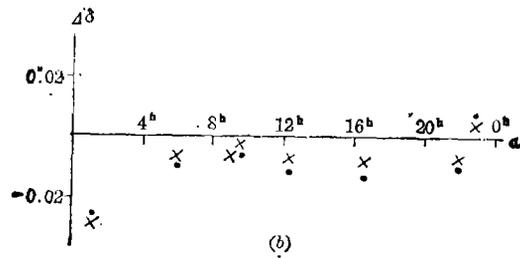
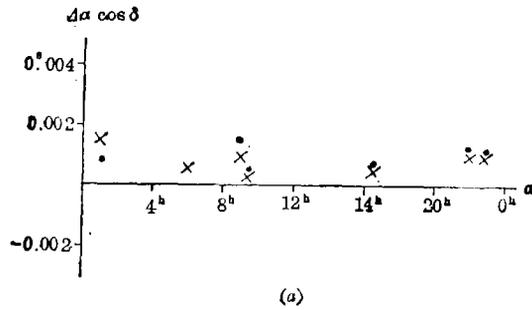
我们根据对表 2 所列 4 个七十年代中后期的射电源星表中的 45 个共同源组成的综合

表 2

序 号	星表名	平均精度	平均历元
5	JPL[11]	$< \pm 0''.01$	~1979
6	Purcell et al.[12]	1	1978
7	Perley[13]	5	1981
8	Purcell Jr. et al.[9]	5	1974.5

表 3

	系 统 差	个别误差	总 误 差
A	赤 经	$\pm 0''.009$	$\pm 0''.028$
	赤 纬	6	25
B	赤 经	10	17
	赤 纬	9	20



• (G-M)
 × (G-A)

图 1

射电源星表(符号: M)的分析, 得到其精度估计结果见表 3 B 部份。表 2 中除 Perley 星表为 VLA 结果外, 其他均为 VLBI 观测结果。其次又以 NGS 的 VLBI 在 1983 年 10—12 月国际地球自转参数联测期间得到的观测结果中, 与上述综合射电源星表(M)共同的 8 个源的位置值符号: (G), 同综合射电源星表(M)以及 Argue [14] 等由 8 个射电源星表所综合的综合星表(符号: A)中的相应位置值比较, 其差值如图 1 所示。图 1 表明都存在一定的系统性误差, 但波动不大。而最近在文 [10] 中利用包括八十年代初期的几个较新的射电源星表, 得到综合射电源位置个别误差在赤经和赤纬上分别为 $\pm 0''.0010$ 和 $\pm 0''.0024$ 。同样也显示各射电源星表间, 存在一定的系统差。这有点类似光学基本星表中的情况。当然现在的星数太少, 尚难于做更进一步的结论。但至少表明, 建立一个较理想的射电参考系, 不是少数观测星表所能解决的。

Johnston 等 [15] 根据 22 颗同时具有射电发射的射电星的精确位置, 得到了目前射电参考系和以 FK4 为基础的光学参考系的初步比较结果: 在北半球的拟合精度为 $0''.05$; 并得到了北半球两参考系统间有一个 $0''.15$ 量级的系统差的结论。这一点和早先 27 个河外射电源的射电和光学位置比较的结果一致。这表明, 无论用射电星 ($m_r = 10$) 或河外射电源 ($m_r = 17-20$), 在光学—射电参考系的联系上都能给出基本相同的结果。

这些年来, 无论是在射电参考系的建立方面, 还是在参考系间的联系方面, 研究都在积极进行中。前述的 Argue 等 [14] 的射电源表, 就是 IAU “射电/光学天体测量源鉴别工作组” 根据现有普查资料, 从已用联线干涉仪、VLBI 和 VLA 等观测所得的精度较高的一些射电源星表中选出的。共 234 个源, 它们在全天的分布见图 2。由图 2 表明, 这些参考源的分布还不很均匀, 特别在赤纬 -40° 以下, 平均约 170 平方度一个源, 如按赤经和赤纬带划分, 则

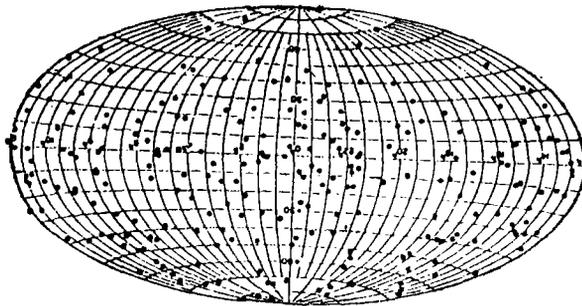


图 2

平均每小时赤经带只有 9—10 个源, 每 10 度赤纬带, 平均亦只有 13 个源。其选源的标准是, 所选源的致密度都在毫角秒量级, 射电频谱比较平坦, 源结构比较简单, 射电流量 (5GHz) 在 0.5—2 Jy, 平均为 1.7 Jy, 只有个别源流量较大, 如 3C 273 为 45.8 Jy, OX 057 为 10.3 Jy。该星表中射电源位置的误差大部分 $\leq 0''.01$ 。

为了依巴谷天体测量卫星观测星表的需要, 以及射电—光学参考系的联系, 天文学家共提出了约 275 个射电星。但大部份位置精度都很差, 需要进一步测定, 只有 74 个射电星有较精确的位置, Hering 等 [16] 已将它们在相应星图上的位置作了辨认。最近 IAU “射电/光学天体测量源鉴别工作组” 根据近期的观测结果, 又刊出第二批 52 个射电星的光学位

置[17], 以供精密观测的需要。现在联邦德国、英、法等都在积极进行射电星的光学定位。上海天文台也在用40厘米望远镜的照相观测进行测定射电星光学位置的工作, 预计不久可得到约90颗射电星的光学位置。除了射电星的光学观测外, 对射电星的射电观测也正在积极进行中。美国的VLA从八十年代开始, 就在进行射电星观测[18],[19]。这些射电星很多是密近RSCVn型双星系统, 射电流量都很弱, 就已知30颗射电星, 流量在3mJy以下(6cm)的占40%, 其他射电星的流量也在十几到一百多mJy左右, 总的说来, 其流量要比射电源弱50倍, 据报导美国还准备利用VLA和NASA深空网联合, 以测定射电星的位置和自行, 将来还准备用VLBA来进行射电星的工作。

除了精密位置测定, 射电源结构本身的研究也是一个很重要方面。一是研究射电源结构本身的微小变化, 另一是需要确定射电源周围的情况, 例如射电源是否是密近双源, 还是有更复杂的结构。而这些结构变化往往是毫角秒级的, 和位置测定精度同一数量级。Cotton[20]的研究表明, 在精确的射电观测中, 应该考虑源结构的影响。

六、结 论

射电参考系可以说是目前的光学参考系或将来的依巴谷卫星建立的光学参考系的“零级参考网”。一旦这个基于河外射电源的零级参考网能够高精度地加以实现, 且又成功地解决了它和光学参考系的联系后, 一个不受地球、太阳系以至于银河系运动影响的、较理想的射电—光学惯性参考系, 就可建立起来。但要真正实现这个目标, 还有不少工作要做, 也还有一些难点需要去解决。

对射电源的测量工作来说, 首先还要适当增加源的数量, 使分布更为均匀。Johnston认为全天流量大于0.6Jy的候选对象有300多个。就射电源定位精度来说, 也还需要进一步地提高。特别是对存在于单个射电源观测星表中的系统误差, 要通过对多个星表的综合处理来加以削弱。

对射电—光学参考系联系的要求, 应该强调的是它的精密性, 而不仅仅取决于联结点数量的多少。河外射电源本身的自行很小, 这是它适合于做“零级参考网”点的原因; 但是射电源结构本身的变化, 却是它在真正能做一个好的参考点前所必须要详细地加以研究的一个关键问题。因此, 对一个具体的VLBI测量系统来说, 它在参考系工作上的实际贡献, 将取决于它的定位精度和分辨率两个方面。只有高定位精度, 才能高精度地定义一个射电参考系; 而有了高分辨率, 也才有可能对源的变化情况作出监视和测量, 才能维持好这个射电参考系。这是VLBI测量系统在建立和维持一个射电参考系工作中应该考虑的问题。

参 考 文 献

- [1] Fricke, W., Veröffentlichungen ARI Heidelberg, No. 31, (1985).
- [2] Roser, S., The F. A. S. T. Thinkshop, (1983).
- [3] Lestrade, J. F., et al., The Second F. A. S. T. Thinkshop, (1985).

- [4] Fricke, W., *Mitteilungen Serie A*, ARI Heidelberg, Nr. 158, (1984).
- [5] Walter, H. G., *Astron. Astrophys.* **89** (1980), 198.
- [6] Clark, T. A. et al., *Astron. J.* **81** (1976), 599.
- [7] Elsmore, B. and Ryle, M., *M. N. R. A. S.*, **174** (1976), 414.
- [8] Wade, C. M. and Johnston, K. J., *Astron. J.*, **82** (1977), 791.
- [9] Purcell, G. H. et al., IAU Coll. No. 48, ed. by F. V. Prochazka et al., **185**, (1979).
- [10] 王叔和、须同祺、陆佩珍, 高精度射电干涉观测基本射电源位置表(待发表).
- [11] Fanelow, J. L. et al., *Astron. J.*, **89** (1984), 987.
- [12] Purcell, G. H. et al., NASA Conference Publication, 2115, (1980).
- [13] Perley, R., *Astron. J.*, **87** (1982), 857.
- [14] Argue, A. N. et al., *Astron. Astrophys.*, **130** (1984), 191.
- [15] Johnston, K. J. et al., *Astron. J.*, **90** (1985), 2390.
- [16] Herring, R. et al., in *Finding Charts of Radio Stars for the Hipparcos Mission*, IACA/ARI (1985).
- [17] Debarbat, S., private communication, (1986).
- [18] Johnston, K. J. et al., *Astron. J.*, **90** (1985), 1343.
- [19] Florkowski, P. R. et al., *Astron. J.*, **90** (1985), 2381.
- [20] Cotton, W. D., NASA Conference Publication, 2115, (1979).

(责任编辑 谢应纯)

Fundamental Reference Frame and Radio Astrometry

Xu Tongqi Li Zhengxin

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, the importance of fundamental reference frame, its present situation and progress, the significance and the role of radio astronomy in establishing and improving a fundamental reference frame, the progress of radio astronomy reference system etc, are discussed.