

国际天球参考系

金文敬^{1,2} 夏一飞³ 唐正宏^{1,2} 王叔和^{1,2}

(1. 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2. 中国科学院国家天文观测中心 北京 100012)

(3. 南京大学天文系 南京 210093)

摘 要

阐述了 1998 年 1 月 1 日起 IAU 采用的国际天球参考系的定义, 以及它与以往采用的光学天球参考架 FK5 的关系。介绍了国际天球参考系在射电波段的实现过程、其稳定性的维持方法和它与依巴谷星表之间的关系。重点描述了影响国际天球参考架稳定性的物理因素——河外射电源的结构及其变化、射电源喷流的视超光速现象和由银河系盘星和大质量致密晕的引力透镜效应引起的视自行等。最后, 对我国 VLBI 基地在河外射电参考架维持方面可以开展的课题提出了若干建议。

关键词 天体测量 — 参考系 — 射电源

分类号: P129

1 前 言

研究天体的位置与运动需要一个高精度的、稳定的天球参考系。以往采用的光学参考系并不是惯性参考系, 如 FK5 相对于河外射电参考系每年有 0.7mas 的旋转^[1,2]。IAU 第 21 届大会(阿根廷, 布宜诺斯艾利斯, 1991) 提出采用以河外射电源位置为基准的河外射电参考系作为天球参考系^[3], 因为河外射电源非常遥远, 在目前的观测精度下, 其自行可忽略, 故由它们构成的参考系是准惯性的, 而它们的位置通过 70 年代发展起来的甚长基线干涉测量(VLBI) 技术可以精确测定。经过 IAU 参考架工作组(WGRF) 的多年努力, 1997 年在日本京都召开的 IAU 第 23 届大会上, 通过了参考架工作组提出的由 608 颗河外射电源实现的国际天球参考系(ICRS)^[4,5], 并决定自 1998 年 1 月 1 日起, 在天文研究、空间探测、大地测量以及地球动力学等领域中采用。

值得指出的是, 国际天球参考系只是一个准惯性参考系。早在 80 年代, 人们就发现 VLBI 观测所选择的虽是致密河外源, 但大部分在精细结构上仍为展源, 1987 年 Charlot 和 Tang 研究了这些源的结构对测定时延的影响^[6~8]。真正测定这些源的结构则是美国国立射电天文台(NRAO) 负责的甚长基线干涉阵(VLBA)^[9]。自 1994 年至今已得到 412 颗源的结构, 其中

193 颗源的结构对 VLBI 观测的影响值和结构指数也已给出^[10]。然而源结构在随时随地变化着,已发表的 412 个源的结构仍需要不断监测^[11]。1994 年在荷兰海牙召开的 IAU 第 166 次讨论会上,美国海军天文台 Eubanks 第一次给出用全球 VLBI 观测得到的河外射电源的视自行^[12],这种视自行会引起国际天球参考架的微小旋转。近年来不断对此现象进行讨论,一般认为这是源结构的变化和引力透镜效应的反映,因此在空间 VLBI 和亚毫角秒空间光学望远镜的科学目标中都提出对引力透镜效应进行检测^[13]。通过在时延中加上源结构变化改正,并考虑光行差和宇宙物质分布变化引起的射电源视自行后,河外射电参考架稳定性可达到微角秒 (μas) 量级。

2 ICRS 的定义和实现

光学天球参考系 FK5 是基于地球在空间运动的动力学模式,即采用动力学方法定义其春分点和赤道面,而国际天球参考系 (ICRS) 则是通过一套河外射电源的位置来实现的,它基于运动学的概念。

ICRS 的原点为太阳系质心,基本平面靠近 J2000.0 平赤道。J2000.0 时平极在 ICRS 中的坐标在 18^{h} 方向是 $(5.07 \pm 0.01)\text{mas}$, 在 12^{h} 方向是 $(17.13 \pm 0.01)\text{mas}$ ^[14], 这表明 ICRS 的极点与 J2000.0 平极的距离小于 20mas ^[5]。1995 年 Souchev 用 1979~1994 年的 VLBI 观测^[15]、Charlot 用 16 yr 的 VLBI 和 24 yr 的 LLR 观测也得到相似的结果^[16], 其值分别为 $(5.3 \pm 0.1)\text{mas}$ 、 $(18.0 \pm 0.1)\text{mas}$ 和 $(4.7 \pm 1.0)\text{mas}$ 、 $(17.5 \pm 1.0)\text{mas}$ 。

ICRS 的 X 轴方向根据三部射电源表中 23 颗河外射电源的赤经采用值来确定,这三部射电源表分别由美国的哥达德飞行中心 (GSFC)、喷气推进实验室 (JPL) 和国家大地测量局 (NGS) 三个单位给出,它们的赤经原点为 3C273B,在 FK5 星表中其赤经值为 $12^{\text{h}}29^{\text{m}}06^{\text{s}}.6997$ 。利用 VLBI 和 LLR 的地面参考系和地球指向参数推出 ICRS 赤经原点相对于 J2000.0 动力学分点的距离为 $(78 \pm 10)\text{mas}$, 这个结果与 Frick、Schwan 和 Morrison 推导出的 FK5 赤经原点偏离分别为 80 和 100mas 是基本相符的^[17~19]。

从岁差常数的系统差 $-2.5\text{mas} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、赤道面的精度 $\pm 20\text{mas}$ 以及 FK5 星表的残余旋转 $\pm 0.7\text{mas}/\text{yr}$ 来估计^[18], FK5 极位置相对于 J2000.0 平极的不确定性为 $\pm 50\text{mas}$, FK5 赤经原点的不确定性为 $\pm 80\text{mas}$, 而 ICRS 极和赤经原点与 J2000.0 的平极和动力学分点相距分别为 20mas 和 78mas , 这些值都在 FK5 的误差范围内^[20], 因此可以说新采用的 ICRS 与此前采用的光学天球参考系 FK5 是一致的,也是连续的。

ICRS 是由国际地球自转服务 (IERS) 通过全球 VLBI 观测推算的国际天球参考架 (ICRF) 来实现的, 1995 年 IAU 参考架工作组 (WGRF) 的 Ma 等人利用全球 VLBI 所有 Mark III 在 X 与 S 频道记录的观测资料 (至 1995 年 7 月止, 共有 160 万对延迟和延迟率), 采用弧参数消除法 (ARCPE)^[21] 进行平差, 得到延迟的事后拟合加权均方根残差为 32.6ps , 延迟率残差为 $104.2\text{ps}/\text{s}$, 有 1305 个“全局”解和 65 万个“弧”参数, 最后求解结果, 得到 WGRF 射电源表。通过与 RSC(IERS)95C02 的比较 (共有 133 颗共同源), 把 WGRF 旋转至 RSC(IERS)95C02, 得到了天球参考架 RSC(WGRF)95R01 解^[22,23], 并于 1997 年在 IAU 第 23 届大会上发表。以上工作中源的选择应用了以下几个准则: 源的位置精度好于 1mas ; 观测次数在 20 次以上; 几次试算中坐标差小于 3σ 与 0.5mas ; 源结构的变化和视运动很小。

从 1988 年至今, IERS 每年根据各分析中心提供的射电源表, 通过数学方法进行综合,

给出了一本综合射电源表,用以定义和实现天球参考架,并维持天球参考架的稳定,自1993年以来指向精度稳定在几十 μas 量级^[5]。而现有各射电源表之间的旋转如表1所示^[24],表中 χ^2 检验为经旋转改正后用共同星坐标差计算的, rms 残差的 Arc 项是共同源弧长差的均方差, WGRF 是 Ma 等人对全球 VLBI 数据的一次平差的结果, IERS94 和 IERS95 为 IERS 于 1994 年和 1995 年实现的天球参考架, RORF 是由美国海军天文台 (USNO) 负责射电光学参考架计划得到的一本射电源表^[25], GSFC 表则是根据 CDP/SGP/IRIS/NAVNET/NEOS 网观测数据编制的, JPL 星表是根据深空网 (DSN) 的观测结果编制的,从表1可看出这些星表有很好的—致性。河外射电参考架被认为是无旋转的,但是已发现有些源,如 3C273, 4C39.25, OJ287 的亮度分布在毫角秒尺度上存在变化^[11],而银河系盘星和大质量致密晕 MACHO (Massive Astrophysical Compact Halo Objects) 的运动亦可能造成河外射电源的视自行。

表 1 不同射电源星表间的差异

星表对	mas						
	旋转角			χ^2	rms 残差		
	A1	A2	A3		α	δ	Arc
WGRF—IERS95	0.1	-0.4	0.0	2.92	0.23	0.39	0.55
WGRF—RORF	-0.2	-0.5	0.0	2.77	0.10	0.38	0.42
IERS94—IERS95	0.0	0.0	0.0	2.85	0.30	0.31	0.52
WGRF—GSFC	-0.1	-0.1	0.0	1.68	0.09	0.29	0.39
WGRF—JPL	0.1	-0.3	-0.2	2.84	0.26	0.44	0.51
GSFC—JPL	0.2	-0.3	0.2	3.42	0.30	0.36	0.58

依巴谷星表是国际天球参考系在光学波段的实现^[2],二者之间的联系可通过下列方法实现:用 VLBI、MERLIN 和 VLA 观测射电星;用 CCD、照相底片和哈勃空间望远镜 (HST) 观测类星体相对于依巴谷星的位置;用照相观测(如 Bonn, Kiev, Lick, Potsdam, Yale/san Juan 等)确定恒星相对于河外天体的绝对自行;比较用 VLBI 和地面光学仪器观测依巴谷星所得到的地球定向参数 (EOP)。综合上述几种方法的结果,得到历元 J1991.25 时依巴谷星表相对于 ICRS 的三个旋转角为^[27]: $(0.26 \pm 0.60)\text{mas}$ 、 $(0.02 \pm 0.60)\text{mas}$ 、 $(-0.14 \pm 0.60)\text{mas}$, 它们的变率则分别为: $(0.04 \pm 0.25)\text{mas/yr}$ 、 $(-0.13 \pm 0.25)\text{mas/yr}$ 、 $(-0.15 \pm 0.25)\text{mas/yr}$ 。

Folkner 利用 1978 年 10 月至 1993 年 2 月深空网 (DSN) 的 VLBI 观测和 1969 年 8 月至 1993 年 2 月 LLR 的观测资料,联合解算地球定向参数和各 VLBI、LLR 台站的地面坐标,由于 LLR 所用的参考系是力学参考系,因此可算出 DE200 和天球参考架之间的旋转参数为 $(-2 \pm 2)\text{mas}$ 、 $(-12 \pm 3)\text{mas}$ 、 $(-6 \pm 3)\text{mas}$ ^[28]。

3 河外射电参考架的稳定性

3.1 维持河外射电参考架的数学模型

1997 年 IAU 决议采用 IERS 所定义和实现的天球参考系,作为 IAU 协议的天球参考系,又称国际天球参考系, IERS 用数学模型维持 ICRF 的稳定性,已在文献 [29] 中详细描述,本节只作概要介绍。

每年各 VLBI 资料分析中心根据历年的 VLBI 观测资料,利用各自的分析软件(如哥达德飞行中心的 CALC,喷气推进实验室的 MODEST,巴黎天文台的 GLORIA 等)进行处理,得

到射电源和观测台站的位置、地球定向参数和所用各参数的改正值。

维持河外射电参考架的稳定, 主要包括局部形变(或称局部系统差)的消除和指向的维持。针对这两个方面, IERS 采用各种不同的数学模型进行综合, 1988 年至 1991 年 IERS 采用的数学模型为:

$$\begin{aligned} A_1(i)\operatorname{tg}\delta_{ij}\cos\alpha_{ij} + A_2(i)\operatorname{tg}\delta_{ij}\sin\alpha_{ij} - A_3(i) + \alpha_{cj} &= \alpha_{ij} \\ -A_1(i)\sin\alpha_{ij} + A_2(i)\cos\alpha_{ij} + \delta_{cj} &= \delta_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 α_{ij} , δ_{ij} 表示第 i 部单独射电源表中第 j 颗射电源(基本源)的坐标, α_{cj}, δ_{cj} 是该源在综合表中的坐标, $A_1(i), A_2(i), A_3(i)$ 为第 i 部单独射电源表旋转到综合表时三个轴的旋转角, 采用加权最小二乘方法解此观测方程, 得到 α_{cj}, δ_{cj} 和三个旋转角。

为了消除各单独射电源表的局部系统差, IERS 于 1992 年采用的数学模型如下:

$$\begin{aligned} A_1(i)\operatorname{tg}\delta_{ij}\cos\alpha_{ij} + A_2(i)\operatorname{tg}\delta_{ij}\sin\alpha_{ij} - A_3(i) \\ -B_1(i)\sin\alpha_{ij}/\cos\delta_{ij} + B_2(i)\cos\alpha_{ij}/\cos\delta_{ij} + \alpha_{cj} &= \alpha_{ij} \\ -A_1(i)\sin\alpha_{ij} + A_2(i)\cos\alpha_{ij} \\ -B_1(i)\cos\alpha_{ij}\sin\delta_{ij} - B_2(i)\sin\alpha_{ij}\delta_{ij} + B_3(i)\cos\delta_{ij} + \delta_{cj} &= \delta_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

上式中 $B_1(i), B_2(i), B_3(i)$ 为辅助参数, 以消除局部形变对指向参数的影响。1993 年 IERS 采用了新的数学模型^[30]:

$$\begin{aligned} A_1(i)\operatorname{tg}\delta_{ij}\cos\alpha_{ij} + A_2(i)\operatorname{tg}\delta_{ij}\sin\alpha_{ij} - A_3(i) + D_\alpha(i)(\delta_{ij} - \delta_0) + \alpha_{cj} &= \alpha_{ij} \\ -A_1(i)\sin\alpha_{ij} + A_2(i)\cos\alpha_{ij} + D_\delta(i)(\delta_{ij} - \delta_0) + B_\delta(i) + \delta_{cj} &= \delta_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

式中辅助参数 $D_\alpha(i), D_\delta(i), B_\delta(i)$ 分别为源在赤经、赤纬方向上的相对形变和赤道改正值。1994 年 IERS 采用 RSC(GSFC)95R01 作为初始表, 把其它单独射电源表先旋转到该表方向, 然后再对源的位置进行综合处理, 得到综合表, 即在第一步中用 (1) 式作为转换公式, 只是将 (1) 式中 α_{cj}, δ_{cj} 采用 RSC(GSFC)95R01 中的值^[31]。从 1995 年至今, IERS 在第一步中改用 (2) 式作为转换公式进行综合归算, 以消除局部形变对指向参数的影响。

李金岭等人^[32,33]提出选择基本源时应采用弧长差法。其依据是两个射电源表中射电源坐标之差是两个星表的指向差和局部形变之和, 而两颗源之间的弧长差只受到局部形变影响。选择共同源中弧长差小的源作为基本源, 再根据 (1) 式来确定旋转角以维持参考架的稳定。显然, 在共同源足够时, 弧长差选源法要比 IERS 所用的方法优越。

唐正宏等人^[34]提出首先用 (1) 式解出两个射电源表之间的整体旋转角, 然后用正交函数系来拟合局部系统差。该方法消除局部系统差的效果较好。

消除个别射电源表的局部形变、并把其对综合射电源表指向的影响尽可能减小仍然是需要进一步研究的工作。

3.2 影响河外参考架稳定的物理因素

影响河外射电参考架稳定性的因素除了所用的数学模型外, 对源的位置有影响的物理特征也是重要的因素, 如: 超光速源, 其结构会随时间变化; 银河系盘星和大质量致密晕所产生的引力透镜效应将造成光线偏折, 它们绕银心的旋转运动又使偏折发生变化。

3.2.1 源的结构及其变化

现在用 VLBI 观测射电源 150 次, 其精度可达 0.25mas。然而多数源都是展源, 而且结构在变化, 根据射电源各部分的射电亮度 I 可以推算源的结构对时延的影响, 然后根据其影响可给出源的结构指数^[35], 对展源的延迟和延迟率能分别写为:

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{\partial \phi_t}{\partial \omega} = \frac{\partial \phi_g}{\partial \omega} + \frac{\partial \phi_s}{\partial \omega} = -\frac{1}{c} \mathbf{b} \cdot \mathbf{s}_0 + \tau_s \\ \dot{\tau} &= \frac{1}{\omega} \frac{\partial \phi_t}{\partial t} = \frac{1}{\omega} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} + \frac{1}{\omega} \frac{\partial \phi_s}{\partial t} = -\frac{1}{c} \mathbf{b} \cdot \mathbf{s}_0 + \dot{\tau}_s\end{aligned}\quad (4)$$

式中 \mathbf{b} 为两个 VLBI 台站的基线矢量, \mathbf{s}_0 为源中参考点方向的单位矢量 (一般为射电源核心的方向), τ_s 和 $\dot{\tau}_s$ 为射电源结构的影响, 分别称为源结构延迟和延迟率, ϕ_t 为总相位, ϕ_g 为参考点方向的几何相位, ϕ_s 为对源的亮度分布 $I(\mathbf{s}_0 + \sigma\omega t)$ 参考点而言的源结构相位。

$$\begin{aligned}\phi_g &= -\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \mathbf{b} \cdot \mathbf{s}_0 \\ \phi_s &= \arg \left[\iint_{\Omega_s} I(\mathbf{s}_0 + \sigma\omega t) \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{b} \cdot \boldsymbol{\sigma}\right) d\Omega \right]\end{aligned}$$

上式中 $\mathbf{s} = \mathbf{s}_0 + \boldsymbol{\sigma}$ 为观测点至源亮度中心的单位矢量, Ω_s 为源的展角。如果

$$\begin{aligned}Z_c &= \iint_{\Omega_s} I(\mathbf{s}_0 + \sigma\omega t) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{b} \cdot \mathbf{s}\right) d\Omega \\ Z_s &= \iint_{\Omega_s} I(\mathbf{s}_0 + \sigma\omega t) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{b} \cdot \mathbf{s}\right) d\Omega\end{aligned}$$

则有:

$$\begin{aligned}\tau_s &= \frac{1}{c} \mathbf{b} \cdot \mathbf{s}_0 + \left(Z_s \frac{\partial Z_c}{\partial \omega} - Z_c \frac{\partial Z_s}{\partial \omega} \right) / (Z_c^2 + Z_s^2) \\ \dot{\tau}_s &= \frac{1}{c} \frac{d}{dt} (\mathbf{b} \cdot \mathbf{s}_0) + \frac{1}{\omega} \left(Z_s \frac{\partial Z_c}{\partial \omega} - Z_c \frac{\partial Z_s}{\partial \omega} \right) / (Z_c^2 + Z_s^2)\end{aligned}\quad (5)$$

τ_s 和 $\dot{\tau}_s$ 可以用综合图像处理的各种数学方法 (如无限的 δ 函数, 二维的逐步常数亮度分析或无限的高斯函数) 去拟合源强度观测资料得到^[6,36]。源的结构指数由 τ_s 的大小定义, 如图 1 所示。表 2 给出了根据 τ_s 确定源结构指数的原则。

表 2 源结构指数的确定

结构指数	τ_s /ps
1	$0 \leq \tau_s < 3$
2	$3 \leq \tau_s < 10$
3	$10 \leq \tau_s < 30$
4	$30 \leq \tau_s < \infty$

当亮度中心相对于参考点变化 0.1mas 时, 相当于 6000km 基线上时延变化 10ps。每个源在 X(8.4GHz) 和 S(2.3GHz) 波段分别给出结构指数, 在 X 波段大约有 40% 的源结构指数为 3 或 4, S 波段只有少数源为 3 或 4。总共已得到 412 颗源的结构指数, 已发表 193 颗源, 其中基本源、补充源和其它源的数目分别为 75、69、49, 其它源结构指数正在处理中。现在

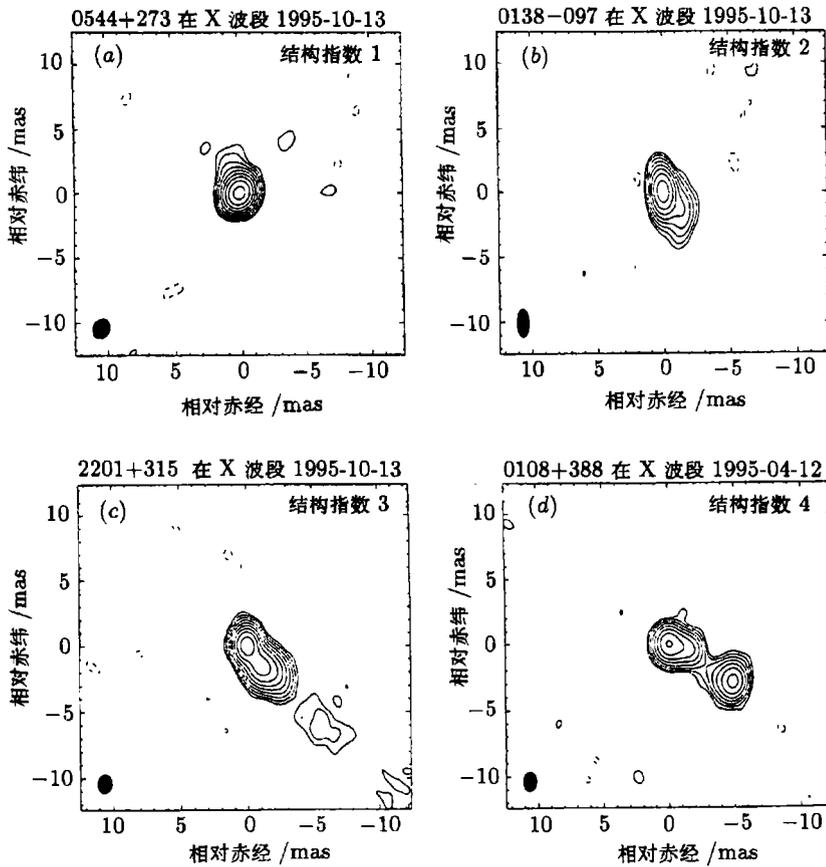


图 1 四个射电源在 X 波段的强度分布与结构指数^[24]

ICRF 中源的结构指数为 3 或 4 者在 212 颗基本源中有 4 颗, 补充源中有 7 颗, 其他源中有 12 颗。Fey^[9] 统计了 1995 年 4 月 12~13 日和 1995 年 10 月 12~13 日用 VLBA 观测得到的源结构指数 (X 波段), 表 3 同时列出了其统计结果和位置精度。

表 3 结构指数与源位置精度的关系^[9]

结构指数	源数目	观测次数	位置精度	
			$\sigma_{\alpha} \cos \delta / \text{mas}$	$\sigma_{\delta} / \text{mas}$
1	29	2637	0.15 ± 0.03	0.19 ± 0.03
2	70	6381	0.22 ± 0.04	0.29 ± 0.06
3	46	3540	0.34 ± 0.12	0.46 ± 0.15
4	23	683	1.50 ± 0.76	1.03 ± 0.37

多年观测积累还发现了源的结构随时间的变化, 如 0851+202(OJ287)、0923+392(4C39.25)、1226+023(3C273B)、1901+319(3C395) 等, 它们都是视超光速源。由于亮度变化使源的结构也发生变化, 因而产生了源的视自行, 如 1990~1992 年用 5 个 VLBI 天线对 4C39.25 相对于 0920+390 作较差位置观测, 该源具有 a,b,c,d 四个分量, 得到其 b 分量的自行为

$\mu_\alpha = (90 \pm 43)\mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$, $\mu_\delta = (7 \pm 68)\mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$ [11]。Eubanks[12] 和 Jacobs[37] 也从 VLBI 观测中发现河外射电源的自行, 表 4、5 给出几个赤经和赤纬自行较大的射电源情况。

表 4 几个具有较大赤经视自行的射电源 [37]

源名	观测时间 /yr	观测数	$\mu_\alpha / \mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$	$ \frac{\mu_\alpha}{\sigma_\mu} $
3C273	13.3	241	276 ± 40	6.9
3C395	12.2	348	252 ± 47	5.4
P1123+26	12.2	213	211 ± 43	4.9
P0528+134	12.2	179	-219 ± 45	4.9
OX036	4.0	62	-649 ± 140	4.7

表 5 几个具有较大赤纬视自行的射电源 [37]

源名	观测时间 /yr	观测数	$\mu_\delta / \mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$	$ \frac{\mu_\delta}{\sigma_\mu} $
OX036	4.0	62	901 ± 156	5.8
P0113-118	13.3	51	615 ± 144	4.3
P0823+033	12.2	175	247 ± 63	3.0
P2355-106	6.4	72	449 ± 135	3.3
3C279	13.3	98	262 ± 79	3.3

3.2.2 盘星和大质量致密晕的引力透镜效应

银河系盘星 (D) 和大质量致密晕 MACHO(M) 的引力透镜效应会使源位置有 $10\mu\text{as}$ 的偏离, 这些物质绕银心的运动和地球的轨道运动使遥远河外射电源产生了视自行。它们造成位置的移动及引起的视自行的期望值分别按下式计算 [38,39]:

$$\begin{aligned} \langle \theta_c^2 \rangle &= \sum_{i=D,M} \int \pi m_i \rho_i \left[\ln \left(\frac{L_{\max}^2 + 2m_i D}{2m_i D} \right) - 1 \right] dD \\ \left\langle \left(\frac{d\theta_c}{dt} \right)^2 \right\rangle &= \sum_{i=D,M} \frac{\pi m_i}{3} \int_{D_{\min}}^{\infty} \frac{n_i \langle \nu_i \rangle^2}{D} dD \end{aligned} \quad (6)$$

式中求和是指对视线方向上一定范围内的所有盘星 (D) 和 MACHO(M) 进行计算, θ_c 为在引力体平面上射电源图像重心与观测者 O 和源 S 连线的角偏离, D 为观测者与引力体 P 的距离, $m_i = 4GM/c^2$, M 为引力体的质量, G 为引力常数, n_i 为粒子数密度分布, L 为引力体与 O 、 S 连线的距离, ρ_i 为质量密度, 采用扁平的旋转曲线模型, 则盘星相对速度为:

$$v_D = v_f \left[\cos l + \frac{D \cos b - R_0 \cos l}{\sqrt{R_0^2 + D^2 \cos^2 b - 2R_0 D \cos b \cos l}} \right] \quad (7)$$

上式中 l, b 为盘星或 MACHO 的银经和银纬, R_0 为太阳至银心距离, v_f 为扁平旋转曲线模型的速度, 各参数取值为:

$$v_f = 220 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}, \quad m_D = M_\odot, \quad m_M = 0.1M_\odot, \quad D = 10 \text{kpc}$$

v_D 可由 (7) 式计算, 对于 MACHO 来说, 所有方向和所有距离上采用常数 $|v_M| = \frac{2}{3}|v_f|^2 \approx 180 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 对于盘星 D_{\min} 取 0, 而对 MACHO 则取检测到它的距离值即 2pc 。 n_i 可用下式计算:

$$n_D = \frac{\rho_D}{m_D} \delta(m_D), \quad n_M = \frac{\rho_M}{m_M} \delta(m_M)$$

其中盘星的密度 ρ_D 为:

$$\rho_D(x, y, z) = \frac{\Sigma_D}{2Z_D} \exp \left[-\frac{\sqrt{x^2 + y^2} - R_0}{R_D} - \frac{z}{Z_D} \right]$$

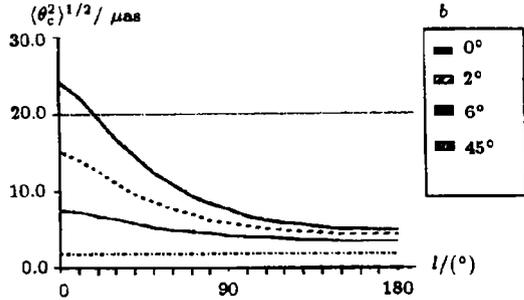


图 2 银河系盘星引起的源位置偏离的估计值随银经的变化^[38]

星和 MACHO 即 $\pi L_{i1}^2 \int n_i dD = 1$, L_{i1} 为圆柱的平均半径, 此处取 $L_{\max} = 1\text{pc}$, 由此而计算得到由银河系物质和运动引起的位置偏离和视自行分别以图 2 和图 3 表示, 在图 2 中银道附近由盘星引起的偏转大于 $10\mu\text{as}$, 而 MACHO 的影响很小。从图 3(a) 中可看出, 如果只有盘星时, 其引力透镜效应引起源的视自行在 $l = 180^\circ$ 处为零, 这是由于这时在银心的反方向, 盘星的速度为零。图 3(b) 为在有盘星和 MACHO 时, 引起源的视自行在所有方向都大于 $7\mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$, 这是因为 MACHO 是球对称的, 它们的速度分布是随机的, 且正比于质量的密度。也就是说由银河系物质引起的射电源自行在 $7 \sim 30\mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$ 之间。

除了整个太阳系绕银心以 $220\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度运动外, 地球还以 $30\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度绕太阳运动, 尽管这与银河系旋转来比相当小, 但它所产生的影响 $2\mu\text{as} \cdot \text{yr}^{-1}$ 仍应加入上述银河系产生的视自行中。此值

上式中 Σ_D 为盘星的柱密度, R_D 为盘的长度, Z_D 为盘的厚度, 坐标系原点在银心, x, y 面是银道面, 太阳的坐标为 $(R_0, 0, 0)$, 一般取为:

$$R_0 = 8.5\text{pc}, R_D = 3.5\text{kpc}, Z_D = 300\text{pc}, \Sigma_D = 46M_\odot/\text{pc}^3$$

MACHO 的密度为:

$$\rho_M = \rho_0 \frac{a^2 + R_0^2}{a^2 + R^2}$$

这里 $\rho_0 = 7.9 \times 10^{-3} M_\odot \cdot \text{pc}^{-3}$, $a = 2\text{kpc}$, 若在视线方向的圆柱中只有一个盘

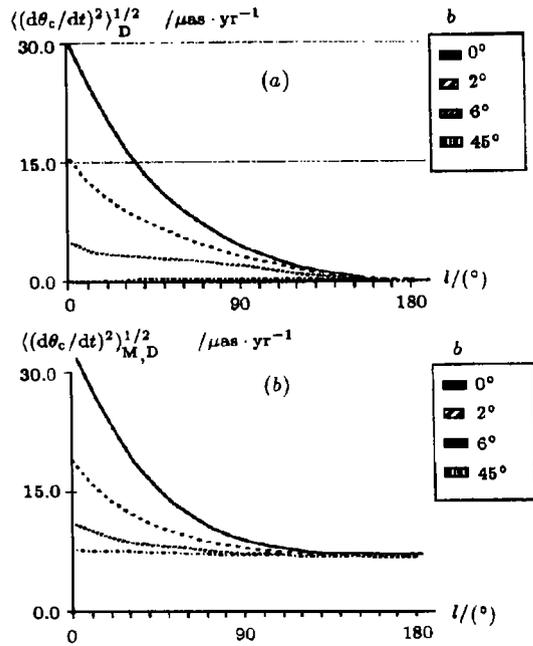


图 3 盘星和 MACHO 运动引起的源视自行随银经的变化^[38]

(a) 只有盘星 (b) 盘星与 MACHO 共同影响

每隔半年将改变符号, 如图 4 所示。

总之, 由于银河系物质的引力透镜现象引起了射电源位置 $10\mu\text{as}$ 的偏离, 而太阳系绕银河系的旋转和地球绕太阳的运动会引起河外射电源的视自行。从 VLBI 观测中已发现整个 ICRF 有 $10\mu\text{as}\cdot\text{yr}^{-1}$ 的旋转^[40], 当要求 ICRF 稳定性在 $\mu\text{as}\cdot\text{yr}^{-1}$ 量级时, 上述的影响需考虑。从另一角度来看, 检测源的位置偏离和视自行将使盘星和 MACHO 在银河系中分布的研究课题更深入, 目前正在用引力波理论讨论此问题^[41,42]。

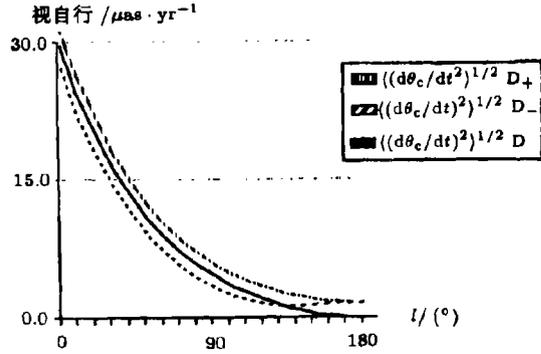


图 4 地球轨道运动引起源的视自行随银经的变化^[38]

4 我国 VLBI 可开展的工作

1987 年 11 月和 1994 年 11 月上海和乌鲁木齐分别建成了 25m VLBI 系统, 并正式投入运行, 至今仅限于与国外合作在测地和天体物理方面进行观测, 由于我国 Mark III 相关处理机还未投入应用, 所以国内两个 VLBI 系统之间的联合观测仅仅开展了测地方面的工作即基线的精确测定。相关处理机投入应用后, 根据前面的讨论, 作者建议我国 VLBI 系统可开展下列课题研究:

(1) 采用 VLBI 较差观测技术, 监测源结构变化, 如超光速源 4C39.25, OJ287 和 3C273B 等, 还有 ICRF 中结构指数为 4 的源, 如 0153+744, 0518+165, 0831+557, 1532+016 等; 用较差技术测定脉冲星如 PSR2021+51, PSR0823+26, PSR0950+08, PSR1133+16 的视差^[43]; 观测研究引力透镜现象。

(2) 行星和卫星掩源观测^[44], 如 1998 年 3 月金星掩射电源 2008-159, 2022 年 1 月水星掩源 1958-179, 可实现射电与力学参考系间的联系, 并检验相对论引力理论。

(3) 河外射电参考架中射电源的加密^[45], 用现有 608 个源为基本, 建立二级射电源的网格。1997 年全球 VLBI 网已观测除 608 个源外的其它河外射电源, 如 0430+289, 0554+242, 1308+328, 1947+079 等。此外同时利用光学望远镜精确测定其光学对应体的位置, 可以更好地联系光学和射电参考系。

致谢: 中国科学院上海天文台蒋栋荣、宋国玄研究员曾与作者进行过有益的讨论, 谨致谢意。

参 考 文 献

- 1 Mignard F, Froeschle M, In: Battarick B ed. Hipparcos Venice '97, Noordwijk, The Netherlands: ESA Publications Division. C/O ESTEC, 1997: 57
- 2 Kovalevsky J et al. Astron. Astrophys., 1997, 323: 620
- 3 Bergeron J. Transactions of IAU 21, 1992: 41
- 4 IAU Information Bulletin 1998, 81: 36
- 5 Aries E F et al. Astron. Astrophys., 1995, 303: 604
- 6 Charlot P. Thesis de Doctorat, Paris: l'Observatoire de Paris, 1989
- 7 Charlot P et al. Astron. Astrophys., 1989, 211: 261

- 8 Tang G *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1987, 185: 87
 9 Fey A *et al.* *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1996, 105: 299
 10 Fey A, Charlot P. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1997, 111: 95
 11 Guirado J C *et al.* *A. J.*, 1995, 110(6): 2586
 12 Eubank M, In: Hog E, Seidelmann P K eds. *IAU Symposium 166, Astronomical and Astrophysical Objects of Sub-milliarcsecond Optical Astrometry*, Hague, 1994, Dordrecht: Kluwer, 1997: 283
 13 Hog E *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1995, 294: 287
 14 Feissel M. *IERS Annual Report 1997*, Paris: Observatoire de Paris, 1998: II-36
 15 Souchay J *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1995, 299: 277
 16 Charlot *et al.* *A. J.*, 1995, 109: 418
 17 Fricke W. *Astron. Astrophys.*, 1982, 107: L13
 18 Schwan H. *Astron. Astrophys.*, 1988, 198: 116
 19 Morrison L V *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1990, 240: 173
 20 Feissel M. *IERS Annual Report 1997*, Paris: Observatoire de Paris, 1998: II-36
 21 Ma C *et al.* *J. Geophys. Res.*, 1990, 95: 21991
 22 Feissel M. *IERS Annual Report 1996*, Paris: Observatoire de Paris, 1997: II-19
 23 Feissel M. *IERS Annual Report 1995*, Paris: Observatoire de Paris, 1996: II-32
 24 Ma C *et al.* In: Ma C, Feissel M eds. *IERS Technical Note 23*, 1997: II-3
 25 Johnston K J *et al.* *A. J.*, 1995, 110: 880
 26 Perryman M A C *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1997, 323: L49
 27 Kovalevsky J. In: Battrick B ed. *Hipparcos Venice '97*, Noordwijk, The Netherlands: ESA Publications Division. C/O ESTEC, 1997: 57
 28 Folkner W M *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1994, 287: 279
 29 李金岭, 金文敬. *天文学进展*, 1997, 15(1): 13
 30 Feissel M. *IERS Annual Report 1993*, Paris: Observatoire de Paris, 1994: II-19
 31 Feissel M. *IERS Annual Report 1994*, Paris: Observatoire de Paris, 1995: II-23
 32 Li J L, Jin W J, *Astron. Astrophys.*, 1995 303: 276
 33 Li J L, Jin W J, *Astron. Astrophys. Translations*, 1997, 13: 1
 34 唐正宏等, *天文学报*, 1996, 37(3): 320
 35 Charlot P. *A. J.*, 1990, 99(4): 1309
 36 Pearson T J. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1984, 22: 97
 37 Jacobs C S *et al.* *Adv. Space Res.*, 1993, 13(11): 161
 38 Hosokawa M *et al.* *A. J.*, 1997, 114(4): 1
 39 武向平. *天文学进展*, 1990, 8(1): 3
 40 Eubanks M *et al.* In: Ma C, Feissel M eds. *IERS Technical Note 23*, 1997: III-93
 41 Gwinn C R *et al.* *Ap. J.*, 1997, 485: 87
 42 Pyne T *et al.* *Ap. J.*, 1996, 465: 566
 43 魏学, 博士论文, 上海: 中国科学院上海天文台, 1991
 44 Fu Y N, Xia Y F. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1995, 110: 47
 45 Feissel M. *IERS Annual Report 1997*, Paris: Observatoire de Paris, 1998: II-43

International Celestial Reference System

Jin Wenjing^{1,2} Xia Yifei³ Tang Zhenghong^{1,2} Wang Shuhe^{1,2}

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

(2 National Astronomical Observatories, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

(3 Astronomy Department, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract

Since January 1, 1998 the International Celestial Reference System (ICRS) has been adopted

by IAU. In this paper, the definition of the ICRS, the relation between ICRS and FK5, which is the previous optical celestial reference frame, are described. The procedure of the realization of ICRS in the radio wavelength, the method of maintenance of ICRS and the linkage between various reference frames such as ICRS and Hipparcos Catalogue, ICRS and ephemeris DE200 are also introduced. The influences of the physical characteristics of radio sources on the stability of International Celestial Reference Frame (ICRF) such as the structure and 'proper motion' of extragalactic radio sources, superluminal phenomenon of the jet of radio source and the gravitational lensing due to the the disk stars and MACHOs in our Galaxy are emphasized. Finally, authors suggest some research subjects to be developed for the contribution of Chinese VLBI network to the maintenance of extragalactic reference frame with sub-milliarcsecond accuracy.

Key words astrometry—reference systems—radio source

* * * * *

征 订 启 事

本刊 2000 年征订工作业已开始。本刊委托天津市半导体杂志社全国非邮发报刊《联订服务部》办理订阅事宜。定价每册 10.00 元, 全年订价 40.00 元。凡需订阅者请将订刊款通过邮局或银行汇款至下列地址即可:

邮政编码: 300220

地 址: 天津市陈塘庄岩峰路 5 号联合征订服务部

户头全称: 天津市河西区联合征订服务部

帐 号: 604248-1046196

开户银行: 工商行天津市尖山分理处

电 话: (022) 23973378; (022) 23962479 **传真:** (022) 23973378

网 址: www.LHZD.com **E-mail:** LHZD@public.tpt.tj.cn

汇款时请注明“订阅 2000 年《天文学进展》(编号 5155)”、告知订阅份数、订户名称、收件人姓名、地址、邮政编码, 以便本编辑部在刊物出版后逐期及时邮寄。

凡非通过上述渠道订阅本刊者, 如有延误或寄失, 本部概不负责。敬请谅解。

欢迎订阅。谢谢。

《天文学进展》编辑部

1999 年 11 月 10 日