

文章编号: 1000-8349(2007)02-0147-14

ICRF 的现状分析及未来的发展

乔书波^{1,2,3}, 李金岭¹, 孙付平³, 李健³

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 信息工程大学测绘学院, 郑州 450052)

摘要: 该文简要回顾了 ICRF 的发展历史和现状。介绍了天球参考架之间的连接和综合。根据目前 ICRF 的特点及研究现状和进展, 以 ICRF 的精度、数据采集的精度、源结构的分析及 ICRF 定义源的选取标准等方面深入分析了当前 ICRF 存在的缺陷, 并结合当前的各种软硬件条件分析了 ICRF 的改进趋势, 对未来的 ICRF 建立和维持作了展望。

关键词: 天体测量学; 国际天球参考架; 综述; VLBI; 源结构; 结构指数

中图分类号: P129 **文献标识码:** A

1 引 言

在天文学及地球科学的各个研究领域中, 为了描述各种天体的位置和它们的各种运动状态以及实时发生的各种天文、地球物理现象等, 我们都需要选择相应的参考系作为参考。例如描述银河系中恒星的运动, 星系团、星系和疏散星团中成员星的运动, 太阳系行星和卫星的自转及其轨道运动等。

运动和位置并非绝对概念, 只能相对于某种参考进行描述。这样的描述在数学上可以借助于任意的参考坐标系来实现。但是对于地球科学和天文学研究则绝非如此简单, 必须考虑它们的物理背景, 要求某点的坐标必须绝对可得。即要求目标相对于参考点的坐标必须是可观测的。

参考架是参考系的具体物理实现, 进而定量地描述目标的坐标或运动。对应于地球称为地球参考架 (TRF), 对应于空间则称为天球参考架 (CRF)。它们的实现都基于某种推理下的普适规律, 即参考系。

描述天体的运动, 需要一个高精度的、稳定的天球参考系。理想的天球参考系等同于一个惯性参考系, 也称为基本天球参考系。在这个参考系中, 天体的运动方程不显含或隐含旋转与加速度项。此处所谓的理想, 是指其不可能在实际中真正实现。任何天球参考架都只是对基本天球参考系的一种近似实现。在实现中, 需要选择一个实体框架, 其在理想的天球参考系中的

收稿日期: 2005-12-20; 修回日期: 2006-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10473019、10173019、10333050、40674014)

运动可以由物理理论描述。这意味着该实体框架可以由某组选定的参数系统进行描述。这样的实现并不唯一，例如：一组射电源的位置表、一组恒星的星表、一组河外星系位置表、一个行星或卫星的运动历表等，都可以各自构成一个天球参考架，它们都是对基本天球参考系的一种实现。针对这种多样性，常将某种天球参考系的实现方式加以“协议”的限定，称为协议天球参考架 (CCRF)。在这里，“协议”也是天球参考系实现的具体做法。

用一组射电源的位置表来实现天球参考系是目前国际一致认可的做法，称为国际天球参考架 (ICRF)。这些射电源由分布在全球的许多 VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 站进行长期观测，其坐标值经过多家数据分析中心的解算结果综合而得到，精度达到 0.1 mas 水平。在本文中我们主要讨论与 ICRF 的基本现状及其发展的有关问题。

2 ICRF 的发展历史

在第二次世界大战之后，射电天文迅速发展起来，随着仪器的不断改进及观测技术的不断提高，河外天体位置的观测精度也不断提高。如 1970 年用联线干涉仪 (CEI) 得到的射电源位置精度优于 1 as，而至 1976 年已提高到 20 mas，VLBI 测定河外射电源的位置也从第一次实验推算的精度 1~3 as 提高到 2 mas^[1]。

河外射电源是距离地球数亿光年的河外天体，在目前的观测精度下，几乎无法观测到其自行，故认为射电源是在天球中不动的点。这些不动的河外天体构成了天球中的一个很好的参考背景，因而用河外射电源建立天球参考架无疑是一个最理想的状态。1985 年第 19 届 IAU (International Astronomical Union) 大会上首次提出以河外射电源为基准的准惯性参考架的概念，通过 MERIT (Monitoring Earth Rotation and Intercomparing Techniques) 联测，逐步建立了用河外射电源精确建立天球参考架的算法及维持其稳定性的原则。国际地球自转服务 (IERS) 建立之后，每年公布由全球 VLBI 观测得到的 ICRF。根据天球参考架的研究需要，1988 年第 20 届 IAU 大会组建了参考架工作组 (WGRF)，该工作组专门负责研究天球参考架及地球参考架的建立与维持等工作。

在 ICRF 公布之前，FK5 光学星表作为基本天球参考架。由于光学参考系并不是惯性参考系，如 FK5 星表相对于河外射电参考架每年有 0.7 mas 的旋转，且 FK5 的自行精度在赤经和赤纬方向上分别是 ± 0.7 mas/a 和 ± 0.8 mas/a^[2]。与恒星不同，由于在目前的观测精度下无法观测到河外射电源的自行，认为它们是不动的。可以把河外射电源作为参考基准，它们的位置可由 VLBI 技术精确测定，这些为河外射电参考架的建立奠定了很好的理论基础。由河外射电源实现的参考系是准惯性的，也是目前最理想的天球参考系。考虑到河外射电参考架的众多优点，1991 年召开的第 21 届 IAU 大会正式提出，采用以河外射电源的位置为基准的河外射电参考系作为新的天球参考系的理论，建议使用河外射电源为基准的准惯性天球参考架。1994 年第 22 届 IAU 大会又从理论上给出了用河外射电源建立天球参考架的标准。经过多年的努力，Ma Chopo 等人^[3]于 1995 年完成了基于 Mark III 系统下的全球 IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) 站 1979—1995 年间的 X 与 S 波段的所有观测资料的分析处理，第一次系统地得到了由河外射电源实现的 ICRF。在 1997 年在日本京都召开的第 23 届 IAU 大会上，WGRF 提出的用 608 颗河外射电源实现的 IERS1995 版本的天球参考

系作为国际天球参考系 (ICRS) 的决议得到通过。大会决定自 1998 年 1 月 1 日起, ICRF 代替 FK5 作为基本天球参考架, 完成了 ICRS 在射电波段的实现^[4], 同时决定采用依巴谷星表作为 ICRS 在光学波段的实现^[5]。

ICRS 是基于运动学定义的参考系, 其原点在太阳系质心, 其坐标轴相对于一组河外射电源是固定的。ICRS 由河外射电源、类星体、BLLac 源和几个活动星系核 (AGNs) 的精确坐标所定义的 ICRF 来实现。

3 ICRF 的基本现状

目前河外天体的位置观测精度都优于毫角秒量级, 但最终的精度还受到射电波段上源结构不稳定性的影响。为了维持稳定的参考指向以及连续对射电源坐标进行改进, 要求连续地、定期地对天球参考架进行维持, 为此定义源的数目已经由 1988 年的 23 颗增加到 1995 年的 212 颗。连续实现的天球参考架之间的比较表明每年存在有很小的偏差, 就连续实现的天球参考架的相对定向来说, 从最初的 0.1 mas 逐渐收敛到 0.02 mas。

现阶段采用的基本天球参考架仍是第 23 届 IAU 大会公布的 ICRF, 它的最新版本是 ICRF-Ext.2。ICRF 的定义是一种几何上的运动学定义, 与之前的基本天球参考架 FK5 星表相比, 所不同的是: 它是由河外天体 (射电源及类星体) 建立的参考框架; 坐标轴的指向不再与赤道及黄道有关, 而是由 212 颗致密的河外射电源确定。整个 ICRF 框架由 608 颗源构成, 源的位置解算均基于 VLBI 的双频 2.3 GHz (S 波段) 和 8.4 GHz (X 波段) 的 MarkIII 观测系统。采用的数据为自 1979 年 8 月—1995 年 7 月之间共 1 600 000 对延迟和延迟率观测量。计算源的位置采用弧参数消去法^[6]进行平差。整个框架下的 608 颗源又被分成 3 类^[4]: 第 1 类称为定义源, 由致密的 212 颗源构成, 定义源用于定义参考架轴的指向, 因此相对来说这 212 颗源在整个框架中的结构是最致密和最稳定的, 其单个源的位置精度均优于 $250 \mu\text{as}$, 参考架轴的定向精度约为 $20 \mu\text{as}$; 第 2 类称为候选源, 由 294 颗相对观测较少的源构成; 第 3 类称为补充源, 由 102 颗不太稳定的源构成。候选源和补充源作为 ICRF 中源的补充和加密。ICRF 的特点为^[7]: 与 FK5 光学星表在定向上有很好的一致性; 源的分布非常不均匀, 212 颗定义源中南半球仅占 30%。

ICRF 建立后, WGRF 又经过几年的努力, 对 ICRF 进行了扩充, 先后公布了两个扩充版本。1999 年, ICRF 的第一个扩充版本 ICRF-Ext.1 公布^[8], 其所使用的数据时间跨度为 1994 年 12 月至 1999 年 4 月, 总的观测量为 600 000 对延迟和延迟率, 共 461 个时段, 此版本中增加 59 颗新源作为候选源和补充源。2002 年, ICRF 的第二个扩充版本 ICRF-Ext.2 公布^[9], 其所使用的数据时间跨度为 1999 年 5 月至 2002 年 5 月, 总的观测量为 1 200 000 对延迟和延迟率, 共 400 个时段, 此版本又增加 50 颗新源作为候选源和补充源。ICRF-Ext.2 是目前 ICRF 的最新版本, 虽然未增加定义源的数目, 但它在最大范围内综合了国际上各家分析中心的数据, 并对源位置重新进行了综合解算, 是目前最高精度的一次解算, 被认为是天球参考架的一个标志性的里程碑。它综合使用了 VLBA (Very Long Baseline Array) 的 RDV (Research and Developments for VLBI) 的所有可用的数据资料。VLBA RDV 通过美国海军天文台 (USNO)、哥达德空间飞行中心 (GSFC) 及美国国家天文台 (NRAO) 等国际上多家数据

分析中心进行综合解算的数据,其主要目的是为了研究和发展 VLBI 技术。在 ICRF-Ext.2 解中,使用了 VLBA RDV 数据,也是为了提高解算精度,总延迟观测测量超过 652 000 个。至此,目前 ICRF 的总源数目达到 717 颗,其在天球中的分布密度为约每 8 平方度一颗源。

4 天球参考架的连接

由于观测手段的不同,CCRF 可以在不同的波段实现。现今存在 3 类 CCRF:即动力学、光学和射电天球参考架。它们分别以太阳系内天体、恒星和河外射电源为实体。这几种 CCRF 之间存在着多种差异:描述 CCRF 中天体的位置与运动,以及定义 CCRF 基本元素所用到的参数、常数系统、原理和力学模型的差异;观测技术方法以及影响观测误差因素的差异;观测数据类型以及处理观测数据的方法、过程等差异的存在。现在国际上一致认可的基本天球参考架是由河外射电源建立的 CCRF。ICRF 只能直接服务于射电波段的天体测量工作的需要,而许多天体测量则是工作在光学波段或其它波段。为了使其它的 CCRF 统一到 ICRF,需要研究它们之间的联系,即所谓天球参考架的连接。此外,许多研究需要综合运用不同观测技术的资料,消除不同 CCRF 之间的差异,这也同样需要通过天球参考架的连接来实现。因而实现不同参考架之间的连接和建立统一的 CCRF 十分重要^[10]。

4.1 连接方法

不同天球参考架之间的连接方法与原理是直接引起 CCRF 之间差异的因素。总的来说,连接不同天球参考架的方法包括直接连接和间接连接^[11]。通过比较不同参考架中共同天体的位置和运动,或通过掩星、掩源观测,进而将两种参考架连接起来,称为直接连接;通过比较不同观测技术得到的地球定向参数(EOP)序列以及测地参考架之间的关系,建立相应天球参考架之间的联系,称为间接连接。

4.1.1 直接连接

参考架之间的比较大多采用直接比较某历元的共同天体的方式。同一天体的天球坐标值之差直接显示了不同参考架之间的差异。这样的共同天体的比较也可以发生在不同类别的参考架之间。例如,通过中星仪、等高仪或空间望远镜等光学仪器观测得到的射电星、射电源光学对应体的位置,可以和 VLBI 等观测到的射电位置进行比较,进而建立光学—射电参考架之间的连接。相对于恒星背景的小行星、行星系统定位,可以给出历表和光学参考架之间的连接参数。同时,有甚大阵观测得到的小行星、行星位置,可以推演动力学和射电参考架之间的联系。VLBI 可以提供短周期脉冲星的位置,从地球的轨道运动和脉冲的到达时间也可以获得其位置,由此可以分析射电与行星系统参考架的高精度连接参数。

直接比较也可以延伸至天体位置的重合。通过日食观测,可以建立月历表和行星历表之间的联系;月掩星、射电源观测可以建立月历表与恒星、射电参考架之间的联系。对行星卫星和月球转发器的 VLBI 较差观测,同样可以建立射电参考架与月历表和行星历表之间的联系。一个好的比较需要足够数量和全天球均匀分布的观测。

4.1.2 间接连接

通过比较不同观测技术得到的地球定向参数(EOP)序列以及测地参考架之间的关系,建立相应天球参考架之间的联系^[12]。已知协议地球参考架(CTRF)与协议天球参考架(CCRF)

之间的关系为

$$[\text{CTRF}] = (\bar{S} \cdot \bar{N} \cdot \bar{P}) [\text{CTRF}] , \quad (1)$$

式中, \bar{S} 、 \bar{N} 、 \bar{P} 分别是地球自转、章动、岁差旋转矩阵。它们之间的差值可表示为

$$A\delta_1[\text{CTRF}] = B\delta_2(\bar{S} \cdot \bar{N} \cdot \bar{P}) + C\delta_3[\text{CCRF}] , \quad (2)$$

式中, A 、 B 、 C 为系数, δ_i 表示矩阵的微分形式。有如下两种情况:

1) 当测站网相同时, 如果岁差、章动不变, 则可从 ERP 的观测中获得 CCRF 的差异,

$$\delta_1[\text{CTRF}] = 0, \quad \delta_2(\bar{S} \cdot \bar{N} \cdot \bar{P}) = \delta_2(\bar{S}) , \quad (3)$$

$$B\delta_2(\bar{S}) + C\delta_3[\text{CCRF}] = 0 . \quad (4)$$

用比较地球自转参数推出天球参考架之间的差异。

2) 若 SNP 为采纳值, 从各种 CCRF 确定测站坐标, 由测站坐标之差可反推 CCRF 之差,

$$\delta_2(\bar{S} \cdot \bar{N} \cdot \bar{P}) = 0 , \quad (5)$$

$$A\delta_1[\text{CTRF}] = C\delta_3[\text{CCRF}] , \quad (6)$$

尽管间接方法没有直接方法精确, 但可以用于各种参考架之间的比较。

4.2 具体的连接

4.2.1 光学天球参考架与射电天球参考架的连接

自 1998 年 1 月 1 日起, 在天文、测地、地球物理、空间研究等各领域中都采用了 ICRS, 但是最新的版本也仅有 717 颗源。平均每 8 平方度仅有一颗源, 而且在全球分布非常不均匀, 因而在实际使用中很不方便。而依巴谷星表包含 118 218 颗星, 平均每平方度有 3 颗星, 因而将依巴谷星表与射电天球参考架的连接非常重要, 具体有如下 4 种方法: 1) 用 VLBI 和连线干涉仪及甚大阵 (VLA) 观测射电星; 2) 利用 HST(Hubble Space Telescope) 的 FGS(Fine Guidance Sensor) 观测射电源光学对应体相对于依巴谷星的位置^[13,14], Hemenway 等人^[15]提出了用 173 颗依巴谷星表星确定 92 颗河外射电源光学对应的位置, 1993 年 4 月—1995 年 12 月, 已进行了 46 颗依巴谷星表星对 34 颗射电源光学对应体的 78 次观测; 3) 用照相观测的方法确定恒星相对于河外天体的绝对自行, 包括河外射电源的光学对应的精确测定; 4) 地球指向参数法, Vondrak^[16]在 1900—1990 年间的光学观测对依巴谷星表参考架中的地球指向序列做了推导, 采取了用每颗星决定地球处置参数的方法, 并考虑了各种改正: 如板块、引力弯曲等。用此序列和间接方法, 推导了依巴谷星表参考架与河外参考架之间的关系。

4.2.2 历表天球参考架与射电天球参考架的连接

建立基于太阳系内天体的历表参考架与射电天球参考架的连接是为了满足深空导航研究的需要, 而且有利于射电参考架赤经起算点与力学分点的统一^[17]。可由如下 4 种方法实现: 1) 较差 VLBI 技术观测宇宙飞船与类星体可以确定射电参考架与历表参考架的相对定向; 2) 外行星及其卫星的 VLA 观测; 3) 太阳系内天体的射电观测和月掩星观测等; 4) 毫秒脉冲星的 VLBI 观测可以通过射电干涉观测与类星体位置相连, 计时观测可以与历表相连, 进而将射电与历表参考架连接起来。

4.2.3 光学天球参考架与历表天球参考架的连接

光学与历表参考架的连接可以通过行星的光学观测和掩星观测来实现。如利用子午观测、等高观测、照相或 CCD 光学观测方法在光学参考架中测定大行星的光学位置等。相对于恒星背景的行星定位已经获得了 $0''.05$ 精度的连接。此外依巴谷星表卫星还可观测太阳系内天体。在依巴谷星表的有效工作时间内, 有 48 个小行星和大行星的 2 个卫星被观测过。可以在 5 mas 左右精度上连接依巴谷星表与历表参考架^[18]。

5 射电天球参考架的综合

由于不同的 VLBI 数据分析中心所采用的观测数据、所使用的软件、解算中所采用的具体方法的不同以及所采用的参数等的差异, 使得每个 VLBI 分析中心所得到的解算结果也不尽相同。不同的结果可以得到不同的射电源表, 可建立不同的天球参考架。在 ICRF 的建立和维持工作中, 往往是根据各个 VLBI 分析中心得到由不同的射电源表综合为一本源数多、天区覆盖广并能消除局部系统差的综合表。具体可利用下面几种方法^[19]。

5.1 数值平均法

假设有 n 本射电源表, 某一源在综合表、第 i 本观测星表中的位置分别用 b 和 b_i 表示, Δc_i^b 表示某一源在观测星表中存在的系统差, 则

$$\begin{cases} b + \Delta c_i^b = b_i \\ \sum \Delta c_i^b = 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) . \quad (7)$$

通过共同源法可得到每个观测表的系统差, 然后加在每个源上, 再作平均, 则可以得到综合表中每个源的坐标值。然而每个观测星表的精度是不一样的, 如果对每个星表采用权重 w_i , 则观测误差方程为

$$\begin{cases} (b_0 + \Delta b) + \Delta c_i^b = b_i \\ \sum w_i \Delta c_i^b = 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) . \quad (8)$$

其中, b_0 是某一源在综合表中坐标的初值, Δb 是它的改正值。

5.2 弧长差法

Yatskiv 和 Kuryanova^[20] 于 1990 年提出弧长差法的概念, 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。假设第 k 个观测星表中第 i 、 j 两颗射电源的弧长为 S_{ij}^k 。如果不同的观测星表是无变形的, 则 i 、 j 两颗射电源的弧长应当相等; 如果观测星表存在局部形变, 则第 k 个观测星表中形变大小为:

$$\Delta S_{ij}^k = S_{ij}^k - \bar{S}_{ij} , \quad (9)$$

式中 \bar{S}_{ij} 为 i 、 j 两颗射电源在各个射电源表中弧长的平均值。选择共同源中弧长差小的源作为基本源, 再根据共同源的坐标旋转变化确定观测表和综合表的指向以维持参考架的稳定。该方法分别处理指向和局部形变, 克服了数值平均法的一些缺点^[21,22]。

5.3 小角旋转法

根据计算观测表所用 VLBI 资料的独立性 (不同网的观测) 和各观测表之间的符合程度, 把这些表分为定义表和加密表。假设已知某颗基本源在某定义表中的赤道坐标为 $(\alpha_{ij}, \delta_{ij})$, 其在综合表中的赤道坐标为 $(\alpha_{cj}, \delta_{cj})$, 则它们之间的指向差和局部形变的关系可用 3 个小的旋转角及 3 个辅助参数来表示。

1988—1991 年 IERS 采用的射电源表综合的数学模型为

$$\begin{cases} \alpha_{cj} = \alpha_{ij} - A_1(i)\tan \delta_{ij} \cos \alpha_{ij} - A_2(i)\tan \delta_{ij} \sin \alpha_{ij} + A_3(i) \\ \delta_{cj} = \delta_{ij} + A_1(i) \sin \alpha_{ij} - A_2(i) \cos \alpha_{ij} \end{cases}, \quad (10)$$

式中, α_{ij} 、 δ_{ij} 分别表示第 i 本单独射电源表中第 j 颗射电源的赤道坐标, α_{cj} 、 δ_{cj} 表示该源在综合表中的坐标, $A_1(i)$ 、 $A_2(i)$ 和 $A_3(i)$ 为第 i 部单独射电源表旋转综合表时 3 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 3 个旋转角。

以上的模型只考虑了基本表与综合表间的指向差, 为了消除各单独射电源表的局部系统差, IERS 于 1993 年采用了新的数学模型, 可参阅文献 [23]。

6 ICRF 的完善及未来的 ICRF

由前所述, 目前的 ICRF 是由 212 颗定义源、717 颗总源构成的。源的数量少、分布不均匀, 不能满足目前的许多研究工作的需要, 因而 ICRF 面临着极大的挑战。各种新仪器、新技术的出现, 为 ICRF 的完善创造了有利的条件。

在射电波段, 英国的 MERLIN (Multi-Element Radio Linked Interferometer Network) 干涉阵将进一步升级成 e-MERLIN [24]。它将利用光纤电缆传送宽带的信号, 以几 mas 的精度观测到 mJy 量级的源的绝对位置, 并且准备从 2008 年开始观测 100 000 个这样的源。这样的测量将会使 ICRF 在现有的精度上使源的密度增加 100 倍, 并且可以使 ICRF 在赤纬约 -20° 方向的微弱源得到扩展。

在光学波段, Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) 空间计划将在 2010—2012 年之间发射第二代天体测量卫星 [25]。它将观测所有的恒星以及星等暗至 20 mag 的类星体和射电源光学对应体。其观测精度对于 15~18 mag 的天体达到 $10\sim 40 \mu\text{as}$, 对于 20 mag 的天体将达到 $100\sim 200 \mu\text{as}$ 。基于现在的估计, 它将可以观测到 500 000 颗这样的类星体和射电源 [26]。因此将会有大量的直接在可见光波段观测得到的定义源观测资料来组建河外射电参考架。未来的 ICRF 很可能又回到光学波段, 由 Gaia 星表来实现。

美好的前景推动我们不断完善现有的 ICRF, 在 Gaia 空间计划未实施的最后几年里, 如何建立更高精度的、稳定的、完善的 ICRF 对 VLBI 技术提出了巨大的挑战: 必须设计更合理的 VLBI 观测程序、发展新的 VLBI 观测技术及设备。这种挑战将激发现有 ICRF 不断完善。具体可从以下几个方面来实现。

6.1 ICRF 的精度提高

目前, ICRF 是由射电源来实现的, 其精度的好坏取决于 VLBI 观测精度。提高 VLBI 的观测精度的关键是改善 VLBI 的观测、校准和分析系统, 具体包括模型精度、数据获取技术

及观测目标的选取。对于影响 ICRF 的精度具体因素来说, 最主要的误差来自对流层 (也称中性大气) 的影响, 它对源位置的影响量级约为 $150\sim 250\ \mu\text{as}$ 的误差; 第二大误差为数据获取误差, 其对源位置的影响量级约 $50\sim 100\ \mu\text{as}$ 的误差; 此外是源结构造成的误差, 这种误差对源位置的影响有很大的随意性, 与具体源的结构及其变化以及观测频率有关^[27]。如果能够很好地减弱这几类误差源的影响, VLBI 的观测精度可达到数十 μas 的量级, 与 Gaia 空间计划的标称精度相当。这对 ICRF 的建立和维持无疑是有利的。

6.1.1 对流层模型分析

河外射电源发射的射电信号在传播中, 对于电离层的影响可以利用 VLBI 的双频观测技术得到精确有效的改正; 而对于对流层的影响, 不能得到很精确的改正, 它主要依赖于对流层延迟改正模型的精度, 一般都采用映射函数的模型进行改正。由于对流层对信号的延迟影响在全球是不对称而且是可变的^[28], 因此出现了多种映射算法^[29]。当前的研究主要是利用光线跟踪方法使用全球的气候数据来计算映射函数。然而, 除了光线直接跟踪到的那些测站之外, 很难在时间和空间上精确地估计出的其它区域的气候变化, 从而影响了模型的精度。

另外一种方法是在每个 VLBI 观测台站安装高精度的水汽辐射计, 以校正对流层延迟影响^[30]。这种仪器是由 Cassini 的引力波试验发展起来的, 能有效地改正 VLBI 对流层延迟。但是由于该仪器的造价非常昂贵, 当前也没有制造该仪器的计划, 使得该仪器的使用受到限制。因此, 目前仍然使用对流层映射函数模型的方法进行改正。当前主要使用的两个模型是 IMF (Isobaric Mapping Function)^[31] 和 VMF (Vienna Mapping Function)^[32]。

6.1.2 数据获取技术分析

这类误差包含的范围很广, 包括原子钟的钟差、相位校准误差及数据记录介质所造成的误差等。这些误差综合在一起, 可以看作是数据获取所引起的误差, 是影响 VLBI 数据处理结果的第二大误差。

虽然光纤技术在很大程度上削弱了由于系统给天线分配频率标准时所造成的误差, 原子钟 (氢钟) 的钟差仍然达到 VLBI 敏感水平量级的误差。目前正在研制的汞离子钟, 将有望在长时间 (几 h~1d) 尺度上提高精度, 但该技术尚未在 VLBI 里实现^[33]。将相位校正信号注入到信号链中时会产生不完整的脉冲, 这将不能有效地改正天线的光学系统 (包括基本天线面、副反射器和馈源) 误差。此外, 尽管知道偏振的缺陷可能造成较大的误差, 但通常也没有对此项进行改正。总之, 改正的不完善, 将造成相位的在时域和频域都不稳定, 并且使得在某种程度上影响了观测。尽管这是一个比较长的过程, 但是研究这些误差出现的原因对于提高观测数据的质量是很有必要的。

在以往基于磁带记录数据的方式下, 在具体观测中, 由于磁带记录数据速度的限制, 丢失了大量的有用原始信息。同时在数据存储过程中, 随着时间的推移, 磁带磁性的变化和减弱也大量的观测数据丢失。然而这些问题可以由现在的基于磁盘的记录数据系统很好地解决, 这种新的数据记录系统使观测数据的可靠性提高了许多, 并且在时间域和频率域上均匀地采样使采集数据技术迈出了重大的一步。同时, 在基于磁盘的数据采集系统中, 数据记录速率也大大提高, 从而也明显地提高了信噪比。如现在使用的 Mark V 系统中磁盘的数据记录速率达到 $1\ \text{Gb/s}$ 。从长远观点看, 现代数字视频转换器也将取代 Mark IV 系统中类似的视频转换器, 这一技术将进一步地提高数据记录速率, 预计到 2010 年, 数据记录速率将达到 $4\ \text{Gb/s}$ 。

6.1.3 源结构的影响分析

值得指出的是, ICRS 只是一个准惯性参考系。早在 20 世纪 80 年代, 人们就发现 VLBI 观测所选择的虽然是致密的河外射电源, 但大部分的观测结果并不是严格致密的点源。随后的各种各样的 VLBI 观测结果的图像也表明, 在 VLBI 所观测到的河外射电源中, 绝大部分的源都不是致密的点源, 而是呈现一定结构的展源^[34,35]。

源结构的存在及其变化对由 VLBI 观测数据计算出来的源的位置的稳定性有很大的影响, 从而影响了 ICRF 的定向精度。1987 年 Charlot 等人^[36,37] 和 Tang 等人^[38,39] 开始从事源结构对 VLBI 观测时延影响的研究工作。真正测定源结构的是美国国立射电天文台 (NRAO) 负责的甚长基线干涉阵 (VLBA)^[40]。“结构指数”是一种有效地判断源结构好坏的参数指标^[34], 它的取值范围在 1~4 之间, 值越大说明结构越不好, 结构指数的数值对 VLBI 群延迟的影响呈指数关系。Fey 和 Charlot^[35] 以及 Charlot^[41] 分析了 ICRF 中的 450 颗源, 结果表明有 57% 的源的结构指数是 1 或 2, 这些源的结构被认为是比较好的。在 8 GHz 的标准频率下, 结构指数为 1 或 2 的被认为是致密的或是比较致密的源, 而结构指数为 3 或 4 的则被认为是展源。图 1 为由于源的结构指数引起的延迟残差与源结构指数之间的关系, 在图中可以看出, 随着结构指数的增加, 源结构引起的误差急剧地增大。范围从结构指数为 1 的几 ps 增加到结构指数为 4 的约 20 ps。

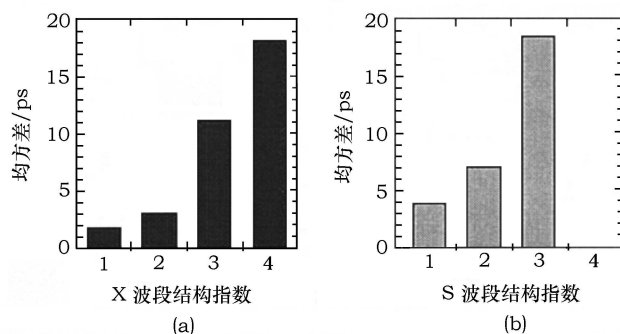


图 1 结构延迟与结构指数的关系

最近几年, Feissel-Vernier^[42] 与 Gontler 等人^[43] 在源的稳定性方面做了大量研究工作。他们以源的稳定度为基准, 在理论上给出了一种新的选择天球参考架中定义源的标准。他们对 1990—2002 年间的观测资料进行了处理, 把每年 VLBI 观测到的源位置以时间序列的方式进行分析, 选择了 199 颗位置相对稳定的源作为定义源。结构指数研究表明, 相对于结构致密的源, 结构越延展的源不但其源的位置误差更大, 而且其源位置的稳定性也更差。在 Feissel-Vernier^[44] 选择的 199 颗稳定源中, 有 92% 源的结构指数值为 1 或 2, 说明它们是致密或者相对致密的源。由此可见, 结构指数的研究和源的稳定性研究结果几乎一致。因此, 结构指数值也可作为选择天球参考架的定义源的标准。但是根据这些研究, 现有的 ICRF 中有相当一部分源并不满足稳定性的选择标准及结构指数的选择标准, 说明现有的 ICRF 在选择定义源时还存在一定的缺陷, 有待继续完善。

另一种减弱源结构对 VLBI 观测影响的方法是提高 VLBI 的观测频率。一般情况下, 当观测频率很高的时候, 那些具有延展结构的源的外部结构将会呈现陡谱, 使得外部结

构部分的信号变得非常弱。在上述情况下接收到的源信号将被认为是一个具有中心亮点的源，它的延展结构对观测精度的影响就很小。2002年5月，VLBI已经实现了在K波段(24 GHz)和Q波段(43 GHz)的高频率的观测。图2显示了首次观测的108颗源在不同波段(X、K、Q波段)下的其结构指数的分布情况。结果表明，结构指数为1的源，分别在X、K、Q波段下其占总源的比例分别是32%、56%、71%。观测频率越高，结构对观测精度的影响越小。

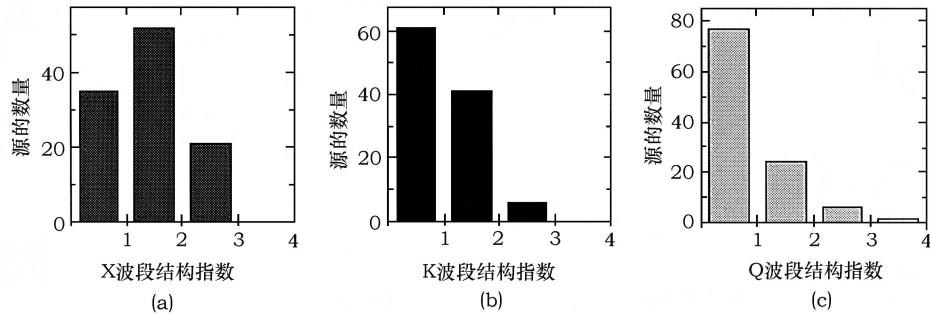


图2 结构指数与观测频率的关系

6.2 ICRF 中源的加密分析

由于当前 ICRF 的源数量较少，其密度在整个天球上仅有平均每 8 平方度一颗源。这样低的密度分布远远不能满足许多天测和测地需要，例如在较差 VLBI 应用中，要求在被测目标航天器的方向上必须有对应的参考源。这就要求源的分布有很高的密度，然而现有的源密度分布很难满足实际需求。此外，源的分布也非常不均匀，例如在 ICRF 源中，两颗角距最近的源在天球上的位置分别是南半球 15° 和北半球 13° 的地方，这给实际需要造成了更大的困难。现有的 ICRF 的另一大缺陷是其定义源在南半球的分布过少，212 颗定义源中，只有 30% 的源分布在南半球，并且位置精度相对较低，这主要是由于南半球没有建立较好的 VLBI 观测网造成的。

为了弥补现有的 ICRF 的不足，增加现有源的密度，就要求观测到信号更微弱的目标。随着 VLBI 观测技术灵敏度的进一步提高，越来越多的源将会被观测到。许多研究机构都正在积极从事这方面的研究，并制定了许多新的观测计划。例如，澳大利亚国家望远镜(ATNF)是由 8 面射电天线构成干涉阵。ATNF 联合分布在南半球的其它台站一起组成一个新的观测网。它的目标主要是观测所有的 ICRF 中位于南半球的源，以至少两倍的数量监测它们的源结构并绘制其结构图像。并且在南半球努力寻找新的源，来补充 ICRF 在南半球的缺陷^[45]。Fey 等人^[46]公布了在南半球发现的 22 颗新源的位置，Ojha 等人^[47]绘制了南半球 69 颗源的结构图像。最近 Ojha 等人^[48]又公布了南半球的 48 颗源的结构图像。

在北半球，欧洲 VLBI 观测网(EVN)制定了 ICRF 源的加密观测计划^[49]。它的目标是在特定天球位置再增加 150 颗新源以填充天球上源的空缺，使得北半球中任意相邻源之间的最大角距由现有的 13° 减小到 6° ，从而也大大提高源分布的均匀性。

EVN 的另一主要目标是，增加结构好、稳定性高的源作为定义源，来实现新的 ICRF。此外，在这些观测中利用 VLBA 校准测量得到的图像可以挑选出那些无结构或结构比较好的

源, 也可作为定义源选择标准的参考。VLBA 校准测量是选择一定的高精度的稳定源作为参考源, 以这些源构成校准器, 用校准观测方法确定周围其它源的位置。利用参考源的参考相位进行校准观测, 可以增加 VLBI 的相干积分时间, 用这种方法可以精确测定微弱目标源 (约 mJy 量级) 的位置, 同时还可以得到源的图像^[50]。VLBA 校准测量 VCS 成为 ICRF 加密观测的一种很好的测量方式。在 VCS1 观测中公布了赤纬介于 $-30^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的以前不可观测的 1 332 颗源在 2.3 GHz 频率下的图像及它们中大部分源在 8.4 GHz 频率下的图像^[51], 随后又进行了几次扩展观测。VCS2 观测得到了赤纬介于 $-20^\circ \sim -45^\circ$ 范围内接近于银道面附近的 276 颗源的位置^[52]。VCS3 观测得到了赤纬大于 -45° 范围内 360 颗新源的位置^[53]; VCS4 观测得到了赤纬大于 -40° 范围内 258 颗新源的位置^[54]。VCS1、VCS2、VCS3 及 VCS4 的观测数据均可用于未来的 ICRF 中。

6.3 广义相对论框架下的 ICRF 的建立

随着 VLBI 观测及解算精度的不断提高, 以及 Gaia 空间计划的实施, 河外射电源的位置精度将会达到数十 μas 量级。因此, 未来的 ICRF 将在 μas 量级的精度下建立。在这样高精度的情况下, 在牛顿理论框架下定义的天球参考系无法精确描述天体的运动, 而必须在爱因斯坦的广义相对论框架下定义一个四维的时空天球参考系来描述^[55]。因此 μas 量级精度下的 ICRS 也只能在广义相对论框架下来定义。

IAU 第 21 届大会决议将广义相对论作为定义天球时空参考系的理论背景。建议选择 4 个时空坐标 $(x^0 = ct, x^1, x^2, x^3)$ 使得在每个以系统质心为原点的坐标系中, 四维间隔的平方 ds^2 可以精确地写为以下形式:

$$ds^2 = -c^2 d\tau^2 = -(1 - 2U/c^2)(dx^0)^2 + (1 + 2U/c^2)[(dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2] . \quad (14)$$

上式中 c 为光速, τ 为原时, U 是系统中所有天体自身的引力势、系统外天体的引潮势之和。引潮势在质心处为 0。

根据参考系原点的不同, 给出了两种天球参考系在相对论框架下的理论定义。即太阳系质心天球参考系 (BCRS) 和地球质心天球参考系 (GCRS)。定义两参考系的原点分别位于太阳系质心和地球质心, 并且相对于遥远河外天体无整体旋转; 时间坐标由地球上运行的原子钟的时间尺度导出; 参考系中的时空基本物理量, 对原时而言是国际单位 (SI) 中的 s, 对长度而言是国际单位 (SI) 中的 m, m 是通过光速 c 的值和 SI 秒导出的。

IAU2000 决议又给出了进一步建议。对 BCRS 和 GCRS 均采用谐和坐标规范。太阳系质心参考系 (t, x) (t 为质心坐标时, TCB) 中的度规 $g_{\mu\nu}$ 的时-时分量和空-空分量用质心坐标中的推广牛顿标势 $w(t, x)$ 构成, 空-时坐标分量用质心坐标系中的矢量势 $w^j(t, x)$ 构成, 边界条件是假设两个势在远离太阳系的地方趋于 0。

地心天球参考系 (T, X) (T 为地心坐标时, TCG) 中度规 G_{ab} 的形式与质心天球参考系下的度规形式相同, 但标势知矢量分别为 $W(T, X)$ 和 $W^a(T, X)$; 这些势分为产生于地球本身引力的部分 W_E 、 W_E^a 和产生于潮汐和惯性效应的外部部分 W_{ext} 、 W_{ext}^a , 同时假设度规势的外部部分在地心处为 0 并可展为 X 的幂级数。

6.4 未来的 ICRF 展望

自从 ICRF 从 1998 年正式实施以来, 各个观测实验的实施积累了大量的高精度 VLBI 数

据, 各种观测及数据处理模型也都在不断的改进中, 有关源结构及源位置稳定性的研究也在不断深入, 使得源的分类标准及选择 ICRF 定义源的标准更加趋于合理化。此外, VLBI 硬件设施也在不断地改善当中, 新的技术不断地进步、数据采集速率不断地加快, 使得 VLBI 观测的灵敏度及数据的观测精度也在不断提高。许多国家也设计了新的大口径天线的建造计划, 如西班牙的 40 m 天线即将建成, 意大利的 64 m 天线也基本建成, 中国的密云 50 m 天线和昆明 40 m 天线也已于 2006 年 5 月投入使用。这些都将使现有的各种 VLBI 观测网更加趋于合理化, 观测灵敏度和分辨率也会相应提高。不久的将来, 源的位置精度将会达到 μas 量级, 并且整个天球中的源的密度在不断增大并逐渐趋于均匀分布。加之 Gaia 等空间计划的实施, 使得源的精度和数量都有了质的飞跃。所有这些都为建立一个新的 ICRF 做了充分的准备, 我们相信最近几年内就会有一个广义相对论框架下 μas 量级高精度的 ICRF 来替代现有的 ICRF。

7 结束语

从 1985 年第 19 届 IAU 大会首次提出以河外射电源为基准的准惯性参考架的概念至今, 每届 IAU 大会都就河外天球参考架的建立和维持等问题作出重大决策。经过了近 20 年的努力, 形成了目前的 ICRF 及其扩充加密版本。目前的 ICRF 的定义源还是 1995 年由 WGRF 的 Ma Chopo 等人给出的 212 颗相对致密的源。这个版本距今已有 10 年, 所用的观测资料也都是 10 年前的。虽然之后有过几次扩充、加密, 但是其基本源没有变化。经过多年的实践和研究表明, 当前的 ICRF 还存在很多明显的缺陷, 比如定义源的选择并不是很合理且有部分源不够稳定、源的密度和分布还不够理想等。因而亟待建立一个更合理、更稳定、更接近于理想的惯性天球参考架作为基本的天球参考架。随着 VLBI 硬件技术的飞速发展、观测资料的快速积累、数据精度的不断提高以及 Gaia 等空间计划的实施, 不久一个高精度的理想的 ICRF 将会实现。

参考文献:

- [1] Van Altena, *Astrometry* 1983, 21: 131
- [2] Kovalevsky J, Lindegren L, Perryman M A C, et al. *A&A*, 1997, 323: 620
- [3] Arias E F, Charlot P, Feissel M, et al. *A&A*, 1995, 303: 604
- [4] Ma C, Arias E F, Eubanks T M, et al. *AJ*, 1998, 116: 516
- [5] Perryman M A C, Lindegren L, Kovalevsky J, et al. *A&A*, 1997, 323: 49
- [6] Ma C, Sauber J M, Clark T A, et al. *J. Geophys. Res.* 1990, 95(B13): 21991
- [7] Fey A L. *IVS 2004 General Meeting Proceedings*, 2004, 341
- [8] the Directing Board Chairman. *1998 IERS Annual report*, 1999: 87
- [9] Fey A L, Ma C, Arias E F, et al. *AJ*, 2004, 127: 3587
- [10] 平劲松, 李金岭. *陕西天文台台刊*, 1997, 20: 88
- [11] Lindegren L, Kovalevsky J, *A&A*. 1995, 304: 189
- [12] 李金岭, 金文敬. *陕西天文台台刊*, 1997, 20: 83
- [13] Hemenway P D, Duncombe R L, Lalich A M. *American Astronomical Society*, 1995, 27: 1199
- [14] McArthur B E, Benedict G F, Lee J, et al. *ApJ*, 1999, 520: 59
- [15] Hemenway P D, Duncombe R L, Bozyan E P, et al. *AJ*, 1997, 114: 2796
- [16] Vondrak J, Feissel M, Essaifi N. *A&A*, 1992, 262: 329

- [17] Folkner W M. *A&A*, 1994, 287: 279
- [18] Bange J F, Bec-Borsenberger A, Bougeard M L. 23rd meeting of the IAU, Kyoto, Japan, 1997
- [19] 叶叔华, 黄斌. 天文地球动力学, 济南, 山东科技出版社, 2000, 186–193
- [20] Yatskiv Y S, Kuryanova A N. *INERTIAL COORDINATE SYSTEM OF/ SKY: IAU SYMP*, 1990, 141: 295
- [21] Li J L, Jin W J. *A&A*, 1995, 303: 276
- [22] 李金岭, 金文敬. 中国科学院上海天文台台刊, 1994, 15: 98
- [23] Feissel M. *IERS Annual Report 1993*, Paris: Observatoire de Paris, 1994: 11–19
- [24] <http://www.merlin.ac.uk/e-merlin/>, 2005
- [25] Zwitter T, Castelli F, Munari U. *A&A*, 2004, 417: 1055
- [26] Dischler J, Söderhjelm S. *Proceedings of the Gaia Symposium “The Three-Dimensional Universe with Gaia”*, Observatoire de Paris-Meudon, 2004
- [27] Jacobs C S, Sovers O J, Naudet C J, et al. *TMO Progress Report 1998*: 42–133
- [28] MacMillan D S, Ma C. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, 24: 453
- [29] Niell A E. *Phys. Chem. Earth*, 2001, 26: 475
- [30] Naudet C J, Keihm S, Lanyi G, et al. *IVS 2002 General Meeting Proceedings*, 2002: 194
- [31] Niell A E, Tang J. *IVS 2002 General Meeting Proceedings*, 2002: 215
- [32] Boehm J, Schuh H. *IVS 2004 General Meeting Proceedings*, 2004: 277
- [33] Prestage J D, Tjoelker R L, Maleki L. *TMO Progress Report*, 2000
- [34] Fey A L, Charlot P. *ApJS*, 1997, 111: 95
- [35] Fey A L, Charlot P. *ApJS*, 2000, 128: 17
- [36] Charlot P. *European VLBI for Geodesy and Astrometry, Proceedings of the 6th Working Meeting*, 1988: 104
- [37] Charlot P, Hough D H, Lestrade J F. *A&A*, 1989, 211: 261
- [38] Tang G, Ronnang B, Baath L. *A&A*, 1987, 185: 87
- [39] Tang G, Ronnang B. *Proceedings of the 129th IAU Symposium*, 1988: 431
- [40] Fey A L, Clegg A W, Fomalont E B. *ApJS*, 1996, 105: 299
- [41] Charlot P. *IAU XXV General Assembly, Joint Discussion 16: The International Celestial Reference System, Maintenance and Future Realizations*, Gaume R, McCarthy D D, Souchay J eds. 2004
- [42] Feissel-Vernier M. *IVS 2000 General Meeting Proceedings*, 2000: 280
- [43] Gontier A M, Le Bail K, Feissel M. *A&A*, 2001, 375: 661
- [44] Feissel-Vernier M. *A&A*, 2003, 403: 105
- [45] Fey A L, Johnston K J, Jauncey D L, et al. *IVS 2000 General Meeting Proceedings*, 2000: 164
- [46] Fey A L, Ojha R, Jauncey D L, et al. *AJ*, 2004, 127: 1791
- [47] Ojha R, Fey A L, Johnston K J, et al. *AJ*, 2004, 127: 3609
- [48] Ojha R, Fey A L, Charlot P, et al. *AJ*, 2005, 130: 2529
- [49] Charlot P, Viateau B, Baudry A, et al. *IVS 2000 General Meeting Proceedings*, 2000: 168
- [50] Peck A B, Beasley A J. *ASP Conference Series, IAU Colloquium 164*, 1998, 144: 155
- [51] Beasley A J, Gordon D, Peck A B, et al. *ApJS*, 2002, 141: 13
- [52] Fomalont E B, Petrov L, MacMillan D S, et al. *AJ*, 2003, 126: 2562
- [53] Petrov L, Kovalev Y Y, Fomalont E, et al. *AJ*, 2005, 129: 1163
- [54] Petrov L, Kovalev Y Y, Fomalont E, et al. *AJ*, 2006, 131: 1872
- [55] Soffel M, Klioner S A, Petit G, et al. *AJ*, 2003, 126: 2687

Analysis of Present Status of ICRF and ICRF in Future

QIAO Shu-bo^{1,2,3}, LI Jin-ling¹, SUN Fu-ping³, LI Jian³

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China; 3. Surveying and Mapping Institute of Information Engineering University, Zhengzhou 450052)

Abstract: ICRF(International Celestial Reference Frame) is the geometric kinematics reference frame, its newly version is ICRF-Ext.2 realized by a total of 717 extragalactic radio sources which have an average of one source per 8 square degrees on the sky, include 212 defining sources 294 candidate sources and 102 other sources. Orientation of ICRF axes is specified through 212 defining sources. The accuracy of the individual source positions is as small as $250 \mu\text{as}$ while the orientation of the ICRF axes is good to the $20 \mu\text{as}$. At present, ICRF is the best realization of CRS, but years practice and researches show that the current ICRF have some flaws. Selection criterions of defining sources are not reasonable, density and distribution of sources are not ideal, these all affect the precision of ICRF. Researches of source structure show that structure index of many defining sources are not with a value of 1 or 2, indicating they are not compact sources. Researches of source stability show that some defining sources do not accord with stability criterions. Furthermore density of sources is sparse and distribution of sources is largely nonuniform on the sky. All these faults made current ICRF cannot fit the requirements of researches on some domains. In this paper, the histories and present status of ICRF are presented briefly first. Then the relationship about connection and integration of CRF (Celestial Reference Frame) are introduced. Based on the characteristics and evolvments of researches on ICRF, the faults of ICRF are analyzed through the aspects of ICRF precision, data acquisition precision, source structures analysis and the criterions of selecting defining sources. At last, the improvement trends of ICRF by instruments and programs are analyzed. The prospect of establishment and maintaining on ICRF in future is discussed. With the progress of new technology and data acquisition precision, more and more weaker sources can be detected in future. These all help to improve the exist ICRF, a high precision of ideal ICRF will be realized in the future.

Key words: astrometry; International Celestial Reference Frame(ICRF); review; VLBI; source structure; structure index