

# 空间时代地面基本天体测量的意义

范瑜 冒蔚

(中国科学院云南天文台)

## 提 要

文章阐述了建立天球参考系的传统方法和已作出的贡献,介绍了射电天体测量和空间天体测量的前景及其存在的不足之处,认为继续发展高精度的地面基本天体测量仍然是必要的。

## 一、引 言

建立高精度的基本天球参考系是基本天体测量学的一个主要任务,一个多世纪以来,许多天体测量学家为这一目标的实现,贡献了毕生的精力。基本天球参考系是天文学的各分支学科、天文地球动力学和大地测量学等学科研究的基础<sup>[1]</sup>。实用的天球参考系是由一些有精确位置和已知其运动(自行)的天体组成的基本星表来体现的,对这样一个参考系的定义和建立,已有很多论述<sup>[2,3]</sup>,它有两条最基本的要求:

1. 系统内部应是均匀的,且随着时间的推移不产生明显的扭曲。即体现参考系的天体位置和自行,没有明显的随天区而变化的系统误差,在不同历元通过对不同天区的天体进行观测,其结果应相互一致,用不同测量技术所得的结果也相互一致。

2. 系统本身应是非旋转的。要求在这个参考系中对天体或地面点位置及其运动的测定和研究,不会产生由于参考系本身的旋转而引起的附加运动。

长期以来地面基本天体测量所得的各种星表(特别是一系列基本星表)体现的天球参考系,作为各种测量的基本参考依据,对天文学和相邻学科的发展起到了重要作用。但是,它本身也存在着许多不足之处,如:

1. 现有的基本天球参考系都是依赖众多的地面观测建立和维持的,由于地球大气和望远镜引力弯曲的影响,地面经典仪器的测量精度已接近于极限精度,但仍远不能满足日益发展的研究需要,现在一些领域已要求测量精度达到毫角秒量级,而目前最精确的基本星表FK5的星位精度也仅为 $\pm 0''.02$ 左右。

2. 基本系统是由众多的仪器长期观测而得到的,在不同时间、由不同仪器获得的各种观测结果都存在着各不相同的系统误差,如何进行综合处理以消除系统误差,特别是在天赤道和天极之间如何内插得到可靠的赤纬系统,至今尚无理想的方法,以致所得的基本系统

内部仍然存在有不均匀性<sup>[4]</sup>。

3. 基本系统仍存在有剩余旋转, 即采用的岁差常数不准确。如 Fricke 为编制 FK5 星表用运动学方法得到的岁差常数改正值<sup>[6]</sup>, 也带有一定的偶然性, 因为他是选用 512 颗 FK4 中的远距星求得的, 这些远距星实际上是太阳系附近 70—2000 pc 内的恒星, 在这些恒星本动引起的视自行为随机分布的假设下, 利用 Oort 的简化了的银河系自转模型, 并采用单一的视差因子计算出的。恒星的组成不同, 结果将可能不相同。

4. 星等和星数的限制。基本系统是由经典子午环观测所定义的, 由于受观测条件的限制和对大量恒星作绝对测量的困难, 只能通过少数较亮的恒星来实现。例如 FK5 平均在  $3^\circ \times 3^\circ$  的区只有一颗基本星, 极限星等虽已达 9<sup>m</sup>, 但 8<sup>m</sup>—9<sup>m</sup> 的星数却很少, 这远不能满足各学科发展的需要。

射电天体测量和空间天体测量的快速发展, 为建立高精度的天球参考系提供了较理想的方法, 也给地面基本天体测量带来了有力的推动和冲击<sup>[6,7]</sup>。虽然它们也有其自身的局限和实现的困难, 但因它们的观测原理不同于地面望远镜的直接方向测定, 基本上不受地球大气的影响, 已在理论研究和一些测量精度方面显示出了巨大潜力。面对这样的局面, 地面基本天体测量将怎样发展? 其意义何在? 在此试图谈谈我们的看法。

## 二、地面天体测量作出的贡献

用地面光学观测建立天球参考系, 传统的有三种方法。

### 1. 动力学方法

利用太阳系中一颗或几颗天体来实现, 即基于太阳系中某些天体的运动方程中不存在旋转项, 根据太阳系天体运动理论和观测结果, 可以计算出作为时间函数的天体历表, 用这些天体任一历元的位置作为定标点建立参考系, 所以它又称为历表参考系。建立这种参考系理论上不需作任何假设, 也不应受岁差的影响, 是一种理想的方法。但是, 随着对广义相对论和宇宙学的深入研究, 加之受观测资料背景星表旋转的影响, 发现用动力学方法是不能建立一个惯性系的, 因为“这方法是以太阳系邻近区域的一些选定恒星的运动学统计假设为基础的”<sup>[8]</sup>, 在这一假设下不能解释这些基本星运动中的一个旋转项。另外, 也由于可选择的天体数目的限制, 用这种方法很难建立起满足实际应用的参考系。不过长期以来, 动力学方法在确定星表的分点和赤道中起到了非常重要的作用。

### 2. 几何学方法

以河外天体为定标或者以河外天体为参考, 测定出并修正了恒星参考系的旋转运动从而建立的准惯性参考系。河外天体非常遥远, 其横向运动引起的方向变化极小, 对于距离为  $2 \times 10^8$  pc 的河外天体, 假定其横向速度高达光速的百分之三, 则其百年的方向变化也仅为 1mas。这样, 除了把遥远的河外天体的自行看作为零, 或者把在一定天区范围内作参考的河外天体自行的平均值取为零外, 不需要作其他假设。用这种方法建立的准惯性天球参考系, 是定义上最直观的, 理论上可实现的, 也是便于取用的参考系。

但是, 用地面传统测量方法观测河外天体时, 在精度方面遇到了困难。特别是用照相方

法测定星表恒星相对于河外星系的位置变化, 确定星表系统的微小旋转运动时, 由于河外星系像面亮度不对称, 会引起不同历元和不同底片照相定位测量的误差; 以及作为观测比较对象的照相星表本身随天区而变化的系统误差的影响, 在目前尚未能作全天球平差的情况下, 也没有能得到一致的结果<sup>[9]</sup>。所以至今还未能直接用这种方法建立起以河外天体为定标的准惯性天球参考系。在测定恒星参考系的旋转运动时, 也只能依赖于动力学方法和恒星自行统计分析的方法。

### 3. 运动学方法

基于大量恒星的运动具有已知的统计特性, 通过星表恒星自行的统计分析, 确定并修正星表系统的旋转运动后, 建立以基本星表或其他星表体现的准惯性参考系。这种方法所得到的参考系, 虽然其定义的严格性依赖于所涉及恒星自行的统计特性的准确性和银河系自转模型的可靠性, 但它易于建立, 实用方便, 以致长期以来人们在星表工作方面耗费了巨大的精力, 不断完善了编制星表特别是编制基本星表的方法, 不断充实新的观测资料, 最终精度也不断得到提高。这种参考系在天文学及有关领域的测量和研究中, 发挥了重要作用。

基本星表系统的定向是通过太阳系天体观测测定的, 系统的微小旋转运动是通过自行统计和太阳系天体的观测求得的, 所以基本星表所体现的天球参考系是运动学方法和动力学方法的混合结果。其他的一些星表, 包括综合星表和包含有几十万颗星的照相星表, 一般都相对于某一基本星表系统测量和编制而成, 或变换到某一基本星表系统。但是, 由于各种误差的影响, 特别是消除各星表之间系统差的方法不完善, 它们的系统在很大程度上并不能代表基本星表系统, 一般所说它们属于某一基本星表系统, 仅是一种近似的看法。

由于地面传统观测方法的限制, 传统测量仪器误差的影响, 特别是地球大气的影 响, 虽然地面传统测量已接近 $\pm 0''.1$ 的极限精度, 但仍远不能满足科学发展所需的达毫角秒量级的精度要求。射电天体测量和空间天体测量的出现和发展, 为我们展现了光明的前景, 同时也带来了一系列需要解决的问题。

## 三、射电天体测量和空间天体测量将能作出的贡献

在射电波段对天体进行测量比在光学波段测量有许多优点: 测量的是辐射脉冲到达的时刻, 而不是射电源的方向, 大气折射的影响甚微; 对大角度和小角度的测量精度相差不多, 因此区域性系统误差很小; 可以全天候观测。由于射电源都非常遥远, 在它们的自行( $1'' \times 10^{-5}$ /年量级)可以忽略的假设下, 用射电测量手段可以获得非旋转的参考系。

利用甚长基线射电干涉测量(VLBI)确定河外致密射电源的位置, 已表明具有很高的精度。近年来这方面发展很快, 已有一些高精度的射电星表问世<sup>[10,11,12,13]</sup>, 这些星表的精度为 $2-3\text{mas}$ , 而它们彼此间的符合精度也好于 $5\text{mas}$ <sup>[14,15]</sup>, 这些星表包含了 $100-120$ 个射电源。由Arias等编制成的包含有 $228$ 颗射电源的星表, 将作为IERS的初始系统<sup>[16]</sup>。最近, Walter又完成了由 $210$ 颗射电源组成的星表<sup>[17]</sup>, 其精度保守估计为 $2\text{mas}$ 。VLBI能绝对测定射电源的赤纬, 虽然只能测定赤经差, 但只要选择无结构、无视运动、赤纬近似为零的射电源为赤经起算点, 高精度的射电参考系的实现在理论上是没有困难的。

但是, 由于射电源呈复杂结构, 绝大部分河外射电源是有视面天体, 很难精确定位, 其射电位置与光学位置不完全一致, 射电频段流量密度相差很大, 甚至同一源在不同射电频段所显示的位置也不同。尽管已发现的河外射电源多达几万颗(绝大多数都是天体物理学家感兴趣的), 但适用于建立高精度参考系的致密射电源至今发现的还很少<sup>[16,17]</sup>。如 Arque 等编制的现今最好的射电星表<sup>[18]</sup>, 是由 8 本星表加权平均得到的, 包含有 233 个河外射电源, 具体分类为: 类星体 166 个, 星系 25 个, 蝎虎 BL 型天体 26 个, 未确定型天体 8 个及未找到已证认的光学对应体的 8 个。其中 70% 的类星体亮于  $20^m$ , 大多数天体的星等为  $18^m$ — $19^m$  之间<sup>[19]</sup>。而且这些射电源在天球上还未能形成一个均匀的网格, 如前面介绍的射电星表, 都没有包含赤纬  $-45^\circ$  以南的射电源<sup>[10,11,12,13,17,18]</sup>。估计 10 年后射电源的数量能增加到 500 颗左右(Walter)。用这样少量的光学亮度相当暗的天体建立准惯性参考系, 还需要较长时间的努力。

另外, 在习惯采用的赤道坐标系中或者对于通常的地面测量, 因赤道坐标本身存在岁差旋转, 实用中能否真正利用射电参考系的非旋转特性, 还要看采用怎样的岁差常数作修正。如果采用由运动学方法得到的岁差常数, 仍不能在使用中避免岁差常数误差附加于系统上的剩余旋转的影响, 若采用 VLBI 测定的岁差常数, 就不存在这种影响。

射电源的光学亮度都相当微弱, 对大量的光学观测是不适用的, 对于许多学科的要求, 射电参考系仅能作为一个比较标准, 真正能满足实用要求还必须依赖于光学的恒星参考系。关键的问题是高精度地实现两个参考系的联结, 以改善恒星参考系, 并建立为宇宙实验所必须的统一协调的参考系<sup>[19]</sup>。

因为天体测量卫星是在地球外进行观测, 将不受折射、星像视宁度、大气对光学分辨率限制的影响和仪器的重力弯曲效应的影响, 特别是它不同于地面子午环对单颗恒星作方向测定, 而是通过天体之间角距测量后再作全球的平均, 所以天测卫星将能获得的是一个内部均匀的系统。欧洲空间局于 1989 年 8 月发射的依巴谷天体测量卫星, 原计划观测达  $11^m$  的 10—12 万颗星, 经过 2.5 年的观测, 星位置、年自行和视差的精度达到  $\pm 2\text{mas}$ 、 $\pm 2\text{mas/yr}$  和  $\pm 2\text{mas}$ 。但是, 卫星发射后没有进入预定的圆形轨道, 而是在一个椭圆轨道上运行, 各方面的专家采取了多种补救办法, 争取在 0.5—1.5 年时间内, 星位置、年自行和视差的精度达到  $\pm 4\text{mas}$ 、 $\pm 6\text{mas/yr}$  和  $\pm 6\text{mas}$  的结果<sup>[32]</sup>。

由于测量原理所决定, 天测卫星不能对赤道(或黄道)和春分点进行直接测定, 所得的结果不是绝对的<sup>[20]</sup>, 也不能避免整个系统的旋转运动<sup>[21]</sup>。如果采用已有的岁差常数, 将直接受到岁差常数误差的影响, 若用系统中的数万颗星的自行求得岁差常数改正, 也仅是服从这些恒星自行的统计规律, 因为星等的限制, 观测的仍然是太阳系附近的一群恒星。要使空间系统成为一个有用的恒星参考系, 还必须与一个不动的系统, 如河外射电源系统联结起来, 确定出它的定向和旋转运动。现在计划中的联结方式有两种:

### 1. 射电方法

原计划在依巴谷卫星观测纲要中安排 100 多颗射电星, 用 VLBI 测定这些射电星与河外射电源的相对位置及其变化, 从而将这些射电星的光学位置所代表的空间系统与河外射电源参考系联结起来, 希望联结精度达到  $2\text{mas}$ 。不过所选的射电星中许多是双星或变星, 其光

学位置的精度都比较低, 它们与河外射电源之间的相对射电位置, 能够在怎样的精度范围内体现两个系统的联结关系, 目前还不能确定, 有人对此作了模拟估算<sup>[22]</sup>, 估计两个系统的符合程度为  $0''.04-0''.08$ 。现在依巴谷卫星的最后结果以及整个系统的稳定性更难预料。

## 2. 光学方法

利用美国将发射的哈勃空间望远镜, 测定依巴谷卫星观测的恒星与河外射电源光学对应体之间的相对位置。现已选了94颗射电源和173颗依巴谷卫星观测的恒星(选星条件有7条)作为观测对象<sup>[22]</sup>, 用天区重叠法作它们之间的相对位置测量, 期望精度达  $2\text{mas}$ 。另外, 也计划用照相方法测定在恒星参考系中的射电源位置<sup>[23]</sup>。这里的主要问题是必须选择光学位置和射电位置很接近的河外射电源, 但是观测对象的数目受到了限制, Lawrence等用VLA对1000多个射电源作了观测<sup>[24]</sup>, 以SAO星表位置作参考对这些源的光学对应体进行认证, 并将得到的射电源位置与其光学对应体作了比较, 位置的平均偏差赤经为  $0''.04$ , 赤纬为  $0''.11$ 。

利用哈勃望远镜建立两个参考系之间的联结, 是一种比较实际的联结方法, 但是如何得到射电源光学对应体的精确位置, 使它们能真正代表非旋转的河外射电源参考系, 以及在不完全满足苛刻条件下选取的173颗恒星的位置, 能否较长期地代表整个空间系统, 都是有待解决的问题。

## 四、进一步发挥地面天体测量的作用

由于射电参考系建立起来后, 仅是一个较理想的比较标准, 在各个领域的大量测量中, 更实用的还是光学的恒星参考系。而空间天体测量能得到的系统, 除了需要高精度地与河外射电源参考系联结外, 还有一个长期维持的问题, 有大量的工作仍然需要地面基本天体测量来完成, 而且地面测量若能得到新的发展, 也将能得到与射电天体测量和空间天体测量相互补充的结果, 用于充实和完善并弥补它们的不足。

天体测量卫星一般观测时间较短, 所得到的系统存在的主要问题是恒星自行的误差较大, 使得其系统本身难以维持, 在它建立十几年后, 恒星位置的精度就将与FK5系统差不多, 而这样一个需花巨额费用得到的系统, 总希望能维持几十年, 如果能在若干年后发射第二颗天体测量卫星, 在第二历元作同样的测量, 这一系统就相当理想了。由于FK5的年自行精度较高(平均为 $\pm 1\text{mas}/\text{年}$ ), 计划用FK5星来维持空间系统, 当然FK5系统也需要维持, 要依靠新的地面观测资料来进行修正和改善, 这是地面基本天体测量长期需要进行的一项重要工作。

空间系统与河外射电源参考系联结的光学方法中, 需用河外源的光学位置来代表河外射电源参考系, 虽然选用光学位置与射电位置尽可能一致的致密射电源, 但它们之间的差异如何, 还依赖地面高精度的光学定位观测; 在射电方法中所选的射电星, 许多是不适合于依巴谷卫星观测的双星和变星, 所得的位置精度较低, 用它们的位置和运动来代表两个系统的联结, 仍然是一个没有很好解决的问题。这也需要地面的精确测量, 特别是要测得高精度的自行。

近年来,联结两个参考系的工作取得不少进展, Niell 等人用 Mark III VLBI 系统观测了 8 个射电源的光学对应体<sup>[25]</sup>, 得到它们的位置精度在  $0''.003$  到  $0''.3$  之间, 我们把其中 7 个射电源位置(包括 3C273B), 同其光学位置进行了比较, 在赤经和赤纬的方差为  $0''.03$  和  $0''.01$ 。由于赤经零点存在的方差为  $0''.2$ , 作为坐标框架, Niell 所用的 JPL VLBI 系统和 FK5 在这里被证明是一致的。Sarasso 等人用子午方法和等高方法观测了 8 颗射电星的光学对应体<sup>[26]</sup>, 并把它们的位置和 NASA-JPL 深空网和美国 VLBI 天线网的结果进行了比较。另外, Johnsten 用 VLA 测量射电星, 得到射电位置精度为  $0''.001$ <sup>[23]</sup>, 并由此建立两个参考系的一种联结方式。

发挥地面光学观测作用的一个关键问题, 是采用何种手段才能有效地实现维持恒星参考系和与射电参考系高精度联结的目的。如果仍采用传统的仪器、传统的观测方法和处理方法, 势必要用很多仪器作大量的重复观测, 在综合处理后才能得到相当于或稍高于 FK5 系统的精度, 这在空间时代与新技术相配合是很不适应的。一方面, 传统的子午绝对测量方法只适用于纬度较高地区, 加之传统子午环的误差测定方法不完善, 消除星表系统误差的方法不理想, 即使多架仪器观测资料的综合处理结果, 也难以获得内部均匀的恒星位置系统和自行系统。另一方面, 目前照相观测所参照的定标星表系统, 都存在着随天区而变化的系统误差, 加之照相方法本身的精度限制, 很难取得恒星与射电源暗弱光学对应体相对位置的高精度测量结果, 从而影响了它们之间的联结精度。

我们认为地面基本天体测量应从以下三个方面继续发展:

1. 探索新的观测方法, 使得能在低纬度地区乃至赤道区对天体作绝对测定, 以便更好地连接南北半球各仪器的观测, 较客观地检测和修正各自的系统误差, 为改善现在的天球参考系作出贡献。

2. 研制新型的测量仪器和发展相应的检测仪器误差的方法。以便排除传统仪器观测的各种系统误差来源, 从而获得内部均匀的观测结果。提高仪器观测的极限星等, 要求观测到  $13^m$ — $14^m$ , 争取达到  $16^m$ , 这将能观测射电源周围的暗星, 为用 CCD 或照相测量进行两个参考系的联结提供定标星。

3. 探索高精度地测定恒星与河外天体相对位置的新方法。恒星位置不应取自某一次级定标星表或照相星表, 而应取自一个需要直接过渡到准惯性参考系的内部均匀的恒星系统, 以使用不同恒星或不同天区的观测结果, 都能代表这一恒星参考系与河外天体系统之间的联结关系。在处理中应基本上能消除大气抖动的影响, 以保证这种联结能达到毫角秒量级的精度。

近年来, 因新技术的冲击地面基本天体测量受到一些影响, 但在研制新仪器和天体位置测定方面仍取得相当大的进展。苏联自 1952 年起就开始了水平子午环的研制, 目前有三架子午环正在研制和自动化。另外, 他们还有一个由四个天文台合作研制大型水平子午环的计划, 准备同时生产四架新型的水平子午环<sup>[27]</sup>。在 La Palma、Bordeaux 和东京, 新的全自动光电子午环每年能完成对亮于  $13^m$  恒星的 10 万次观测, 单次测定的精度为  $0''.15$ — $0''.20$ <sup>[28]</sup>。中国和丹麦合作研制的水平子午环, 目前已在陕西天文台安装调试, 将开展观测射电星、小行星和 IRS 星的工作。我国用于开展星表工作的 III 型光电等高仪近期内也将研制完成。

云南天文台经过十年的努力, 提出并成功地检验了一些测定方法和处理方法, 如适用于不同纬度地区的卯酉—子午交替观测绝对测定天体位置的方法<sup>[28]</sup>, 针对雨季太长而提出的编制初始星表的满星平差法<sup>[30]</sup>。还准备用子午方法和等高方法配合, 同时测定天体位置以检测各自的系统误差和测定大气折射改正。与上海天文台合作研制在测定和消除仪器误差方面与传统方法完全不同的低纬子午环, 计划于 1992 年投入正式观测。另外, 还就用地面观测进行恒星参考系与河外天体系统的联结, 测定参考系的定向和旋转等方面, 探索了 CCD 重迭露光法和相应的处理方法<sup>[31]</sup>。这些方法和仪器都立足于地面观测, 观测对象多, 时间充裕, 与新技术相比所需经费较少。根据我国国情把这一系列方法给予实施, 将为地面基本天体测量增加新的活力, 是值得我们为之一努力的。

### 参 考 文 献

- [1] 须同祺, 李正心, 天文学进展, 5 (1987), 241.
- [2] Kovalevsky, J. and Mueller, I. I., in IAU Coll. No. 56, p. 375, (1981).
- [3] Fricke, W., Veröff. dos Astr. Rechen-Inst Heidelberg, No. 31, (1983).
- [4] Tucker, R. H. and Teleki, G., in IAU Coll. No. 48, p. 450, (1978).
- [5] Frick, W., *Astron. J.*, 72 (1967), 642.
- [6] Catherine Turon Lacarrieu, La Recherche Mensuel, 11 (1980), No. 112, 709.
- [7] IAU Symp., No. 129, (1987).
- [8] Bauersima, Allgemeine Diskussion Uber die "Rotation" eines nichtstarrten Erdmodells, Mittelungen der, Statelliten beobarh-tungsstation Zimmerwald, (1980).
- [9] 储宗元, 天文进展, 2 (1982), 44.
- [10] Fanslow, J. L. et al., Techn. Interferometrie tres Grande Base., Coll. int., Toulouse, 31 aout-2 sept. (1982), Toulouse, (1983), 183.
- [11] Sovers, O. J. et al., *Astron. J.*, 95 (1988), 1647.
- [12] Rogers, A. E. E. et al., *Science*, 219 (1983), 51.
- [13] Clark, T. A. et al., *Astron. J.*, 81 (1976), 559.
- [14] Ma, C., in IAU Symp. No. 109, p. 157, (1986).
- [15] Arias, E. F. et al., *Astron. Astrophys.*, 199 (1988), 257.
- [16] Hughes, J. A., IAU Highlights of Astronomy, 8 (1988), 490.
- [17] Walter, H. G., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 79 (1989), 283.
- [18] Arque, A. N. et al., *Astron. Astrophys.*, 130 (1984), 191.
- [19] Күмков, И. И., Серия «Проблемы исследования Вселенной», Вып. 12 (1989), 237.
- [20] Roser, S., The F. A. S. T. Thinkshop, (1983).
- [21] Lestrade, J. F. et al., The Second F. A. S. T. Thinkshop, (1985).
- [22] Hemenway, P. D. et al., in IAU Symp., No. 129, p. 335, (1987).
- [23] Johnston, K. J. et al., in IAU Symp., No. 129, p. 317, (1987).
- [24] Lawrence, C. R. et al., *Astrophys. J. Suppl.*, 61 (1986), 105.
- [25] Niell, A. E. et al., in IAU Symp. No. 129, p. 327, (1987).
- [26] Sarasso, M., in IAU Symp. No. 129, p. 331, (1987).
- [27] 李志刚, 天文文献情报, 2 (1989), No. 1, 27.
- [28] Schwan, H., IAU Highlights of Astronomy, 8 (1988), 438.
- [29] 冒蔚等, 中国科学, (1984), No. 5, 440.
- [30] 范瑜等, 天文学报, 4 (1988), 318.
- [31] 冒蔚等, 中国科学, (1988), No. 10, 1082.
- [32] Perryman, M. A. C., ESA Astronews, No. 10 (1989), 1.

## Significance of the Ground-based Fundamental Astrometry During the Space Time

Fan Yu    Mao Wei

*(Yunnan Observatory, Academia Sinica)*

### Abstract

In this paper, the traditional methods to construct a celestial reference system are discussed, and the advantages and the disadvantages of radio astrometry and space astrometry are also described. Based on the above discussions, we come to the conclusion that the ground-based astrometry is still and will be necessary.