



依巴谷卫星的天文观测及资料处理方法

凌兆芬 萧耐园

(南京大学天文系)

须同祺 王叔和

(中国科学院上海天文台)

提 要

本文主要描述依巴谷卫星的光学观测原理, 资料处理方法。

一、前 言

欧洲空间局(ESA)发射的依巴谷卫星, 计划通过观测精确测定恒星的位置、自行和视差, 并由所得的恒星位置和自行建立全天球精确的惯性参考系。为了在空间进行大量高精度的观测, 依巴谷卫星的仪器结构和光学观测原理, 完全不同于地面经典的天体测量仪器。

在整个任务期间, 依巴谷卫星将观测约12万颗亮于13mag的恒星, 每颗恒星在不同历元、不同的方位观测平均约80次^[1]。卫星每秒钟产生的资料约2.4万bit^[2], 为从这些信息中得到所需的观测量, 要完成比 10^{12} bit还要多的资料处理, 同时还要考虑不同部分之间的复杂关系。如此大而繁重的处理, 将分别由空间技术基本天文资料处理联合组织(FAST)和北方资料分析联合组织(NDAC)两个独立的资料处理中心来进行^[3]。最后产生一部包括约 10^5 颗纲要星的天体测量星表, 以及有关的照相天体测量参数, 和多重星、小行星星表。

依巴谷卫星观测是一种相对观测。其观测量不仅和恒星位置有关, 而且还依赖于仪器的指向(姿态)和畸变等, 可用下列框图表示:

$$\boxed{\text{天体位置}} + \boxed{\text{仪器指向}} + \boxed{\text{仪器畸变}} + \boxed{\text{噪声}} = \boxed{\text{观测位置}}$$

图中等号左面前三项可用天体的天体测量参数、姿态参数和畸变参数的函数多项式表示。其中姿态和畸变参数在几分钟到几小时的时间间隔中, 对所有的观测将是同样的。因此, 任何一颗给定恒星的天体测量参数, 通过姿态及畸变与在同一限定时间间隔中所观测的其他数百

颗乃至数千颗恒星间接地联系着。在整个任务期间，不可能把一颗纲要星和其他纲要星孤立起来，也就是说依巴谷卫星观测资料处理，必须统一处理和分步进行。

综上所述，依巴谷卫星从观测原理到资料处理方法，都基于全新的概念。本文将对它们逐一介绍。

二、仪器和测量原理

依巴谷卫星的望远镜有两个天空视场，每个视场为 $0^{\circ}.9 \times 0^{\circ}.9$ ，两个视场被一个近似约 58° 基本角分开^[4]。卫星自转轴与太阳方向成 43° 角。卫星绕其自转轴转动一周约 128 分钟，与此同时，卫星自转轴又绕太阳方向约 8 个星期旋转一周。由于太阳在黄道上每天约运动 1° ，因而卫星的这两种运动合成，将使望远镜扫描观测整个天空。

图 1 为依巴谷卫星天文观测的光学原理图。光学系统的基本参数见表 1^[2]。望远镜是全反射施密特望远镜，由三个镜子构成。从图 1 可见，由相隔 58° 的两个视场来的两束星光，经射束联合镜和平面折叠镜，反射到主镜，会聚光束再通过平面折叠镜中央孔洞入射到主栅格上。星像在视场中央是垂直栅格缝运行的，通过主栅格的光束由转向镜经中继光学系统，进入析像管，由析像管瞬时视场作记录，用于求天体测量参数。星像同时也经过恒星测绘仪，入射到光电倍增管，进行观测记录，以供决定卫星姿态用。

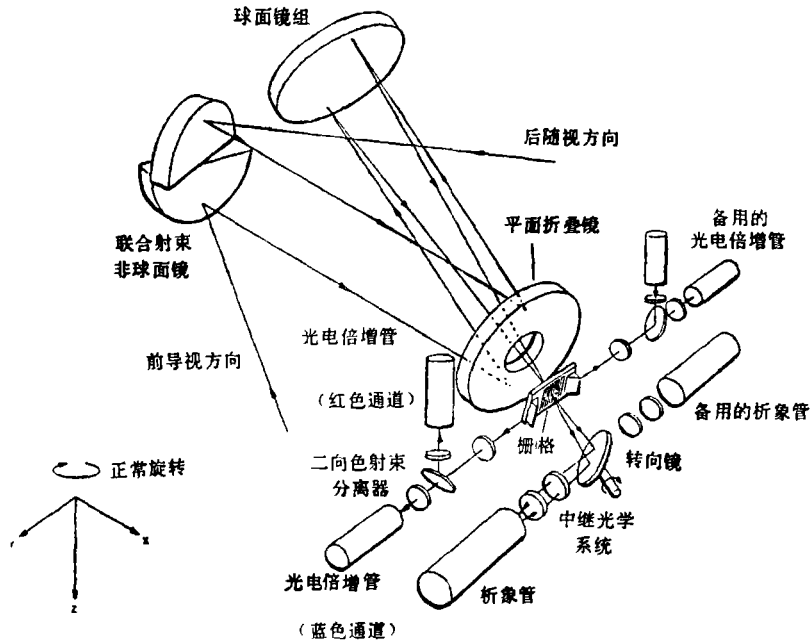


图 1 光学原理

图 2 为伊巴谷卫星望远镜主栅格和恒星测绘仪图示。主栅格由 2 688 条平行的等间距的狭缝组成，覆盖区域近似为 54×54 弧分²，主栅格相邻缝中心间距(栅格步长)为 $1''.208$ ，每条缝的宽度约为 $0''.47$ 。在主栅格两边各有一个恒星测绘仪栅格，每个恒星测绘仪栅格各

表 1 光学系统基本参数

光学系统	全反射偏心施密特系统
光学畸变稳定度	1.1mas/24h
基本角稳定度	0".01/2.8h
主镜口径	290mm
焦距	1400mm
表面精度	$\lambda/60\text{rms}$
视场	0.°9×0.°9
色散	<0".005

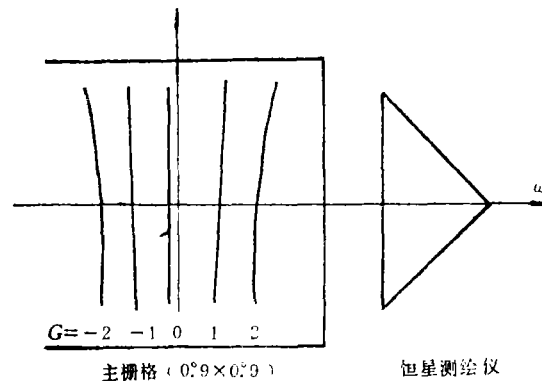


图 2 主栅格与恒星测绘仪图示

由 8 条缝组成，分成两组：4 条垂直缝，另 4 条缝与垂直方向成 45° 角。这两组缝各有 S^* 、 $2S^*$ 、 $3S^*$ 分隔， $S^* = 0.038\text{mm}$ ，对应于 $5''.6^{[3]}$ 。

如前所述，当恒星经过光栅时，由析像管得到其一维“栅坐标”。如果视场的比例尺已知，这就相当于测得在天球上恒星的相对角距离。为了使在约 0.01 弧度视场内测量精度达几毫角秒，对望远镜姿态就要求有 $0''.1$ 的精度。由于卫星自转，纲要星依次进入视场并被观测。这样一系列这些恒星的栅坐标就在大圆上形成恒星间的角距离链。但望远镜视场很小，由于相邻视场间的叠积误差，就不可能使其完成全球的天体测量。依巴谷卫星观测解决这个问题的办法，是采用将分开一定角度的两望远镜对应的天区，同时组合在同一视场中。对一给定恒星，它首先出现在“前导”视场中，约 20 分钟后，又出现在“后随”视场中，两望远镜间的交角，即基本角是很稳定的，也是可以精确测定的，利用先后出现在丝栅上的一维“栅坐标”和基本角，就可得到在大圆上的观测量一维横坐标，因而得到恒星间的角距离。

三、观测量及其解算参数

依巴谷卫星的资料处理，可以看作作为一种统计计算问题。原始观测资料通过多维随机函数描述的观测模型，和函数的参数即要计算的量相联系。如果我们知道所有参数项的函数明确的统计关系时，就可以用最大似然原理或最小二乘法去解算。

原始资料主要包括^[5]:

(1) 从主要探测器——析像管记录的光子计数 $\{N_1\}$ 。在整个 2.5 年工作期间, 所记录的光子计数的个数约为 $1 = 10^{11}$ 个, 取样频率为 1200Hz。

(2) 在纲要星同时通过恒星测绘仪栅缝的预期中天时刻, 光讯号经由光电倍增管记录, 其记录的光子计数 $\{N_2^*\}$ 的个数, 在整个工作期间和析像管相同, 但取样频率为 600Hz。

(3) 在望远镜的三个轴上各有一个陀螺仪。陀螺仪的记录读数 $\{g_r\}$, 在整个观测期间有 $r = 10^9$ 个。

在这些资料中, 恒星测绘仪读数和陀螺仪读数都用于决定望远镜姿态。在理想化的(恒星 + 仪器)物理系统中, 卫星观测所包含的主要参数有:

(1) 对于任何一颗单个纲要星, 有五个天体测量参数: 恒星位置 (α, δ) 、自行 (μ_α, μ_δ) 、视差 (π) , 以及卫星观测的照相天体测量参数, 如星等和色指数 $B - V$ 。

(2) 卫星的姿态参数, 即望远镜的三个指向角 $\alpha_z(t)$ 、 $\delta_z(t)$ 和 $\omega(t)$, 其中 $\alpha_z(t)$ 和 $\delta_z(t)$ 为卫星自转轴的赤经和赤纬, $\omega(t)$ 为由扫描大圆和赤道交点沿扫描大圆到卫星两望远镜平分线的角距离。

(3) 10—20 次独立的大尺度的畸变参数。

在资料处理中, 除了上述的观测记录数据外, 还需要输入星表、卫星和太阳系天体的星历表等。

由卫星的原始观测资料, 首先得到对某时刻的恒星的栅坐标, 这是以后处理的主要测量值。栅坐标是天体测量参数, 望远镜运动和方向(姿态参数)和望远镜视场到栅缝的转换(仪器参数)的函数。在整个卫星运行期间, 总共包括约 50 万天体测量参数, 100 万姿态参数和几千个仪器参数, 另外还有约 150 万栅坐标测量值。如果要直接解这样大的方程, 是相当困难的。但是根据卫星的扫描规律和观测模型, 考虑到以下几个原则, 可将主要问题分解成几步来处理^[2]。这些原则是:

(1) 在几小时内, 自行和视差对卫星测量精度而言可以忽略, 但对某些大自行的星除外。恒星的地心方向, 在至少 ± 6 小时内, 可认为是不变的。

(2) 在这段时间内, 主要由于光行差影响, 恒星视方向不是固定的, 而且是非线性的。但引力光线偏折和恒星光行差可由独立资料计算得到。

(3) 根据扫描规律, 在 12 小时中, 卫星在空间只扫过很狭的带, 因而可选取一个“参考大圆”, 使这段时间中扫描的视面对参考大圆的倾斜不超过 $1^\circ.3$ 。

由第 1 和第 2 点可以得到, 在 12 小时间隔中, 恒星的平均几何位置不会影响到天体测量参数的精度; 根据第 2 点表明处理须对应恒星的地心方向, 而不是视方向; 由第 3 点可得, 在主光栅上的观测, 主要对恒星地心方向在参考大圆上的投影敏感, 对一个选定的参考大圆, 恒星地心方向可分解为沿大圆的横坐标分量和垂直参考大圆的垂直分量, 而在解算过程中正好是利用这些横坐标进行归算。

由这些考虑, Lindegren 于 1976 年^[6]提出了所谓的“三步法”处理过程。这过程是: 第一步将观测的栅坐标按时间不大于 12 小时(10—11 小时)间隔为一组, 每组选一个参考大圆。参考大圆的极接近卫星自转轴的极的平均位置。对每个参考大圆独立解出在大圆上的恒星横

坐标、姿态参数和仪器参数，其中恒星横坐标就成为以后归算所需的观测量。第二步称球面解或天球重建。由于第一步归算是相互独立的，并不参考共同的全球天文坐标系统，每个参考大圆有其自己的独立系统，其所得的恒星横坐标的零点，也是任意的。第二步的处理是将各自独立的系统统一到全球天文系统中，以上一步所得的横坐标为观测量，以一批恒星(在 FAST 选取约 4 万颗，在 NDAC 约 6 万颗)的天体测量参数和每个参考大圆横坐标零点改正为未知量求解。第三步即天体测量参数决定。以第二步的结果，得到每个参考大圆横坐标的绝对值，由于这时参考大圆已经联系到赤道或黄道坐标系，由此可得每个纲要星的 5 个天体测量参数。其实在第二步中，经过横坐标零点改正后，同样也可得到这几万颗星的 5 个天体测量参数。整个过程采用迭代方法完成，即开始以输入星表为依据，待第一次处理后，将结果代替初始的输入星表，进行第二次处理，如此反复迭代直至最后得到所求的依巴谷星表。

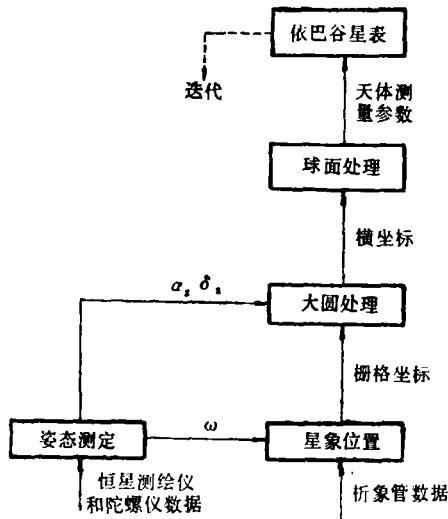


图 3 观测资料处理框图

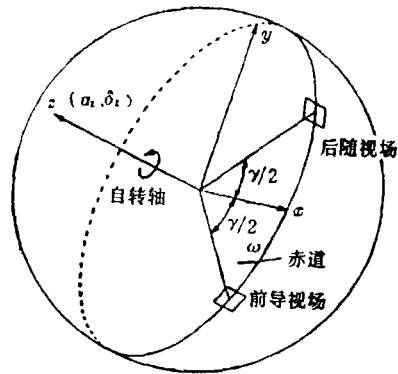


图 4 望远镜姿态角的定义

因此，依巴谷卫星观测资料处理的整个归算过程可以图 3 的归算流程图表示，其主要过程为：姿态测定；星像位置；大圆处理；球面处理和最后的天体测量参数测定。

四、姿态测定

依巴谷卫星的实时姿态，即望远镜的实时指向。指向的稳定度由望远镜的姿态角 $(\alpha_z, \delta_z, \omega)$ 表示(图 4)。依巴谷卫星实时姿态角的精度为 $1''$ ，资料传到地面经迭代后，精度达到 $0.1''$ 左右^[7]。姿态角改正 $(\Delta\alpha_z, \Delta\delta_z, \Delta\omega)$ 和观测时刻间关系，可表示为^[8]：

$$\mathbf{C}(\Delta\alpha_z, \Delta\delta_z, \Delta\omega)' + \text{噪声} = t_{\text{obs}} - t_{\text{cal}} \tag{1}$$

(1)式中 t_{obs} 为星像过恒星测绘仪栅缝的中天观测时刻，由测绘仪的光子计数计算得到， t_{cal} 为预计的中天时刻。 \mathbf{C} 为行矢量，(1)式中左面括弧右上的 (\prime) 是转置符号。设 $E(N_i^*)$ 为第 i 个取样时刻 t_i^* 的光子计数泊松过程的平均值， t_i^* 、 $E(N_i^*)$ 为观测量，由 t_i^* 、 $E(N_i^*)$ 和 t_{obs} 的

关系

$$E(N_i^*) = B^* + A^*S[(t_i^* - t_{\text{obs}})\Omega] \quad (2)$$

(2)式中 B^* 、 A^* 分别为背景和恒星亮度, S 和 Ω 分别为已知测绘仪的响应函数和星像通过测绘栅缝的扫描速度。利用最大似然法,可得到 B^* 、 A^* 和 t_{obs} 。再由(1)可得望远镜的姿态角。在这同时,还要用望远镜轴上的陀螺仪读数作进一步测定,以提高姿态角精度。

五、星像位置

这一步处理的目的是求在观测时刻的恒星栅坐标。析像管探测器在视场中恒星之间,极其迅速地来回取样,可取约 2 560 个样品。若设第 l 个取样时刻 t_l 上,恒星栅坐标为 $G_l(t_l)$,被收集的光子计数 N_l 是泊松过程,其平均值可表为^[8]:

$$E(N_l) = B + A[1 + M_1 \cos G_l(t_l) + M_2 \cos(2G_l(t_l) + V_2)] \quad (3)$$

式中 B 、 A 为背景和恒星的亮度, M_1 、 M_2 和 V_2 均为已知值, $M_1 = 0.6$, $M_2 = 0.25$, $|V_2| \ll 1$ 弧度。其中 $G_l(t_l)$ 又可表为

$$G_l(t_l) = G(t_0) + p_l \quad (4)$$

(4)式中 $G(t_0)$ 为要求的观测中间时刻的恒星栅坐标, p_l 称参考相位,为从 t_0 到 t_l 由于星像运动增加的调制相位,由实际扫描速度和栅格的周期来决定。将(4)式代入(3)得

$$E(N_l) = B + A[1 + M_1 \cos(G(t_0) + p_l) + M_2 \cos(2(G(t_0) + p_l) + V_2)] \quad (3')$$

(3')式中的未知量 B 、 A 和 $G(t_0)$ 可由最大似然法决定。所求得的栅坐标 $G(t_0)$, 还要加栅格不均匀的改正。

六、大圆处理

在依巴谷卫星扫描观测中,每 5 个扫描大圆组成一组,时间跨度约 10.7h,在天空中,5 个扫描大圆约占 2° 左右很窄的狭带。由 5 个扫描大圆的中间确定一个参考大圆(RGC),即建立一个暂时坐标系。这一步的目的是沿着参考大圆测定每颗星的横坐标,横坐标原点是任意的,将在下一步球面解中确定。因为每个扫描大圆进动约 0.4° ,扫描大圆相对参考大圆的倾斜,最大不超过 1° ,因此扫描大圆观测归算到参考大圆,可通过平面旋转完成^[9]。

由第五节得到的对第 i 颗星在第 k 个扫描大圆上,观测时刻 t_0 时的栅坐标 G_{ki} ,即为大圆归算的基本观测量。大圆归算的几何关系见图 5。图中 v_i 、 r_i 为星在参考大圆上的横坐标和纵坐标; θ_k 、 ψ_k 、 ϕ_k 为扫描大圆的姿态角; x_{ki} 、 y_{ki} 为恒星在观测视场中的场角(视场坐标); γ 即两望远镜的约 58° 的夹角; ψ_0 为扫描大圆在参考大圆上的升交点的横坐标。首先将栅坐标 G_{ki} 变换为观测视场中的场角 x_{ki} (y_{ki} 在处理中不考虑),利用泰勒级数,得到 x_{ki} 和由计算预示的值 x_{ki}^0 间的关系为^[10]

$$\Delta x_{ki} = \frac{\partial x_{ki}}{\partial v_i} \Delta v_i + \frac{\partial x_{ki}}{\partial r_i} \Delta r_i + \frac{\partial x_{ki}}{\partial \psi_k} \Delta \psi_k + \frac{\partial x_{ki}}{\partial \theta_k} \Delta \theta_k + \frac{\partial x_{ki}}{\partial \phi_k} \Delta \phi_k + d' \Delta C + o(\epsilon^2) \quad (5)$$

这里 $\Delta x_{ki} = x_{ki} - x_{ki}^0$ 。方程(5)右面所有 Δ 量为对近似值的改正,其中 ΔC 为对仪器参数近似

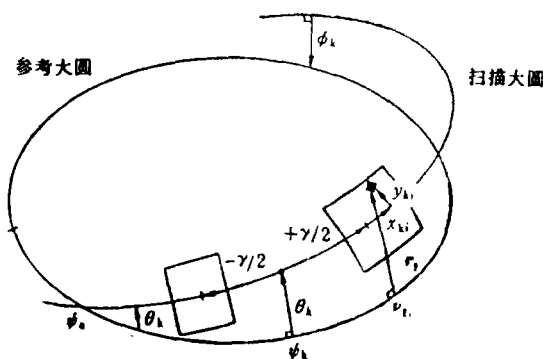


图 5 大圆处理几何关系

值的改正, d 为对仪器参数的偏导数。一般一组扫描大圆包括约 2 000 颗星的观测。由(5)式就可解得这些星的横坐标改正, 以及仪器参数改正。

七、球面处理

依巴谷卫星观测资料的大圆处理结果, 给出许多独立系统中的恒星横坐标。球面处理的目的, 首先是测定每个参考大圆的零点改正, 也即将所有参考大圆都统一到单一的天文坐标系中; 其次在这个系统中去测定所有单星的天体测量参数。对于双星、多重星及其他天体的观测资料, 另行处理。

在处理中, 恒星横坐标, 零点改正和天体测量参数改正间可用下式表示^[11]:

$$E(\Delta\alpha_{oi}, \Delta\delta_{oi}, \Delta\mu_{ai}, \Delta\mu_{bi}, \Delta\pi_i)' - C_j + \text{噪声} = V_{i\text{obs}} - V_{i\text{cal}} \quad (6)$$

其中 V_{ij} 为第 j 组大圆解中第 i 颗星的横坐标; C_j 为零点改正; 圆括弧中参数为 5 个天体测量参数改正; E 为已知行矢量, 圆括弧右上角的 (') 表转置。恒星横坐标是在一个时间上对一颗星处理的, 并且观测方程是对 5 个天体测量参数建立的。方程(6)采用重复迭代处理, 最后得到所有参考大圆的零点改正, 同时给出参加这部分计算的恒星的天体测量参数。

八、天体测量参数

通过上面球面解, 已经能给出一部分恒星的天体测量参数。而这一步的目的, 是利用已得到的所有参考大圆零点改正, 修正所有恒星横坐标, 并由此求得对所有恒星的天体测量参数。

恒星在天球参考系中的坐标表为 (λ, β) , 而它在参考大圆系统中的坐标为 (ψ, ξ) 。设一恒星在天球参考系中的单位矢量为

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \lambda \\ \cos \beta \sin \lambda \\ \sin \beta \end{pmatrix} \quad (7)$$

而它在参考大圆系统中相应的单位矢量和(7)式有以下关系

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = T \mathbf{x} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} \mathbf{x} = T(\mathbf{x}_0 + \Delta \mathbf{x}) \quad (8)$$

其中 \mathbf{x}_0 为给定历元的 \mathbf{x} 值, $\mathbf{t}_i = (t_{i1}, t_{i2}, t_{i3})$, $i = 1, 2, 3$,

由(8)式可得

$$\Delta \mathbf{s} = \mathbf{s} - T \mathbf{x}_0 = T \Delta \mathbf{x} \quad (9)$$

(9)式经过适当变换后, 得到观测方程

$$\Delta \psi \cos \zeta_0 + \text{残差} = \sum_j \frac{\partial \psi}{\partial p_j} \cos \zeta_0 \Delta p_j \quad (10)$$

(10)式中 $p_1 = \lambda$, $p_2 = \beta$, $p_3 = \mu_\lambda$, $p_4 = \mu_\beta$, $p_5 = \pi$; 而

$$\cos \zeta_0 = \sqrt{1 - (\mathbf{t}_3 \cdot \mathbf{x}_0)^2}$$

(10)式左面为观测量, 右面为待测量。由(10)式用最小二乘法, 求得所有的天体测量量^[12]。

九、天体测量星表

通过上述主要步骤的资料处理, 最后得到一部依巴谷天体测量星表。

由依巴谷卫星所得到的恒星位置和自行形成一个全天均匀分布的坐标网络, 但还须将它和 FK5 基本星表或以河外射电源为参考的参考系相连接, 以确定其位置和自行的转动和变化, 使得依巴谷天体测量星表成为一种准惯性坐标系。

参 考 文 献

- [1] Katwijk, K.Van., ESA, SP-1111, I(1989), 57.
- [2] Lindgren, L. and Kovalevsky, J., ESA, SP-1111, II(1989), 1.
- [3] Lindgren, L. and Kovalevsky, J., ESA, SP-1111, III(1989), 20.
- [4] Perryman, M.A.C., ESA, BR-24(1985), 23.
- [5] Lindgren, L., (Private Communication).
- [6] Lindgren, L., Scientific Data Processing, Sec. 3.6, Rep. PF-616, in ESA Hipparcos space astrometry, Report on the phase A study(1979).
- [7] Donati, F. et al., ESA, SP-1111, III(1989), 73.
- [8] Lindgren, L., in IAU Symposium No. 109, p.593, (1984).
- [9] Van Daalen, D.T., The FAST Thinkshop: Processing of scientific data from the ESA astrometry satellite HIPPARCOS, 235.
- [10] Marel, H. van der et al., ESA, SP-1111, III(1989), 93.
- [11] Galligani, I. et al., ESA, SP-1111, III(1989), 141.
- [12] Walter, H.G. et al., Proc. Marseille Colloq.: Processing of scientific data from HIPPARCOS, The Second FAST Thinkshop, ed. by J. Kovalevsky, p.281, (1985).

(责任编辑 刘金铭)

Astronomical Observation and Data Reduction Method of HIPPARCOS

Ling Zhaofen Xiao Naiyuan
(*Astronomy Department, Nanjing University*)

Xu Tongqi Wang Shuhe
(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

In this paper, the observation principle and data reduction method of HIPPARCOS are described.