

中国科学院
上海天文台年刊

Annals of Shanghai Observatory
Academia Sinica

12

1991

中国科学院上海天文台年刊编辑委员会编辑 · 上海科学技术出版社



中国科学院
上海天文台年刊

Annals of Shanghai Observatory
Academia Sinica

第 12 期

No. 12

1 9 9

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国科学院上海天文台年刊编辑委员会编辑
上海科学技术出版社出版

中国科学院上海天文台年刊

1991年 总第12期

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行

中国科学院上海分院印刷所印刷

开本 787×1092 1/16 印张 13 字数 303,000

1991年7月第1版 1991年7月第一次印刷

印数 1—700

ISBN 7-5323-2439-7/P·19

定价: 4.45 元

上海天文台年刊

第 12 期

目 录

关于太阳引力场对 VLBI 时延测量的影响	赵 铭 (1)
月球天平动模型对激光测月解算 UT0 的影响	许华冠 金文敬 (5)
上海天文台的测时观测异常与太仓地震前兆	廖德春 郑大伟 (14)
天文观测序列周期分析中若干问题的讨论	赵 铭 (19)
JYD 地极坐标系统长期稳定性的分析	钱昌夏 李正心 (26)

* * * * *

上海天文台 1.56 米天体测量望远镜若干性能的观测测试

.....王家骥 赵建洪 陈 力 姜佩芳 陈 进(31)
Virgo 星系团天区星系的成员概率.....赵君亮 潘容士 何燕萍(40)
佘山 40 厘米望远镜的光谱型差和星等差对射电星光学定位的影响
.....王叔和 须同祺 陆佩珍(53)
观测射电星联系依巴谷星表和地面光学星表自行的精度估计
.....须同祺 陆佩珍 王叔和(58)

* * * * *

我国局部网对近地测地卫星定轨精度的估计	孙伊菁 康 莹 朱文耀 (62)
人造卫星一阶形状摄动的微机推导	周 铭 (67)
GPS 台站保持算法的精度分析	庄奇祥 (74)
行星掩星精密预报的一种方法	潘大钺 (79)
上海天文台 1989 年人卫激光观测报告	人卫激光测距组 (85)

* * * * *

小角动量 Kerr 度规中的 Dirac 方程与准束缚能级	章世伟 沈有根 (90)
上海 VLBI 系统用于天体物理观测	万同山 梁世光 (95)

* * * * *

用于双反射镜光学系统自动调焦装置的设计和应用

.....	丁 华 王兰娟 龚守身 (107)
S-2 VLBI 相关处理系统	梁世光 黄心永 (114)

25 米天线电性能参数测试	黄心永 高一华 (127)
单天线射电源天线温度测量软件	孔 溢 (134)

* * * * *

X 波段高 Tc 超导谐振腔研究的初步结果

.....	苏锦源 寇文蔚 罗加增 忻莹娇
	蒋盛达 赵梅瑜 李承恩 金行运 (140)
氢脉泽频率稳定度测量系统	罗薇华 江国兴 何建卫 张为群 (146)
一种用于氢脉泽自动调谐的高稳锁相接收系统	何建卫 罗薇华 (152)
用二极铯束频标束光学有关参数估算有效原子束的速度分布范围	彭纪兴 (159)
工业铯钟速率随离子泵参数变化的相关分析	胡锦涛 (165)
上海天文台铯钟改进束光学系统后的微波谱	王关忠 陆中贞 (170)

* * * * *

MK-8 终端控制软件在应用中的一些改进	薛祝和 (173)
射电天文文献数据库的建立与查询	庄雪娟 (179)
天文时纬观测和地球动力学数据库的初步设想与实践	

.....	庄雪娟 陈幼芬 李正心 (185)
PDP-11/24 计算机系统功能扩充	谭小玉 孙永源 (188)

* * * * *

我国天文学研究中核心期刊的确定和文献老化规律的认识

.....	庞小军 徐 磊 徐勉勤 周士虎 柯大荣 (191)
-------	---------------------------

ANNALS OF SHANGHAI OBSERVATORY

No. 12

CONTENTS

The effects of solar gravitation field on the time delay for VLBI	<i>Zhao Ming</i> (1)
Influence of the lunar libration models on UT0 determination from lunar laser ranging.....	<i>Xu Huaguan and Jin Wenjing</i> (5)
Anomalous residuals of optical astrometric observations at Shanghai Observatory and earthquake ($M_s=5$) in town of Tai Cang	<i>Liao Dechun and Zheng Dawei</i> (14)
On the period analysis of observable series.....	<i>Zhao Ming</i> (19)
An analysis on the stability of the JYD series of polar coordinates	<i>Qian Changxia and Li Zhengxin</i> (26)
* * * * *	
Observational examinations of some properties for the 1.56m astrometric telescope of Shanghai Observatory	<i>Wang Jiaji, Zhao Jianhong, Chen Li, Jiang Peifang and Chen Jin</i> (31)
Membership probabilities of galaxies in the region of the Virgo Cluster	<i>Zhao Junliang, Pan Rongshi and He Yanping</i> (40)
Analysis on the effects of spectral type error and magnitude difference of the 40cm astrograph at Zô-Sô for determinations of radio star positions.....	<i>Wang Shuhe, Xu Tongqi and Lu Peizhen</i> (53)
Accuracy estimation for connection between proper motions of the Hipparcos Catalogue and the optical catalogues by means of radio stars observations.....	<i>Xu Tongqi, Lu Peizhen and Wang Shuhe</i> (58)
* * * * *	
An estimation of possible accuracies in determining low-altitude satellite by chinese network.....	<i>Sun Yiqin, Kang Ying and Zhu Wenyao</i> (62)
Computerized computation for first order non-spherical perturbations of satellites.....	<i>Zhou Ming</i> (67)
Error analysis of the GPS station keeping algorithm	<i>Zhuang Qixiang</i> (74)
A precise predicting method for stellar occultation by planets	<i>Pa Dasa</i> (79)
Satellite laser ranging observation at Shanghai Observatory in 1989	<i>SLR Group</i> (85)
* * * * *	

The Dirac equation in the Kerr metric with small angular momentum
and the quasi bound state.....*Zhang Shiwei and Shen Yougen* (90)
Shanghai VLBI system for astrophysics.....*Wan Tongshan and*
Liang Shiguang (95)

* * * * *

The design and application of an automatic focusing device for the
two-mirror optical system.....*Ding Hua, Wang Lanjuan and*
Gong Shoushen (107)
S-2 VLBI data correlation system.....*Liang Shiguang and*
Huang Xinyong (114)

Measurements of electric parameters of the 25-meters antenna
.....*Huang Xinyong and Gao yihua* (127)
A software for radio source antenna temperature measurements
.....*Kong Yi* (134)

* * * * *

The initial results of researching in X-band YBCO high T_c superconducting
cavity.....*Su Jinyuan, Kou Wenwei, Luo Jiazeng,*
Xin Xuanjiao, Jiang Shunda, Zhao Meiyu, Li Chengen and Jin Hangyun (140)
Atomic hydrogen maser frequency stability measurement system
.....*Luo Weihua, Gang Guoxing, He Jianwei and Zhang Weiqun* (146)
A phase-locked receive system used in cavity auto-tuning for hydrogen
masers.....*He Jianwei and Luo Weihua* (152)
The evaluation of the velocity distribution by using beam optic parameter
in a cesium beam frequency standard.....*Peng Jixing* (159)
The correlate analysis of the industry cesium clock rate change resulted
from the ion pump parameter.....*Hu Jinlun* (165)
Microwave spectrum of optical system improvement of cesium beam
frequency standard at Shanghai Observatory
.....*Wang Guanzhong and Lu Zhongzhen* (170)

* * * * *

The improvement of MK-3 field system at Shanghai Observatory
.....*Xue Zhuhe* (173)
Establishment and query of text database for the study of radio astronomy
.....*Zhuang Xuejuan* (179)
Tentative idea and practice of database of astrometry and geodynamics
at Shanghai Observatory.....*Zhuang Xuejuan,*
Cheng Youfen and Li Zhengxin (185)
Expanding function for PDP-11/24 computer system
.....*Tan Xiaoyu and Sun Yongyuan* (188)

* * * * *

The core journals and the literatures ageing law on chinese astronomical
research.....*Pang Xiaojun,*
Xu Lei, Xu Mianqin, Zhou Shihu and Ke Darong (191)

关于太阳引力场对VLBI时延测量的影响*

赵 铭

提 要

在太阳引力场中,射电源信号的传播方向和速度均发生变化。方向的变化改变了射电源在天球上的视位置。速度的变化改变了信号传播的“光行时”。为了计算引力效应产生的附加时延,有人依据视位置变化,有人依据光行时变化。本文结论是,前一种算法在概念上是错误的。

一、 引 言

在太阳引力场中,射电源信号的传播方向和速度均发生变化。方向的变化改变了射电源在天球上的视位置。速度的变化改变了信号传播的“光行时”。现在在计算 VLBI 观测中由引力效应产生的附加时延时,在概念和算法上存在着分歧。有的用光线引力弯曲产生的视位置变化计算^[1,2],有的用光行时的变化计算^[3,4]。国内的有关学者对此也持不同意见,有的认为二者是等价的;有的则认为二者应当并列,需同时作改正。朱进^[5]对二种公式作了定量的计算,结果表明两种算法确实不可能是等价的。他认为,依据光线弯曲计算附加时延的算法没有考虑全部引力场效应,所以是不严格的。他认为应当依据光行时变化计算附加时延。我们同意他的结论,但不同意他所说的理由。我们认为两种算法的差异不是计算精度不同,而是根本概念上的不同。用光线引力弯曲的公式计算 VLBI 观测中的附加时延,是一种概念上的错误。本文将对此作出论述。

二、 VLBI 几何时延的准确概念

用坐标时表示的 VLBI 几何时延可写成众所周知的形式

$$\Delta t_0 = -\frac{1}{c} \mathbf{b} \cdot \mathbf{n} \quad (1)$$

而实际观测的时延为

$$\Delta t = \Delta t_0 + \Delta t_i$$

其中 Δt_i 是第*i*种物理机制引起的附加时延。公式(1)中, $\mathbf{b}$ 是基线矢量。 $\mathbf{n}$ 是射电源方向矢量,它是单位矢量。但是这里所谓射电源方向具体指什么方向,许多文章对此未作明确说明。然而这却是必须明确的。事实上,由于人们对这个“方向” $\mathbf{n}$ 理解不一致,导致概念和计算公式方面的混乱。因此,我们首先要确定 $\mathbf{n}$ 究竟是什么方向。

如图1所示,0是太阳系质心坐标系的坐标原点。在坐标时*t*,一电波从坐标为 $\mathbf{x}(t)$ 的射电源发出,在 t_0 和 t_1 时分别到达台站*A*和*B*。若没有太阳引力场,对于在 $\mathbf{x}_A$ 和 $\mathbf{x}_B$ 处相对于坐标

*1990年3月9日收到。

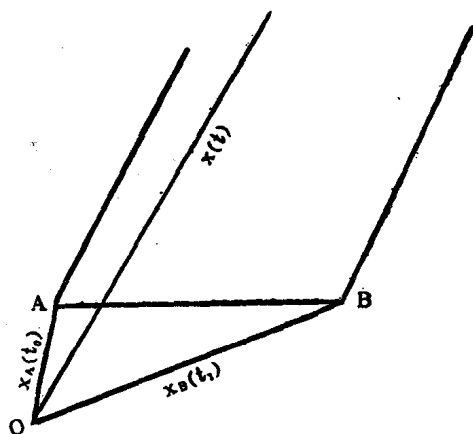


图 1
Fig. 1

系固定的两观测者, 信号到达的坐标时之差为(对河外源, 不考虑视差)

$$c\Delta t_0 = c(t_0 - t_1) = (x_B - x_A) \cdot \langle x(t) - x_A \rangle = (x_B - x_A) \cdot \langle x(t) - x_B \rangle = -b \cdot n \quad (2)$$

其中算符 $\langle \rangle$ 表示取单位矢量, n 则是射电源对观测者 A 或 B 的坐标方向, $b = x_A - x_B$ 为基线矢量。

在太阳引力场作用下, 电波传播速度发生变化, 传播路径产生弯曲。这样, 电波到达 A 和 B 的时刻分别延迟到 $\tilde{t}_0$ 和 $\tilde{t}_1$,

$$\tilde{t}_0 = t_0 + \Delta \tilde{t}_0$$

$$\tilde{t}_1 = t_1 + \Delta \tilde{t}_1$$

于是, 实测的时延变为

$$\Delta t = \tilde{t}_0 - \tilde{t}_1 = (t_0 - t_1) + (\Delta \tilde{t}_0 - \Delta \tilde{t}_1) = \Delta t_0 + \Delta t_g \quad (3)$$

由此可见, 由于引力场的影响, 实测时延 Δt 等于几何时延 Δt_0 加上引力时延 Δt_g , 而几何时延是依据源的坐标方向 n 计算的。

引力场还同时引起传播路径的弯曲, 当电波到达观测者时, 其路径的切线方向为

$$\hat{n} = n + \Delta n \quad (4)$$

这里 $\hat{n}$ 是射电源相对于静止观测者的“自然方向”。 Δn 是路径弯曲引起的方向变化。

但是从公式(3)的推导过程可以看到, 方向变化 Δn 的存在并不对到达时刻 $\tilde{t}_0$ 和 $\tilde{t}_1$ 产生影响。也就是说, 实测时延与电波的传播方向的变化 Δn 无关。

这个结论也可以用另一种方式说明。对于任何一种影响光速的机制, 我们都可以把它的效应看成是两种分效应之和: 其一只改变光线到达时的方向但不影响到达时刻, 其二只改变光线到达时刻但不影响方向。两种效应对不同的观测技术产生不同后果。对以角度测量为基础的观测技术, 如子午环等光学技术, 只能测定光线从什么方向到达而与光线在途中运行多少时间无关, 因而只受效应一的影响。对于以光行时测量为基础的技术, 如 SLR, VLBI 等, 只能测定光线在途中运行了多少时间, 而与光线到达观测者瞬间的方向无关, 因而只受效应二的影响。假定从某点发出的光经过相同时间但沿着不同路径到达观测者, 测角技术把它们等效于几个不同光源加以区别, 而测光行时技术则完全不能区分它们。

由以上讨论我们可以推而广之得出结论: VLBI 的几何时延依据射电源的坐标方向计算, 附

大气折射等因素引起信号到达方向的变化, 均不直接影响光行时。

三、对现行的两种计算公式的讨论

在依据光线引力弯曲计算附加时延的算法中^[1,2], 采用的计算公式为

$$\Delta t_d = \frac{1}{c} [x_B(t_1) - x_A(t_0)] \cdot \Delta n = -\frac{1}{c} b \cdot \Delta n \quad (5)$$

其中

$$\Delta n = (1 + \gamma) \frac{r_s}{r_e} \tan \frac{\rho}{2} \langle [n \times (n \times r_e)] \rangle \quad (6)$$

这里 r_s 是太阳的引力半径, r_e 是观测者的日心距离; γ 是时空弯曲参数, 对广义相对论, $\gamma = 1$; r_e 是太阳的地心方向; ρ 是射电源与地球在太阳处的张角, 即

$$\rho = \pi - \cos^{-1}(n \cdot r_e)$$

在采用光行时变化来计算附加时延时, 计算公式^[4]为

$$\Delta t_g = (1 + \gamma) \frac{GM}{c^3} \ln \frac{|x| + |x_A| + |x_A - x|}{|x| + |x_A| - |x_A - x|} \cdot \frac{|x| + |x_B| - |x_B - x|}{|x| + |x_B| + |x_B - x|} \quad (7)$$

其中 x_A , x_B 和 x 分别是台站 A 和 B 以及射电源的质心坐标。令

$$\Delta = (x_B - x_A) \cdot x \quad (8)$$

公式可化为

$$\Delta t_g = (1 + \gamma) \frac{GM}{c^3} \cdot \ln \frac{|x|^2 + |x|(|x_A| + |x_B|) + |x_A||x_B| + (|x_A| - |x_B|)|x_A - x| + \Delta(|x| + |x_A| - |x_A - x|)}{|x|^2 + |x|(|x_A| + |x_B|) + |x_A||x_B| - (|x_A| - |x_B|)|x_A - x| - \Delta(|x| + |x_A| + |x_A - x|)} \quad (9)$$

比较公式(5)和(9), 不难看出二者是不可能等价的。举一个简单的例子作为“两种算法等价”这一命题的反证。设太阳, 射电源和基线 b 共面。这样由(5)式知

$$\left. \begin{aligned} \Delta t_d &= \max && \text{当 } b \perp n \\ \Delta t_d &= \min && \text{当 } b // n \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

而由(9)式知

$$\left. \begin{aligned} \Delta t_g &= \min && \text{当 } b \perp n \\ \Delta t_g &= \max && \text{当 } b // n \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由此可见, Δt_d 随 n 而变化的图形与 Δt_g 正好相反。这说明公式(5)和(9)不可能等价, 倒不是因公式(5)不够严格而有些差异, 而两者完全是两回事。

四、结 论

由以上讨论我们得出结论:

太阳引力场引起的光线传播方向的偏转并不直接产生 VLBI 观测中的附加时延。依据这种方向变化所计算的所谓“附加时延” Δt_d , 不仅与依据光行时变化计算的附加时延 Δt_g 不能等价,

而且在概念上也是错误的。引力场引起的附加时延应当而且仅应当依据光行时的变化来计算。

参 考 文 献

- [1] Chopo Ma, Very Long Baseline Interferometry Applied to Polar Motion, Relativity and Geodesy, NASA Memorandum 79582, p. 62, 1978.
- [2] GSFC VLBI Group, CALC for HP1000, Version 5.0, 1981.
- [3] C. A. Murray, Vectorial Astrometry, p. 40, 1983.
- [4] M. H. Soffel, Relativity in Astrometry, Celestial Mechanics and Geodesy, p. 151, 1988.
- [5] 朱 进, 引力偏折和延迟对 VLBI 时延的影响, 天文学报, 第31卷, 350页, 1990 年。

THE EFFECTS OF SOLAR GRAVITATION FIELD ON THE TIME DELAY FOR VLBI

Zhao Ming

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In the solar gravitation field, both the propagation direction and velocity of radio signal from a source could be changed. The former effects the apparent position of the source in celestial sphere, and the latter effects the "light time" of the signal. The evaluations of the extra-delay resulted from the gravitation effects were based on the change of apparent position by some authors or on the change of "light time" by others. We conclude that these evaluations are not equivalent with each other and the former is wrong in the conception.

月球天平动模型对激光测月解算 UT0 的影响*

许华冠 金文敬

提 要

本文利用 1987 年 1 月——1989 年 3 月的 LLR 资料解算了 UT0-UTC 序列, 在归算中分别应用了 Eckhardt-500 和 LLB200 两个天平动模型, 以便分析和比较它们对解算 UT0 的影响。结果表明两个天平动模型间存在着明显的系统差。它反映在两者的事前残差中, 最大差值可达 100ns, 这就使得用 Eckhardt-500 天平动模型的事前残差解算得到的 UT0-UTC 序列对 IERS 的平均偏离比采用 LLB 200 天平动模型时要大 1ms, 但对两结果序列的外部精度没有影响。用事后残差解算, 系统差的影响减小了, 确定的 UT0-UTC 序列更靠近 IERS 系统, 用两种天平动模型解算的 UT0-UTC 结果也更接近, 外部精度也几乎一样且比用事前残差解的结果略好。

一、引 言

利用 LLR 资料解算 UT 的精度, 既取决于测距的精度, 也取决于归算中所采用的各种物理模型及有关参数的精度。物理模型的不够完善会给解算结果带来一定的系统差。在 LLR 的归算中, 影响解算结果的主要因素是行星历表、月球历表和平动模型等。目前全球 4 个激光测月分析中心使用的行星和月球历表及天平动模型各不相同。常用的行星和月球历表有 JPL 的 DE200/LE200、DE121/LE65 和 MIT 的 PEP。常用的天平动模型有 Eckhardt-500 展开式和 JPL 提供的 LLB 200、LLB12、LLB13 以及 MIT 的天平动序列等^[1]。尽管各个分析中心使用相同的观测资料进行归算, 但得到的 UT0 结果各有差异。除了归算方法上的不同外, 所采用的历表和平动模型不同也是其中一个重要因素。因此, 归算中选择一个好的历表和模型是提高解算精度的关键。这就需要对一些常用的历表、模型进行分析和比较。本文就是对我们使用过的 Eckhardt-500 和 JPL 的 LLB200 两个天平动模型进行了一些计算, 并分析了它们对解算 UT0 的影响。

二、月球物理天平动的计算

在激光测月的理论时延计算中, 需要计算月面反射器的空间位置 $\vec{B}$

$$\vec{B} = R_1(-\varepsilon)[L]\vec{r}_R + \vec{r}_M \quad (1)$$

其中, R_1 为通常定义的旋转矩阵, ε 为黄赤交角, $\vec{r}_R$ 为反射器的月面坐标, $\vec{r}_M$ 为月心的日心坐标, $[L]$ 为月球的天平动矩阵。

$$[L] = R_3(-\psi_m)R_1(\theta_m)R_3(-\phi_m) \quad (2)$$

式中 R_1 、 R_3 为通常定义下的旋转矩阵, ψ_m 、 θ_m 、 ϕ_m 为月心坐标系对固定黄道的三个欧拉角, 如

* 1990 年 4 月 13 日收到。

图 1 所示。三个欧拉角可表示为月球运动及其物理天平动的叠加^[2]

$$\begin{aligned}\psi_m &= \Omega + \sigma + d\sigma \\ \theta_m &= I + \rho + d\rho \\ \phi_m &= 180^\circ + L_m + \tau + d\tau - \psi_m\end{aligned}\quad (3)$$

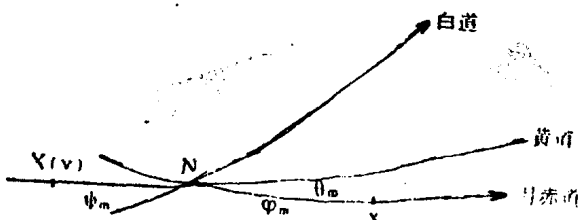


图 1 月心坐标和黄道坐标

Fig. 1 Selenocentric coordinates and ecliptical coordinates

式中 Ω 为月球轨道升交点平黄经, I 为月球赤道和黄道的交角, L_m 为月球平黄经, τ 、 ρ 、 σ 为月球物理天平动的三个分量, τ 称为经度物理天平动, ρ 称为倾角物理天平动, σ 称为交点物理天平动。

美国空军地球物理研究所的 Eckhardt 于 1981 年给出了 Eckhardt-500 天平动序列的展开式^[3]

$$\begin{aligned}\tau &= 90''.705 \sin l' + 17''.014 \sin(2l - 2F) + \dots \\ I &= -101''.889 \sin l - 24''.559 \sin(l - 2F) + \dots \\ I + \rho &= 5552''.857 - 99''.080 \cos l - 80''.830 \sin F + \dots\end{aligned}\quad (4)$$

式中 l 为月球平近点角, F 为月球对升交点的角距, l' 为太阳的平近点角。

$d\tau$ 、 $d\rho$ 、 $d\sigma$ 为行星和附加项摄动对物理天平动的影响, 量级更小, 通常由数值方法得出。

JPL 提供的天平动历表 LLB200 是把 LLB12 的参考历元从 $B_{1950.0}$ 转换至 $J_{2000.0}$, 它每隔 0.25 天直接给出一组 ψ_m 、 θ_m 、 ϕ_m , 然后通过内插求得观测时刻的值。

三、两种天平动模型计算的残差比较

月球天平动的误差直接影响到反射器空间位置的计算, 从而反映在时延残差 $\tau_o - \tau_c$ 中, 本文在计算理论时延中分别应用了上述两种天平动模型, 归算了 1987 年 1 月—1989 年 8 月的 LLR 资料, 其中包括 CER(站编号 1910)、HAL(站编号 56610)、TLR(站编号 71111) 和 LRS(站编号 71112) 四个观测站及 0、2、3 和 4 号四个反射器的共 896 个标准点。归算中的参考坐标系取为 $J_{2000.0}$ 日心平赤道坐标系。行星和月球历表采用 DE200/LE200, 并采用 IERS 规范给出的一系列参数作为初值^[4]。测站和反射器的坐标同文[1]。我们用 Eckhardt-500 和 LLB200 天平动模型计算了时延的事前残差(pre-residual), 即在计算时对所用的一系列参数初值不作任何平差改正而求得的 $\tau_o - \tau_c$ 值。由于所采用的参数还不十分精确, 各个测站观测中也有某些系统差存在, 因此, 各个测站和各个反射器的事前残差的变化幅度不一。我们把得到的残差结果按各个测站及各个反射器进行分离, 并在每一测站选一个反射器的残差结果为例分别列于表 1—4 (表内残差的单位均为 ns)。

表 1 71111 站 0 号反射器的残差结果

Table 1 Residual of reflector № 0 of 71111 station

XJD	OBSV	REF	PRES1	PRES2	DPRES	LRES1	LRES2	DLRES
2446806.676	71111	0	74.59	-1.90	76.49	5.00	2.00	3.00
2446807.803	71111	0	82.04	-0.53	82.57	3.00	1.00	2.00
2446834.735	71111	0	81.82	-0.58	82.40	2.00	1.00	1.00
2446863.627	71111	0	90.22	-0.11	90.33	0.00	2.00	-2.00
2446924.717	71111	0	144.62	3.98	140.64	2.00	2.00	0.00
2447078.750	71111	0	53.56	-7.18	60.74	3.00	0.00	3.00
2447079.784	71111	0	52.51	-6.88	59.39	2.00	0.00	2.00
2447187.688	71111	0	34.94	-3.28	38.22	1.00	0.00	1.00

表 2 56610 站 2 号反射器的残差结果

Table 2 Residual of reflector № 2 of 56610 station

XJD	OBSV	REF	PRES1	PRES2	DPRES	LRES1	LRES2	DLRES
2446893.822	56610	2	-71.66	4.27	-75.93	1.00	0.00	1.00
2446894.902	56610	2	-64.05	3.64	-67.69	-1.00	-2.00	1.00
2446952.831	56610	2	-45.84	-4.68	-41.16	-16.00	-10.00	-6.00
2446966.093	56610	2	-120.13	-7.61	-112.52	-1.00	-1.00	0.00
2447317.079	56610	2	-6.01	1.25	-7.26	5.00	1.00	4.00
2447320.051	56610	2	-31.62	-4.80	-26.82	3.00	0.00	3.00
2447320.081	56610	2	-31.15	-4.29	-26.86	3.00	0.00	3.00
2447321.068	56610	2	-38.11	-5.48	-32.63	3.00	1.00	2.00
2447321.098	56610	2	-37.55	-4.85	-32.70	3.00	1.00	2.00
2447348.132	56610	2	-36.95	-8.25	-28.70	2.00	-3.00	5.00
2447349.098	56610	2	-40.82	-6.92	-33.90	4.00	1.00	3.00
2447374.066	56610	2	-18.93	-3.27	-15.66	7.00	0.00	7.00
2447375.009	56610	2	-28.33	-5.79	-22.54	7.00	0.00	7.00
2447436.031	56610	2	-45.65	-11.31	-34.34	-1.00	0.00	-1.00
2447437.142	56610	2	-40.11	-8.16	-31.95	-1.00	1.00	-2.00

其中, PRES1 一列为用 Eckhardt-500 天平动得到的事前残差, PRES2 一列为用 LLB200 得到的事前残差, DPRES 为两者之差值。图 2 和图 3 中用 *a*、*b*、*c* 三条曲线分别表示 1910 站和 56610 站测 3 号反射器得到的上述三个量的变化情况。从表 1—4 和图 2、图 3 明显看出用 Eckhardt-500 天平动得到的事前残差的绝对值大于用 LLB200 模型得到的值。从曲线 *c* 上看出两者相差可达 10ns 到 100ns, 前者的波动也较大。其它测站和反射器的残差也有类似情况, 不过差值的大小有所不同, 这些结果表明, 两种天平动模型之间存在着较大的系统差。

表 3 71112 站 3 号反射器的残差结果

Table 3 Residual of reflector № 3 of 71112 station

XJD	OBSV	REF	PRES1	PRES2	DPRES	LRES1	LRES2	DLRES
2447220.700	71112	3	-77.72	0.68	-78.40	-1.00	0.00	-1.00
2447245.663	71112	3	-86.44	-1.83	-84.61	-2.00	-1.00	-1.00
2447246.531	71112	3	-81.86	3.44	-85.30	6.00	6.00	0.00
2447246.672	71112	3	-82.94	-0.37	-82.57	-1.00	0.00	-1.00
2447247.744	71112	3	-77.79	1.04	-78.83	-2.00	-1.00	-1.00
2447248.667	71112	3	-75.96	1.46	-77.42	-1.00	0.00	-1.00
2447248.751	71112	3	-73.56	2.01	-75.57	-2.00	-1.00	-1.00
2447249.693	71112	3	-62.70	10.56	-73.26	8.00	8.00	0.00
2447275.628	71112	3	-77.82	0.30	-78.12	-2.00	-1.00	-1.00
2447275.698	71112	3	-76.16	0.57	-76.73	-2.00	-1.00	-1.00
2447277.625	71112	3	-69.02	2.69	-71.71	-1.00	0.00	-1.00
2447277.747	71112	3	-64.97	3.81	-68.78	-1.00	0.00	-1.00
2447304.623	71112	3	-70.16	1.86	-72.02	-2.00	-1.00	-1.00
2447305.582	71112	3	-66.20	2.70	-68.90	-2.00	0.00	-2.00
2447305.667	71112	3	-63.45	3.60	-67.05	-2.00	-1.00	-1.00
2447305.690	71112	3	-63.24	3.29	-66.53	-2.00	-1.00	-1.00
2447335.532	71112	3	-51.88	5.62	-57.50	-1.00	0.00	-1.00
2447335.587	71112	3	-50.56	5.89	-56.45	-2.00	0.00	-2.00
2447335.646	71112	3	-48.52	6.77	-55.29	-2.00	0.00	-2.00
2447393.557	71112	3	-35.44	9.38	-44.82	-1.00	-1.00	0.00
2447393.601	71112	3	-34.62	9.87	-44.49	-2.00	-1.00	-1.00
2447394.515	71112	3	-33.62	10.01	-43.63	1.00	0.00	1.00
2447395.605	71112	3	-27.84	14.90	-42.74	3.00	3.00	0.00
2447396.604	71112	3	-32.04	12.70	-44.74	3.00	1.00	2.00
2447397.647	71112	3	-31.28	17.25	-48.53	8.00	6.00	2.00
2447397.749	71112	3	-31.21	16.60	-47.81	6.00	3.00	3.00
2447411.042	71112	3	-91.83	-4.86	-86.97	1.00	0.00	1.00
2447411.095	71112	3	-89.70	-2.95	-86.75	2.00	1.00	1.00
2447412.040	71112	3	-80.18	4.94	-85.12	11.00	10.00	1.00
2447425.583	71112	3	-60.17	-9.62	-50.55	-20.00	-22.00	2.00
2447432.805	71112	3	-97.62	-6.27	-91.35	-1.00	-2.00	1.00
2447432.944	71112	3	-91.00	-0.06	-90.94	2.00	2.00	0.00
2447433.785	71112	3	-101.76	-9.17	-92.59	-2.00	-2.00	0.00
2447434.827	71112	3	-103.17	-10.38	-92.79	-2.00	-2.00	0.00
2447435.891	71112	3	-100.98	-9.14	-91.84	0.00	-1.00	1.00
2447436.018	71112	3	-90.30	-0.01	-90.29	6.00	5.00	1.00
2447454.552	71112	3	-49.21	11.07	-60.28	0.00	-1.00	1.00
2447454.618	71112	3	-47.10	13.89	-60.99	1.00	1.00	0.00
2447454.679	71112	3	-46.49	14.10	-60.59	0.00	1.00	-1.00
2447455.654	71112	3	-55.50	11.89	-67.39	-1.00	0.00	-1.00
2447465.994	71112	3	-91.35	-5.77	-85.58	1.00	-1.00	2.00
2447467.087	71112	3	-85.27	-1.97	-83.30	2.00	1.00	1.00
2447467.087	71112	3	-85.27	-1.97	-83.30	2.00	1.00	1.00
2447493.973	71112	3	-88.99	-5.42	-83.57	0.00	-2.00	2.00
2447495.953	71112	3	-84.67	-4.06	-80.61	0.00	-1.00	1.00
2447496.085	71112	3	-80.00	-1.27	-78.73	0.00	-1.00	1.00
2447541.601	71112	3	-91.06	-0.25	-90.81	-6.00	-2.00	-4.00
2447550.798	71112	3	-83.62	-5.09	-78.53	-1.00	-3.00	2.00
2447582.875	71112	3	-54.03	3.19	-57.22	1.00	0.00	1.00

表 4 1910 站 4 号反射器的残差结果
Table 4 Residual of reflector № 4 of 1910 station

XJD	OBSV	REF	PRES1	PRES2	DPRES	LRES1	LRES2	DLRES
2447081.480	1910	4	17.57	-4.93	22.50	-2.00	-1.00	-1.00
2447081.493	1910	4	18.39	-4.15	22.53	-1.00	-1.00	0.00
2447081.550	1910	4	19.75	-3.33	23.08	-1.00	0.00	-1.00
2447081.575	1910	4	20.79	-2.68	23.47	-1.00	0.00	-1.00
2447081.594	1910	4	21.15	-2.70	23.85	-1.00	-1.00	0.00
2447081.606	1910	4	21.87	-2.24	24.11	-1.00	0.00	-1.00
2447081.638	1910	4	22.75	-1.96	24.71	-1.00	-1.00	0.00
2447081.653	1910	4	23.08	-1.79	24.87	-1.00	-1.00	0.00
2447082.494	1910	4	21.53	-3.48	25.01	-2.00	-1.00	-1.00
2447082.678	1910	4	27.76	0.27	27.49	-1.00	0.00	-1.00
2447082.699	1910	4	28.35	0.51	27.84	-2.00	0.00	-2.00
2447086.666	1910	4	48.11	3.97	44.14	2.00	1.00	1.00
2447086.715	1910	4	49.32	4.53	44.79	2.00	1.00	1.00
2447116.677	1910	4	59.99	6.72	53.27	4.00	1.00	3.00
2447243.211	1910	4	-29.41	-4.88	-24.53	-1.00	-2.00	1.00
2447243.286	1910	4	-23.75	-0.01	-23.74	3.00	2.00	1.00
2447243.349	1910	4	-22.86	0.35	-23.21	2.00	1.00	1.00
2447244.191	1910	4	-27.36	-2.28	-25.08	2.00	1.00	1.00
2447245.335	1910	4	-22.18	0.53	-22.71	1.00	1.00	0.00
2447245.466	1910	4	-19.88	1.34	-21.22	1.00	1.00	0.00
2447349.593	1910	4	-49.05	-2.53	-46.52	-4.00	-2.00	-2.00
2447349.692	1910	4	-46.85	-0.45	-46.40	-2.00	-1.00	-1.00
2447350.592	1910	4	-51.08	-3.29	-47.79	-3.00	-1.00	-2.00
2447350.633	1910	4	-51.12	-3.10	-48.02	-3.00	-1.00	-2.00
2447408.602	1910	4	-68.64	-7.69	-60.95	0.00	-1.00	1.00
2447409.601	1910	4	-67.68	-8.10	-59.58	0.00	-1.00	1.00
2447409.601	1910	4	-67.68	-8.10	-59.58	0.00	-1.00	1.00
2447409.646	1910	4	-66.52	-6.97	-59.55	0.00	-1.00	1.00
2447409.689	1910	4	-65.29	-6.23	-59.06	1.00	-1.00	2.00
2447524.742	1910	4	-40.12	-0.14	-39.98	0.00	0.00	0.00
2447526.660	1910	4	-31.42	0.90	-32.32	-2.00	-1.00	-1.00
2447526.698	1910	4	-29.42	1.77	-31.19	-1.00	0.00	-1.00
2447526.736	1910	4	-27.83	2.47	-30.30	-1.00	0.00	-1.00
2447526.774	1910	4	-25.91	3.70	-29.61	0.00	1.00	-1.00
2447527.665	1910	4	-23.49	2.79	-27.28	-1.00	0.00	-1.00
2447527.732	1910	4	-21.48	4.07	-25.55	0.00	0.00	0.00

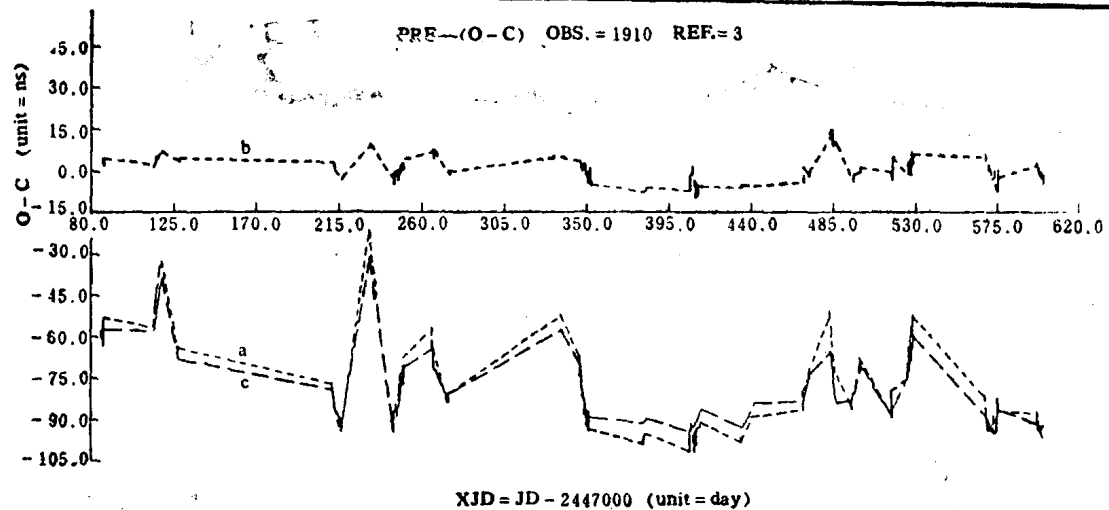


图 2 1910 站 3 号反射器的事前残差
Fig. 2 Pre-residual of reflector № 3 1910 station

再分别用上述两种天平动模型计算了时延的事后残差, (Post-residual), 即对计算事前残差时所用的参数初值进行最小二乘拟合改进后得到的拟合残差。在计算中共平差了反射器坐标、各个测站的距离偏差、月球引力位系数、天平动参数 β 、 γ 及地月系轨道参数等总共 35 个参数。为了与事前残差比较, 相应的测站和反射器的事后残差结果也列在表 1—4 中, LRES1 和 LRES2 两列值分别为两种天平动得到的事后残差, DLRES 为它们的差值。在图 4 和图 5 中分别用 a_1 、 b_1 和 c_1 三条曲线表示 1910 站和 56610 站 3 号反射器得到的上述三个量的变化情况。显然, 事后残差的量级明显减小。两种天平动模型计算的事后残差十分相近, 这说明经过平差一些初始参数后, 系统差大大减弱了。

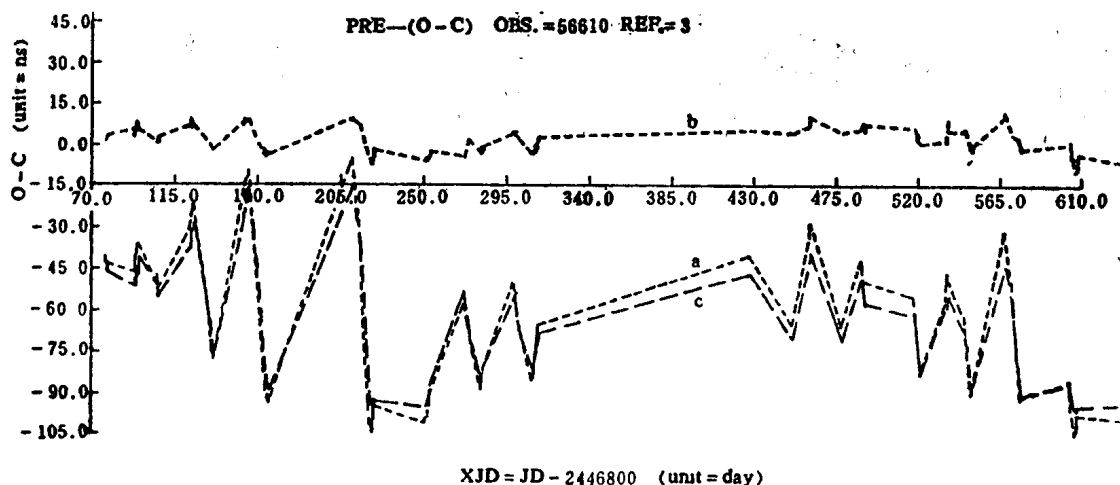


图 3 56610 站 3 号反射器的事前残差
Fig. 3 Pre-residual of reflector №3 of 56610 station

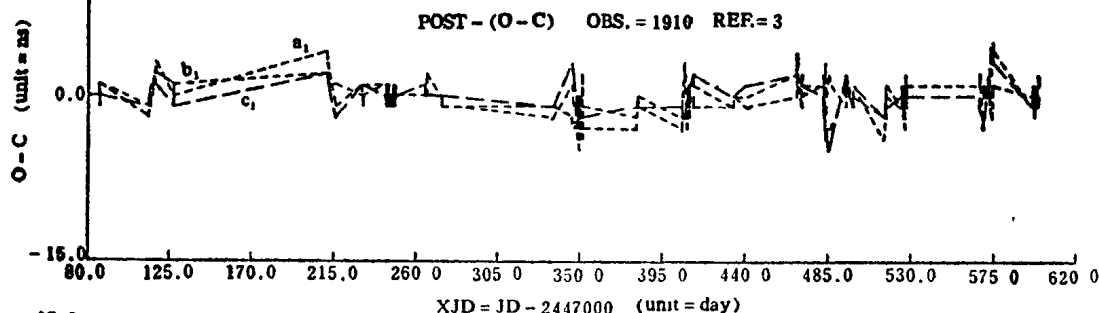


图 4 1910 站 3 号反射器的事后残差
Fig. 4 Post-residual of reflector №3 of 1910 station

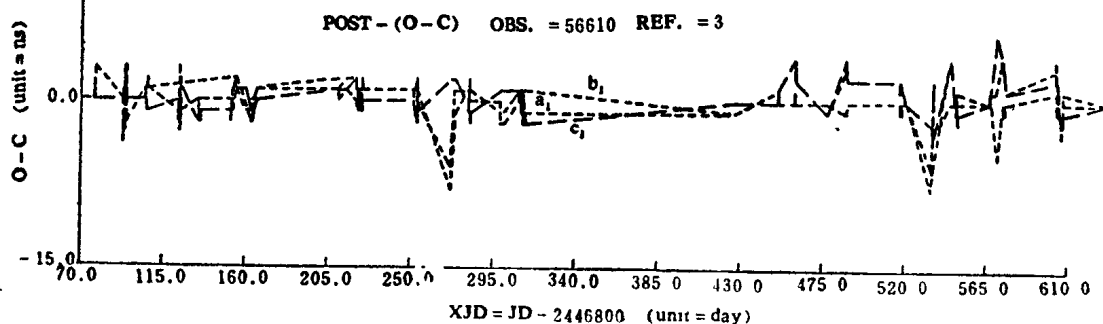


图 5 56610 站 3 号反射器的事后残差
Fig. 5 Post-residual of reflector №3 of 56610 station