

Zhang H W, Wu B, Xu H Z. A theoretical study on Laser Ranging Measurements within Pico second level. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(4): 604~609

10⁻¹²秒精度激光测距问题的理论研究

张捍卫^{1,2} 吴 斌² 许厚泽²

1 徐州师范大学国土信息与测绘工程系,徐州 221116
2 中国科学院测量与地球物理研究所,武汉 430077

摘 要 随着空间大地测量技术观测精度的提高,需要激光测距理论模型适应目前和未来可预见的精度要求. 本文基于激光测距的基本原理,给出了太阳系质心参考系(BRS)和地球质心参考系(GRS)中的相对论激光测距的理论模型,对两种激光测距模型中有关引力时延的量级进行了估计,并给出了完整而自洽的时间尺度和时空坐标变换的理论公式. 根据最新的BRS和GRS系之间的时空坐标变换关系,在皮秒(10⁻¹²s)的精度下,推导出了在GRS中适合于所有激光测距问题的相对论模型,同时扩展了IERS推荐的激光测距模型的适用范围.

关键词 空间大地测量 激光测距 相对论 参考系 引力时延

文章编号 0001-5733(2004)04-0604-06 **中图分类号** P228 **收稿日期** 2003-05-17,2004-02-25收修定稿

A THEORETICAL STUDY ON LASER RANGING MEASUREMENTS WITHIN
PICO-SECOND LEVEL

ZHANG Han-Wei^{1,2} WU Bin² XU Hou-Ze²

1 Department of Territory Information and Mapping Engineering, Xuzhou Normal University, 221116 Xuzhou, China
2 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract With the improvement of observation technique's accuracy of space geodesy, theoretical models of Laser ranging should be adapt to predictable requirement of accuracy at present and in the future. Based on the basic principle of laser ranging, a relativistic theoretical model of laser ranging in BRS and GRS is put forward in this paper. The magnitude of gravitational time delay of the two models is estimated. Theoretical formula of complete and consistent time scale and spatiotemporal coordination conversion are given meanwhile. According to the latest conversion relation between BRS and GRS, we derive the relativistic theory model of laser ranging for GRS within pico-second level, and enlarge the application range of the laser ranging model recommended by IERS.

Key words Space geodesy, Laser ranging, Relativistic theory, Reference system, Gravitational time delay.

1 引 言

激光测距(如人造地球卫星激光测距(SLR)、月球激光测距(LLR)和雷达测距)是一种重要的空间大地测量技术. 它在地球物理学和天体测量学的研究中占有重要的地位^[1,2],而且观测精度越来越高,处理模型越来越精细化. 目前,一般认为在毫米量级的数据处理中,一个完整而自洽相对论模型是必须的. SLR问题通常在地球质心参考系(GRS)中来

基金项目 国家自然科学基金项目(40374030)(40234039)、地球空间环境与大地测量教育部重点实验室资助项目(020915)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-132)资助.

作者简介 张捍卫,男,1967年10月生,教授,毕业于云南大学地球物理系(本科)和南京大学天文系(硕士),研究方向为空间大地测量学和动力大地测量学. E-mail: zhanwei800@163.com

处理,其相对论效应并不显著,相对论时延在距离上仅相当于几个厘米,因此实际中对其模型和时空坐标变换的要求并不严格.然而,LLR 问题并非如此,其情况要复杂的多. LLR 所涉及的时空范围比 SLR 要大,因此必须认真对待其时空的相对论效应.通常 LLR 问题首先在太阳质心参考系(BRS)中处理,但是在数据处理时涉及到不同的坐标系统,即月心和地心的坐标是以 BRS 系为参考,测站和月球反射器的坐标分别是以地球固定参考系和月球固定参考系为参考.因此,模型的完善必须采用完整自治的参考系理论.文献[3~6]都曾详细地讨论过 SSR 和 LLR 的相对论模型,但是这些模型在自治性和系统性方面都存在一定的缺陷,如没有考虑到自治的时间尺度和坐标的归算问题,也没有给出统一的规范模型,使得在时间尺度的换算中存在着一定的混乱.

目前对天文测地相对论理论的认识发生了重大

变化^[7],如 IAU2000 修正了时空坐标的度规形式,并引进了新的地球时的定义等,也由于基于激光测距问题中存在的问题,本文将从激光测距的一般原理出发,系统、自治地对激光测距问题进行详细而深入的研究.

2 真空中激光测距的一般原理性公式

激光测距的一般过程是:激光脉冲由测站发射,经过反射器反射再由测站接收.信号发射至接收所经历的时间由测站钟记录,由此可以获得有关测站和反射器的位置信息.设激光发射、反射和接收三个事件在 BRS 系中的时空坐标分别为 (T_1, X_1) 、 (T_0, X_0) 和 (T_2, X_2) ,而在 GRS 系中的时空坐标分别为 (t_1, x_1) 、 (t_0, x_0) 和 (t_2, x_2) .在太阳系质心参考系中时间坐标和空间坐标可以通过以下公式联系起来^[8]:

$$c|T_0 - T_i| = |X_0(T_0) - X_i(T_i)| + c \times \Delta T_{\text{grav}}(0 \rightarrow i), \quad (1a)$$

$$\Delta T_{\text{grav}}(0 \rightarrow i) = \sum \frac{2GM_J}{c^3} \ln \frac{|X_i(T_i) - X_J(T_0)| + |X_0(T_0) - X_J(T_0)| + |X_i(T_i) - X_0(T_0)|}{|X_i(T_i) - X_J(T_0)| + |X_0(T_0) - X_J(T_0)| - |X_i(T_i) - X_0(T_0)|}, \quad (1b)$$

这里 c 为光速, G 为万有引力常数, M_J 、 $X_J(T_0)$ 是太阳系中某一天体的静止质量和在 T_0 时刻的在 BRS 系中的位置矢量,并对所有天体求和.由以上公式可得:

$$T_2 - T_1 = \frac{1}{c} [|X_0(T_0) - X_1(T_1)| + |X_2(T_2) - X_0(T_0)|] + \Delta T_{\text{grav}}, \quad (2a)$$

$$\Delta T_{\text{grav}} = \Delta T_{\text{grav}}(1 \rightarrow 0) + \Delta T_{\text{grav}}(0 \rightarrow 2), \quad (2b)$$

其中 ΔT_{grav} 是激光测距问题中由于引力场造成的引力时延,在平直的时空(无引力场)中引力时延为零.(2)式就是在 BRS 系中激光测距的一般原理性公式, $T_2 - T_1$ 是信号传播过程中的坐标时(TCB)的总时延,这一公式在理论上是严格的.

根据地球质心参考系中的度规张量的表达式,可以写出激光测距的一般模型公式^[6]:

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{c} [|x_0(t_0) - x_1(t_1)| + |x_2(t_2) - x_0(t_0)|] + \Delta t_{\text{grav}}, \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{grav}} = & \frac{2GM_{\oplus}}{c^3} \left\{ \ln \frac{|x_1(t_1)| + |x_0(t_0)| + |x_1(t_1) - x_0(t_0)|}{|x_1(t_1)| + |x_0(t_0)| - |x_1(t_1) - x_0(t_0)|} + \ln \frac{|x_2(t_2)| + |x_0(t_0)| + |x_2(t_2) - x_0(t_0)|}{|x_2(t_2)| + |x_0(t_0)| - |x_2(t_2) - x_0(t_0)|} \right\} \\ & + \sum_J \left\{ \frac{2GM_J}{c^3} \left[\ln \frac{|x_1(t_1) - x_J(t_0)| + |x_0(t_0) - x_J(t_0)| + |x_0(t_0) - x_1(t_1)|}{|x_1(t_1) - x_J(t_0)| + |x_0(t_0) - x_J(t_0)| - |x_0(t_0) - x_1(t_1)|} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{|x_0(t_0) - x_1(t_1)|}{|x_J(t_0)|} \left(1 + \frac{x_J(t_0) \cdot (x_1(t_1) + x_0(t_0))}{2|x_J(t_0)|} \right) \right] \right. \\ & \left. + \frac{2GM_J}{c^3} \left[\ln \frac{|x_2(t_2) - x_J(t_0)| + |x_0(t_0) - x_J(t_0)| + |x_0(t_0) - x_2(t_2)|}{|x_2(t_2) - x_J(t_0)| + |x_0(t_0) - x_J(t_0)| - |x_0(t_0) - x_2(t_2)|} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{|x_0(t_0) - x_2(t_2)|}{|x_J(t_0)|} \left(1 + \frac{x_J(t_0) \cdot (x_2(t_2) + x_0(t_0))}{2|x_J(t_0)|} \right) \right] \right\}, \quad (3b) \end{aligned}$$

这里 $M_{\odot}$ 是地球质量, $x_j(t_0)$ 是太阳系中某一天体于 t_0 时刻在 GRS 系中的位置矢量. 其中, 第一大括弧部分是由于地球的引力作用引起的引力时延, 第二大括弧部分是由于外天体引潮力引起的引力时延. (3) 式就是在 GRS 系中激光测距的一般原理性公式, $t_2 - t_1$ 是信号传播过程中的坐标时 (TCG) 的总时延, 如果是在非旋转的地球质心参考系中, 这一公式同样是严格的.

3 在 BRS、GRS 系中引力时延的量级估计

根据 (2b) 式, 对于 SLR 设 $|x_1(t_1) - x_0(t_1)| \approx 3 \times 10^4 \text{ km}$, 而对于 LLR 设 $|x_1(t_1) - x_0(t_1)| \approx 4 \times 10^5 \text{ km}$, 可得在 BRS 系各天体所导致的信号往返路程的引力时延量级见表 1. 同理根据 (3b) 式, 对 SLR、LLR 采用同样的假设可得在 GRS 系中各天体所导致的信号往返路程的引力时延量级, 见表 2.

表 1 在 BRS 系中有关 SLR 和 LLR 的引力时延量级估计

Table 1 Magnitude estimation of gravitational time delay in the BRS system for SLR and LLR

引力天体	SLR		LLR	
	$\Delta T_{\text{grav}}/\text{s}$	$(c \times \Delta T_{\text{grav}})/\text{cm}$	$\Delta T_{\text{grav}}/\text{s}$	$(c \times \Delta T_{\text{grav}})/\text{cm}$
太阳	4×10^{-9}	120	5×10^{-8}	1600
地球	1×10^{-10}	3	2×10^{-10}	7
月球	1×10^{-12}	3×10^{-2}	3×10^{-12}	0.1
木星	1×10^{-12}	3×10^{-2}	1×10^{-11}	0.4

表 2 在 GRS 系中有关 SLR 和 LLR 的引力时延量级估计

Table 2 Magnitude estimation of gravitational time delay in the GRS system for SLR and LLR

引力天体	SLR		LLR	
	$\Delta t_{\text{grav}}/\text{s}$	$(c \times \Delta t_{\text{grav}})/\text{cm}$	$\Delta t_{\text{grav}}/\text{s}$	$(c \times \Delta t_{\text{grav}})/\text{cm}$
地球	1×10^{-10}	3	2×10^{-10}	7
月球	2×10^{-15}	6×10^{-5}	3×10^{-12}	0.1
太阳	1×10^{-15}	3×10^{-5}	1×10^{-13}	3×10^{-3}

比较表 1 和表 2 可以看出: 对于 SLR 来说, 如果在 BRS 系中处理激光测距问题, 为了达到皮秒 (10^{-12} s) 的精度必须考虑几乎所有的引力天体, 而如果在 GRS 系中处理的话, 则只需要考虑地球和月球的引力作用, 其余的天体可以忽略. 可见对于近地卫星 (SLR), 可以在 GRS 系中进行数据处理, 所考虑的天体只涉及到地球^[9]. 对于 LLR 来说, 无论在 GRS 系还是在 BRS 系中处理激光测距问题, 在皮秒

的精度上所有的天体都必须考虑. 由于 GRS 定义的非完备性 (相对于惯性空间存在一个微小的旋转, 即是局部惯性系), 所以在处理 LLR 问题时必须在 BRS 中处理.

从激光测距问题 BRS 模型 (2) 式、GRS 模型 (3) 式以及在各种模型中的引力时延量级的估计可以看出, 在皮秒量级的精度上两种模型在形式上的最大不同在于 GRS 模型不需要考虑太阳和行星的引力时延. 根据前面的讨论, 在 BRS 模型中太阳的引力时延效应可高达十几米, 而在 GRS 模型中这种效应是不存在的. 是否两种模型存在着本质的差别, 或者存在着优劣之分呢? 实际上并非如此. 文献 [6] 利用 BRS 和 GRS 系的坐标变换关系理论, 证明了这两种模型在毫米精度上是完全等价的, 引力时延的差异是坐标系的选择不同所产生的结果.

4 时间尺度和坐标的归算问题

在 GRS 系或在 BRS 系中处理激光测距问题, 都必须将时间观测量、测站和反射器的空间位置坐标归算到统一的坐标系中. 完成以上工作必须有完整自治的相对论参考系理论作为基础. 通常测站是以地球固定参考系作为参考, 人造地球卫星是以 GRS 系作为参考, 月面反射器是以月球固定参考系作为参考; 而地球质心、所有行星和月球质心则是以 BRS 系为参考. 显然, 理论上这些不同的参考系之间的变换应该以广义相对论为基础, 而不能采用经典的伽利略变换. 但是在实际应用中, 由于时空的相对论效应很小, 在毫米量级的精度上, 只有 GRS 和 BRS 之间的变换需要顾及相对论效应^[6].

设某一具体测站在地球固定参考系中的位置矢量为 r_{TCG} (已知量), 在 GRS 系中的位置矢量为 x_{TCG} , 而在 BRS 中的位置矢量为 x_{TCB} . 根据 BRS 系与 GRS 系的转换关系式可以得^[10]

$$x_{\text{TCG}} = \text{PNRW}(r)_{\text{TCG}}, \quad (4)$$

$$x_{\text{TCB}} = x_{\text{TCG}} \left(1 - \frac{U_{0\text{ext}}}{c^2} \right) - \frac{1}{2} \frac{V_E \cdot x_{\text{TCG}}}{c^2} V_E, \quad (5)$$

这里 P、N、R、W 是坐标旋转矩阵^[7]; $U_{0\text{ext}}$ 是除了地球之外所有天体在地球质心处的引力位, V_E 是地球质心在太阳系质心参考系中的速度. 设人造地球卫星, 或者月面反射器的坐标在 GRS 系中的位置矢量为 x , 而在 BRS 系中的位置矢量为 X , 则它们之间的关系仍然为 (5) 式.

然而一般情况下, 地面测站的位置是以 UTC 为

时间引数进行描述的(UTC 与 TAI、TT 具有相同的时间尺度,但存在跳秒),在 GRS 系中是以地球时(TT)为时间引数描述卫星运动的,而在 BRS 系中则是以太阳系动力学时(TDB)为时间引数来描述行星的运动.所以在采用动力学时取代坐标时的时候,必须对有关的位置矢量进行适当的变换.根据一定的理论推导可得^[7,10]

$$x_{TT} = \text{PNRW}(r)_{TT}, \quad (6)$$

$$c(T_2 - T_1) = |X_0(T_0) - X_1(T_1)| + |X_0(T_0) - X_2(T_2)| + c \times \Delta T_{\text{grav}}, \quad (8a)$$

$$\Delta T_{\text{grav}} = \sum \frac{4GM_J}{c^3} \ln \frac{|X_2(T_0) - X_I(T_0)| + |X_0(T_0) - X_I(T_0)| + |X_2(T_0) - X_0(T_0)|}{|X_2(T_0) - X_J(T_0)| + |X_0(T_0) - X_J(T_0)| - |X_2(T_0) - X_0(T_0)|}, \quad (8b)$$

这里在引力时延公式中的所有位置矢量都在 T_0 时刻取值,并且忽略了发射和接收两个事件时空坐标的差别,这是因为在(8a)式的右端中的两个距离之差是由于测站的速度引起的,在引力时延项里这些差异引起的误差是完全可以忽略的^[8].同时令

$$X_i(T_i) = R(T_0) + \dot{R}(T_0)(T_i - T_0) + \frac{1}{2} \ddot{R}(T_0)(T_i - T_0)^2 \quad (i = 1, 2), \quad (9a)$$

$$L = X_0(T_0) - R(T_0), \quad (9b)$$

这里 $\dot{R}(T_0)$ 、 $\ddot{R}(T_0)$ 是测站在 T_0 时刻的速度和加速度, $|L|$ 为在 T_0 时刻测站与目标的欧氏距离.利用以上两式对(8a)中的两个距离项进行展开,在展开的过程中精确到速度的二次幂和加速度的一次幂,得

$$\begin{aligned} |X_0(T_0) - X_i(T_i)| &= L \left[1 - \frac{L \cdot \dot{R}}{L^2} (T_i - T_0) - \frac{1}{2} \frac{L \cdot \ddot{R}}{L^2} (T_i - T_0)^2 + \frac{1}{2} \frac{\dot{R} \cdot \dot{R}}{L^2} (T_i - T_0)^2 - \frac{1}{2} \frac{(L \cdot \dot{R})^2}{L^4} (T_i - T_0)^2 \right], \end{aligned} \quad (10)$$

这样有

$$\begin{aligned} &|X_0(T_0) - X_1(T_1)| + |X_0(T_0) - X_2(T_2)| \\ &= 2L - \frac{L \cdot \dot{R}}{L} [(T_1 - T_0) + (T_2 - T_0)] \\ &\quad + \frac{1}{2L} \left[\dot{R} \cdot \dot{R} - L \cdot \ddot{R} - \frac{(L \cdot \dot{R})^2}{L^2} \right] \\ &\quad \times [(T_1 - T_0)^2 + (T_2 - T_0)^2], \end{aligned} \quad (11)$$

$$X_{\text{TDB}} = x_{\text{TT}} \left[1 - \frac{U_{\text{ext}}}{c^2} - L_C \right] - \frac{1}{2} \frac{V_E \cdot x_{\text{TT}}}{c^2} V_E, \quad (7)$$

这里 L_C 表示的是 TCB 与 TCG 时间尺度差别的长期项.

5 BRS 系激光测距问题的实用公式

根据激光测距的一般原理性公式(1)式,可得

上式右端最后一项包含有速度平方和加速度项,因此为二级小量,故可以用零级近似取代,有

$$(T_1 - T_0)^2 + (T_2 - T_0)^2 = 2 \left(\frac{L}{c} \right)^2, \quad (12)$$

(11)式右端第二项含有速度的一次幂,因此必须准确到一级近似.将(10)代入(1)并取到速度的一次幂后有^[8]

$$\begin{aligned} c(T_0 - T_1) &= L + \frac{L \cdot \dot{R}}{L} (T_0 - T_1), \\ c(T_2 - T_0) &= L - \frac{L \cdot \dot{R}}{L} (T_2 - T_0), \end{aligned} \quad (13)$$

这样有

$$(T_1 - T_0) + (T_2 - T_0) = -2 \frac{L \cdot \dot{R}}{c^2}, \quad (14)$$

把(14)和(12)代入到(11)式后有

$$\begin{aligned} &|X_0(T_0) - X_1(T_1)| + |X_0(T_0) - X_2(T_2)| \\ &= 2L + L \left[\frac{\dot{R} \cdot \dot{R}}{c^2} + \left(\frac{L \cdot \dot{R}}{cL} \right)^2 - \frac{L \cdot \ddot{R}}{c^2} \right], \end{aligned} \quad (15)$$

再把(15)式代入到(8)式有

$$\begin{aligned} c(T_2 - T_1) &= 2L + L \left[\frac{\dot{R} \cdot \dot{R}}{c^2} + \left(\frac{L \cdot \dot{R}}{cL} \right)^2 - \frac{L \cdot \ddot{R}}{c^2} \right] + c \times \Delta T_{\text{grav}}, \end{aligned} \quad (16)$$

上式等号右端都在 T_0 时刻取值,它就是激光测距或者雷达测距观测中所采用的时延模型公式.

6 GRS 系激光测距问题的实用公式

在 GRS 系中,令

$$x_i(t_i) = r(t_0) + \dot{r}(t_0)(t_i - t_0)$$

$$+ \frac{1}{2} \ddot{r}(t_0) (t_i - t_0)^2 \quad (i = 1, 2), \quad (17)$$

$$\rho = x_0(t_0) - r(t_0), \quad (18)$$

这里 $\dot{r}(t_0)$ 、 $\ddot{r}(t_0)$ 是测站在 t_0 时刻的速度和加速度, $|\rho|$ 为在 t_0 时刻测站与目标在 GRS 系中的欧氏距离. 利用(5)式可得

$$L = \rho \left[1 - \frac{U_{0\text{ext}}}{c^2} \right] - \frac{1}{2} \frac{V_E \cdot \rho}{c^2} V_E, \quad (19)$$

这样有

$$L = \rho \left[1 - \frac{U_{0\text{ext}}}{c^2} - \frac{(V_E \cdot \rho)^2}{2c^2 \rho^2} \right], \quad (20)$$

原则上 $\dot{R}(T_0)$ 、 $\ddot{R}(T_0)$ 和 $\dot{r}(t_0)$ 、 $\ddot{r}(t_0)$ 都可以通过(5)式进行坐标转换, 但由于(16)式右端第二项为相对论引起的小量改正, 故可以认为

$$\begin{aligned} & \frac{\dot{R} \cdot \dot{R}}{c^2} + \left\{ \frac{L \cdot \dot{R}}{cL} \right\}^2 - \frac{L \cdot \ddot{R}}{c^2} \\ &= \frac{\dot{r} \cdot \dot{r}}{c^2} + \left\{ \frac{\rho \cdot \dot{r}}{\rho} \right\}^2 - \frac{\rho \cdot \ddot{r}}{c^2}, \end{aligned} \quad (21)$$

把(20)和(21)代入(16)式可得

$$c(t_2 - t_1) = \frac{\rho \left[2 + \frac{\dot{r} \cdot \dot{r}}{c^2} + \left(\frac{\rho \cdot \dot{r}}{\rho} \right)^2 - \frac{\rho \cdot \ddot{r}}{c^2} - 2 \frac{U_{0\text{ext}}}{c^2} - \frac{(V_E \cdot \rho)^2}{c^2 \rho} \right] + c \times \Delta T_{\text{grav}}}{1 + \frac{U_{0\text{ext}}}{c^2} + \frac{|V_E|^2}{2c^2} + \frac{V_E \cdot \dot{r}}{c^2}}, \quad (25)$$

以上的推导过程保留了所有大于 10^{-13} s 的项, 因此公式(25)就是在地球质心参考系中基于皮秒精度的激光测距理论模型. 公式(3)只适应于人造地球卫星激光测距 (SLR) 和雷达测距, 而(25)式在皮秒的精度上适合于所有类型的激光测距问题.

7 结 论

综上所述, BRS 和 GRS 系中的激光测距模型可分别用(1)、(2)、(16)式和(3)、(25)式表示. 两个模型的最大差别是 GRS 模型不需要考虑太阳和其他行星引起的引力时延的影响. 在 BRS 系中, 太阳引力时延对 LLR 距离的影响可达 10m, 对 SLR 的影响为米级. 但两种模型在相对论框架中是自治等价的. 引力时延的差异是坐标系选择不同产生的结果, 这说明了地球局部惯性系在应用中的优越性. 在局部惯性系中, 由于时空局部的平直性, 各种相对论效应大大减弱了, 从而使各种测量结果的物理意义更加明晰.

$$\begin{aligned} c(T_2 - T_1) &= \rho \left[1 - \frac{U_{0\text{ext}}}{c^2} - \frac{(V_E \cdot \rho)^2}{2c^2 \rho} \right] \left\{ 2 + \frac{\dot{r} \cdot \dot{r}}{c^2} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\rho \cdot \dot{r}}{\rho} \right)^2 - \frac{\rho \cdot \ddot{r}}{c^2} \right\} + c \times \Delta T_{\text{grav}} \\ &= \rho \left\{ 2 + \frac{\dot{r} \cdot \dot{r}}{c^2} + \left(\frac{\rho \cdot \dot{r}}{\rho} \right)^2 - \frac{\rho \cdot \ddot{r}}{c^2} \right. \\ &\quad \left. - 2 \frac{U_{0\text{ext}}}{c^2} - \frac{(V_E \cdot \rho)^2}{c^2 \rho} \right\} + c \times \Delta T_{\text{grav}}, \end{aligned} \quad (22)$$

根据 BRS 系与 GRS 系的时间间隔变换关系式^[7], 可得

$$\begin{aligned} T_2 - T_1 &= \left[1 + \frac{U_{0\text{ext}}(X_E)}{c^2} + \frac{1}{2} \frac{|V_E|^2}{c^2} \right] (t_2 - t_1) \\ &\quad + \frac{V_E \cdot [x_2(t_2) - x_1(t_1)]}{c^2}, \end{aligned} \quad (23)$$

把(17)式代入上式, 并忽略与加速度有关的项, 得

$$\begin{aligned} T_2 - T_1 &= \left[1 + \frac{U_{0\text{ext}}(X_E)}{c^2} + \frac{1}{2} \frac{|V_E|^2}{c^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{V_E \cdot \dot{r}}{c^2} \right] (t_2 - t_1), \end{aligned} \quad (24)$$

比较(21)式和(23)式, 得:

由 IERS 规范推荐的激光测距模型与本文推导的结果在形式上基本一致, 但本文给出了自治的时空坐标变换关系式(4~7)式, 并且把激光测距的 BRS 模型在皮秒的精度上转换到了 GRS 模型, 使得(25)式适合于所有类型的激光测距问题.

参考文献

- [1] 冯初刚. 用 LAGEOS-1 的激光测距资料测定地球引力常数 GM. 地球物理学报, 1997, 40(4): 529~538
Feng C G. Determination of the gravitational coefficient of the Earth from the SLR data of LAGEOS-1. Chinese J. Geophys. (Acta Geophysica Sinica) (in Chinese), 1997, 40(4): 529~538
- [2] 张强, 朱文耀, 熊永清. 关于 ITRF96 参考架整体旋转性的探讨. 地球物理学报, 2000, 43(5): 598~606
Zhang Q, Zhu W Y, Xiong Y Q. Net rotation of the ITRF96. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2000, 43(5): 598~606
- [3] Hellings R W. Relativistic effects in astronomical timing measurements. Astron. J., 1986, 91: 650~659
- [4] Newhall X X, Williams J G, Dickey J O. Relativity modelling in lunar ranging data analysis. In: Proc. IAG Symp., Vancouver, 1987. 78

- [5] Ries J C, Huang C, Watkins M M. The effect of general relativity on near-Earth satellites in the solar system barycentric and geocentric reference frames. *Phys. Rev. Let.*, 1988, **61**: 903
- [6] 韩春好. 太阳系质心参考系和地球质心参考系中的激光测距问题. *解放军测绘学院学报*, 1997, **14**(4): 250~255
- Han C H. Laser ranging problem in barycentric reference system and geocentric reference system. *Journal of Institute of PLA Surveying and Mapping* (in Chinese), 1997, **14**(4): 250~255
- [7] McCarthy, Dennis. D., (ed), 2003, IERS Conventions (2003). IERS Technical Note 32, Observatoire de Paris, <http://maia.usno.navy.mil/conv2003.html>
- [8] 夏一飞, 黄天依. 球面天文学. 南京: 南京大学出版社, 1995
- Xia Y F, Huang T Y. *Spherical Astronomy* (in Chinese). Nanjing: Nanking University Press, 1995
- [9] Ries J C, Huang C, Watkins M M. The effect of general relativity on near-Earth satellites in the solar system barycentric and geocentric reference frames. *Phys. Rev. Let.*, 1988, **61**: 903
- [10] Capitaine N, Gambis D, McCarthy D D, et al. (ed.). IERS Technical Note No. 29: Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of the New IAU Resolutions. 2002, <http://www.iers.org/iers/publications/tn/tn29/>

CPS/SEG 北京 2004 国际地球物理学术会议暨展览在京举行

2004 年 3 月 31 日至 4 月 3 日, CPS/SEG 北京 2004 国际地球物理会议暨展览在北京国际会议中心举行。自 1978 年以来, 本次大会是勘探地球物理学界在中国举办的最大的一次国际会议, 会议由中国石油学会 (CPS) 和美国勘探地球物理学家学会 (SEG) 联合举办, 以地球物理如何满足油气勘探的高难度化、满足全球日益增长的能源需求为本次会议主题, 针对具有巨大挑战性的中国西部复杂地表、复杂地质条件下的各种地球物理勘探问题展开学术讨论。与会代表包括国内外地球物理学专家、以及展商 1200 余名, 其中外宾约 100 人。大会收到了来自于 9 个国家的论文共计 390 篇, 经严格审稿最终被录用 352 篇 (其中包括张贴报告 103 篇)。此次大会还在面积约 3000m² 的展厅内设立了与地球物理相关的软件、仪器和设备的展区, 共计 65 家展商参展 (其中 21 家来自国外), 参观展览的会议代表约 4000 人次。

3 月 31 日下午, 在北京国际会展中心大厅举行了盛大的开幕式。中国石油学会主席黄炎, SEG 主席 Peter M. Duncan, 中国石油天然气集团公司 (CNPC) 副总经理周吉平, 中国石油化工股份有限公司 (SINOPEC) 总裁助理宋万超, 中国海洋石油总公司 (CNOOC) 副总经理蒋龙生, 中国石油天然气集团公司总经理助理、大会组委会主席徐文荣先后致词, 对本次大会的召开表示祝贺并预祝大会圆满成功。

4 月 1 日, 大会全面展开, 包括学术报告、产品推广介绍等内容。并展开了以数据采集、数据处理、偏移成像、地震解释、非地震方法以及近地表地球物理等方面的学术报告和专题讨论。

地震数据采集方面, 与会代表介绍了西部复杂山地、海上地震勘探、南海相复杂地表地质条件下的地震勘探技术。数据处理方面, 针对地震数据的复杂性, 讨论了多种噪声压制方法, 如三维地震资料叠前规则噪声压制、利用三维聚束滤波方法消除地震资料中的相关噪声、基于局部多项式滤波器的局部线性相干噪声压制、海上地震数据中侧面干扰波的压制方法等, 并探讨了地震数据的高频恢复、任意复杂介质中主能量法地震波走时的计算、弹性波模拟等相关方法。偏移成像方面, 针对当前偏移的多种方法进行了探讨。涉及到的偏移方法主要有保角变换偏移成像方法、波动方程叠前深度偏移复杂构造成像、复杂构造的小波束偏移 GD 格架的叠前射束偏移、拉当投影法三维叠前深度偏移、炮点-全偏移距共方位角道集三维叠前深度偏移、三维混合法叠前深度偏移以及保幅偏移方法, 这些方法在应用当中取得了较理想的效果。地震解释方面, 对不同的解释方法进行了实例研究, 并讨论了有关岩性识别和储层预测的新方法新技术。本次会议还涉及到非地震、近地表地球物理、井中地球物理、多波、静校正等多个专题, 内容涉及到地球物理的各个领域, 与会人员就这些前沿技术的新成果进行了广泛的交流, 对勘探地球物理的发展具有重要的意义。

CPS/SEG BEIJING 2004 INTERNATIONAL GEOPHYSICAL CONFERENCE AND EXPOSITIONHOLD IN BEIJING

(张平平 常旭)