

# 利用“火星快车”三程多普勒跟踪数据 限定局部洛伦兹不变性

张羽飞<sup>1,2</sup>, 刘景昊<sup>1,2</sup>, 黄勇<sup>3</sup>, 谢懿<sup>1,2</sup>

(1. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210093; 2. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030;  
3. 中国科学院上海天文台, 上海 200030)

**摘要:**目前航天器的三程多普勒跟踪技术已经在深空探测的控制与导航领域起到了重要作用。利用包含了对局部洛伦兹不变性(LLI)以及局部位置不变性(LPI)原理有破坏的三程多普勒跟踪理论,研究分析了“火星快车”(MEX)三程多普勒跟踪数据的残差。这些多普勒观测于2009年8月7日和8日进行,利用了欧洲航天局(ESA)在澳大利亚新诺舍(New Norcia)的上行站和三个分别在中国上海、昆明以及乌鲁木齐的下行站。我们发现,这些观测结果给出的LLI上限在 $10^{-2}$ 的量级。但由于各观测站本身对频率测量的精度有限,这些数据并不适合于检验LPI。

**关键词:** 航天器技术; 引力; 多普勒跟踪

**中图分类号:** P129

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2015)02-144-05

**DOI:**10.15982/j.issn.2095-7777.2015.02.007

## 0 引言

多普勒跟踪技术是当下确定航天器运动状态最重要的方法之一。其作为一种航天器控制与导航的手段,已成功地应用在许多深空探测任务中,它包括单程、双程和三程这3种模式<sup>[1-2]</sup>。该技术在很多时候,不仅仅可以被用作一种导航的手段,也可以被应用在科学研究中。例如基本物理学研究<sup>[3]</sup>。在本文中我们专注于将其应用于验证爱因斯坦等效原理(EEP)。

EEP是广义相对论(GR)理论体系建立的基础,同时也是其他所有引力度规理论的基础。EEP可以被表述为以下的三个部分:1)弱等效原理(WEP),即在一个均匀的引力场中,自由下落的无结构检验粒子其加速度不依赖于它本身的性质,例如其质量、组成和热力学性质;2)局部洛伦兹不变性(LLI),任何在局部进行的非引力实验,其结果与测量该过程的实验装置的速度无关;3)局部位置不变性(LPI),任何在局部进行的非引力实验的结果,与其时间、地点无关<sup>[3-5]</sup>。EEP的第2条和第3条,即LLI和LPI,可以通过频率测量来检验。在实验中,信号由一个在有质量物体周围引力场中运动的时钟

发出,通过测量器发出信号的频率就可以来检验EEP的后两条原理<sup>[6]</sup>。一些相关的实验已经在地球附近<sup>[7]</sup>,以及在行星际空间<sup>[6,8]</sup>开展。以上的这些实验已经将EEP验证的精度确定在了 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 的量级上。

所有这些实验都依赖于由航天器发射到地面测站的单程无线电信号。这里航天器发射单程无线电信号的频率是星载时钟或者是由频率标准的信号源所提供的。在实验中还需要把测站接收到的信号与测站本地的标准相比对。然而相对于地面测站的频率标准而言,星载信号的频率标准是相当不稳定的,且航天器所发射的信号会受到航天器中仪器自身的噪声所限制。对于这个问题,一个解决的方法是采用双程或者是三程的多普勒跟踪技术。考虑到这个解决方法上的一些优势,文献[9]讨论了在接收过程中LLI和LPI这两条原理有破坏的可能,并扩展了在双程和三程多普勒跟踪过程中需要的相对论理论。

在本文中,我们将要利用这个方法分析“火星快车”(MEX)三程多普勒跟踪的残差,通过利用这个模型对这些数据的分析,找到对于这些数据而言使得LLI和LPI成立的上限。我们所用到这些MEX

的多普勒跟踪数据是在 2009 年 8 月 7 日—8 日之间得到的,整个过程中使用了欧洲航天局(ESA)在澳大利亚新诺舍的上行站,而 MEX 信号的接收工作是由 3 个在中国的下行站完成的,它们分别位于上海、昆明以及乌鲁木齐。这篇文章接下来的内容是这样构成的:第 1 节着重于描述三程多普勒跟踪方法,以及可能观测到的对 LLI 和 LPI 破坏的现象。在第 2 节中,展示了对 MEX 的三程多普勒跟踪的观测结果,以及对于这部分观测的数据处理工作。在第 3 节,将残差用来估计满足 LLI 和 LPI 的上限。第 4 节总结了研究结果。

## 1 在 LLI 以及 LPI 有破坏情况下的三程多普勒跟踪

从单程多普勒跟踪模型<sup>[8]</sup>出发,Deng 等(2014)<sup>[9]</sup>为了检验 EEP 扩充了双程和三程多普勒跟踪理论,采用的方法考虑了 LLI 和 LPI 被破坏这一现象出现的可能。这里,我们只简述上述工作中的主要结果,如需了解更多细节请参阅相关的研究<sup>[9]</sup>。

三程多普勒跟踪中有两个观测站,其中一个地面站( $S_1$ )在  $t_E$  时刻发射一个频率为  $\nu_E$  的电磁信号,该信号在  $t$  时刻被太空中的航天器( $P$ )接收,频率为  $\nu'$ 。然后,此航天器立即以  $q\nu'$  (其中  $q$  为一个已知的两个整数的比值)的频率转发信号。接着,此信号被另外一个地面站( $S_2$ )在时刻  $t_R$  以频率  $\nu_R$  接收。整个过程可以分解为两个单程多普勒跟踪的过程,这个开环回路的频移可以简明扼要地表示为

$$\frac{\nu_R}{q\nu_E} \Big|_{S_1 \rightarrow P \rightarrow S_2} = \frac{\nu'}{\nu_E} \cdot \frac{\nu_R}{q\nu'} = F_{S_1 \rightarrow P}(t_E, t') \cdot F(t', t_R) + O(\epsilon^3) \quad (1)$$

其中,  $\epsilon \equiv c^{-1}$ ,  $c$  为光速;函数  $F$  包含两个部分: $\hat{F}$  和  $\bar{F}$ ,  $\hat{F}$  代表 EEP 理论预言的频率变化,而  $\bar{F}$  则表明了可能的 LLI 和 LPI 被破坏后产生的效应。它们的完整表达式在文献<sup>[9]</sup>的方程(8)和(9)中已有列出。利用光行时解<sup>[2]</sup>,在太阳系质心天球参考系(BCRS)中<sup>[10]</sup>,由 EEP 推导出的红移偏差量  $\delta z$  为

$$\delta z \equiv \frac{\nu_R}{q\nu_E} \Big|_{S_1 \rightarrow P \rightarrow S_2} - \frac{\nu_R}{q\nu_E} \Big|_{S_1 \rightarrow P \rightarrow S_2}^{EEP} = \delta z_{LLI} + \delta z_{LPI} + O(\epsilon^3) \quad (2)$$

式中  $\delta z_{LLI}$  和  $\delta z_{LPI}$  分别是 LLI 和 LPI 被破坏这一情况导致的结果,它们的表达式如下

$$\delta z_{LLI} = \frac{1}{2} \epsilon^2 [\bar{\beta}_{S_2} v_{S_2}^2(t_R) - \bar{\beta}_{S_1} v_{S_1}^2(t_R)] \quad (3)$$

$$\delta z_{LPI} = \epsilon^2 \left\{ \sum_A \bar{\alpha}_{S_2}^A U_A [y_{S_2}(t_R)] - \sum_A \bar{\alpha}_{S_1}^A U_A [y_{S_1}(t_R)] \right\} \quad (4)$$

在此,对于 LLI 的破坏,可以用拟合无量纲参数  $\bar{\beta}_{S_1}$  和  $\bar{\beta}_{S_2}$  的方法来检验(分别与  $S_1$  和  $S_2$  相关)。如果 LLI 成立,那么  $\bar{\beta}_{S_{1/2}} = 0$ 。对于 LPI 原理被破坏的情况,可以用拟合无量纲参数  $\bar{\alpha}_{S_1}$  和  $\bar{\alpha}_{S_2}$  的方法来检验,这两个参数分别与物体 A 和两个观测站的引力场相关。如果 LPI 成立,那么有  $\bar{\alpha}_{S_{1/2}}^A = 0$ 。

在应用此多普勒观测模型之前,我们有必要对上述参数的可探测性进行研究。这里要强调的是,这些对于可探测性的讨论不是对于这些参数在统计上的估计。事实上,这些参数的统计估计将会由最小二乘法在第 3 节中给出。考虑到两个地面观测站,我们可以重新写出  $\delta z_{LLI}$  的表达式

$$\delta z_{LLI} = \frac{1}{2} \epsilon^2 [(\bar{\beta}_{S_2} - \bar{\beta}_{S_1}) v_{\oplus}^2 + 2v_{\oplus} \cdot (\bar{\beta}_{S_2} \mathbf{V}_{S_2} - \bar{\beta}_{S_1} \mathbf{V}_{S_1}) + \bar{\beta}_{S_2} V_{S_2}^2 - \bar{\beta}_{S_1} V_{S_1}^2] \quad (5)$$

其中: $v_{\oplus}$  是在 BCRS 下地球的速度;而  $\mathbf{V}_{S_1}$  和  $\mathbf{V}_{S_2}$  为相对地心参考系(GCRS)下两地面站的速度。如果我们假定: $\bar{\beta}_{S_1} = \bar{\beta}_{S_2} = \bar{\beta}$ ,  $\delta z_{LLI}$  的表达式可以简化为

$$\delta z_{LLI} = \frac{1}{2} \epsilon^2 \bar{\beta} (2v_{\oplus} + \mathbf{V}_{S_1} + \mathbf{V}_{S_2}) \cdot (\mathbf{V}_{S_2} - \mathbf{V}_{S_1}) \quad (6)$$

这表明,为了放大  $\bar{\beta}$  的可探测性,需要使用在 GCRS 下相对速度相差尽可能大的两个观测站。由  $|v_{\oplus}| \sim 3 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且  $|\mathbf{V}_{S_{1/2}}| \leq 4.5 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 我们可以估算

$$\bar{\beta} \sim c^2 \delta z_{LLI} [v_{\oplus} \cdot (\mathbf{V}_{S_2} - \mathbf{V}_{S_1})] \geq 6 \times 10^{-3} \left( \frac{\delta z_{LLI}}{10^{-12}} \right) \quad (7)$$

这意味着,若多普勒观测残差在  $10^{-12}$  的量级,  $\bar{\beta}$  可以被确定到  $10^{-3}$  的数量级。对于 LPI 原理被破坏的情况的可探测性,如果只考虑太阳引力场的单级展开,我们可以重新写出  $\delta z_{LPI}$  的表达式

$$\delta z_{LPI} = \epsilon^2 \left[ \bar{\alpha}_{S_2}^{\ominus} \frac{GM_{\odot}}{|y_{\odot} - y_{\oplus} - Y_{S_2}|} - \bar{\alpha}_{S_1}^{\ominus} \frac{GM_{\odot}}{|y_{\odot} - y_{\oplus} - Y_{S_1}|} \right] \quad (8)$$

其中: $y_{\odot}$  和  $y_{\oplus}$  为 BCRS 下太阳和地球的位置; $Y_{S_1}$  和  $Y_{S_2}$  是两观测站在 GCRS 下的位置。类似地,如果我们假定  $\bar{\alpha}_{S_1}^{\ominus} \sim \bar{\alpha}_{S_1}^{\oplus} \sim \bar{\alpha}$  并且带入  $|y_{\odot} - y_{\oplus}| \geq |Y_{S_{1/2}}|$  条件,  $\delta z_{LPI}$  可以简化如下

$$\delta z_{LPI} = \varepsilon^2 \bar{\alpha}^\odot \frac{GM_\odot}{|y_\odot - y_\oplus|^3} (y_\odot - y_\oplus) \times (Y_{S_2} - Y_{S_1}) + O(Y_{S_{1/2}}^2) \quad (9)$$

由  $|y_\odot - y_\oplus| \sim 1$  au 并且  $|Y_{S_2} - Y_{S_1}| \leq 2R_\oplus$  (其中  $R_\oplus$  为地球半径), 大概估算

$$\bar{\alpha}^\odot \sim \delta z_{LPI} \left( \frac{GM_\odot}{c^2 |y_\odot - y_\oplus|} \right)^{-1} \times \left[ \frac{(y_\odot - y_\oplus) \cdot (Y_{S_2} - Y_{S_1})}{|y_\odot - y_\oplus|^2} \right] \geq \frac{\delta z_{LPI}}{10^{-12}} \quad (10)$$

式(10)表明,即使多普勒数据残差在  $10^{-12}$  的量级上,参数  $\bar{\alpha}^\odot$  仍然无法被准确测量。

由方程(7)和方程(10)可知,在两个地面站参与的多普勒跟踪中,探测 LLI 原理被破坏情况的可能性远比 LPI 高出大约两个数量级。此外,在这种情况下,当且仅当  $\delta z$  测量的精度要远优于  $10^{-12}$  时,  $\bar{\alpha}^\odot$  才具有可观测的意义。在下面的工作中,将会分析 MEX 的三程多普勒跟踪数据的残差,并用这些残差初步估算这些被破坏现象的上限。

上述内容仅是关于这些参数探测能力的一小段讨论,不是稳健的统计估计。下文中,将使用最小二乘法来分析 MEX 三程多普勒跟踪的残差(见第 3 节),并利用这些残差初步的估计出原理被破坏所对应的上限(见第 4 节)。

## 2 在 LLI 以及 LPI 有破坏情况下的三程多普勒跟踪

在欧洲航天局(ESA)与中国的合作项目中,双方通过三程多普勒跟踪的方式跟踪观测 MEX。这次观测始于 2009 年 8 月 7 日 20:00(UTC),截止于 2009 年 8 月 8 日 08:04(UTC)。上行信号由 ESA 在澳大利亚新诺舍的上行站发射,下行信号被中国上海、昆明以及乌鲁木齐的下行站所接收。上行信号采用新诺舍站的氢钟作为频率标准,在 3~100 s 的时间内其稳定度为  $10^{-14}$ ;各下行站也采用氢钟作为频率标准,天稳定度在  $10^{-15}$  的水平。

这些观测数据由 MarsODP<sup>[11]</sup> 这个软件来进行处理,以得到 MEX 的轨道。这里提到的 MarsODP 程序是由中国的上海天文台的一个小组开发的,它可以处理多种数据,包括双程、三程的测距信息,单程、双程、三程的多普勒跟踪信息,VLBI 的数据以及其他的一些观测数据。由于这些上行和下行信号的频率位于 X 频段,等离子体的色散对该频段的影响只有对 S 频段影响的大约十分之一。虽然对于精

密的测量实验而言,色散效应是必须要仔细考虑的因素,但这里暂不考虑这一效应。原因是,对这些数据做定轨分析发现,其误差和 ESA 给出的结果相当,这表明等离子体色散并不是主要的误差源头。

首先,通过观测数据相对于标准模型的拟合,获得三程多普勒跟踪在 X 频段段产生的残差,这里的标准模型是建立在牛顿定律以及爱因斯坦广义相对论上的理论模型<sup>[11]</sup>,这些数据能够限定可能发生的 LLI 和 LPI 原理被破坏的现象的上限。但是,由于 LLI 以及 LPI 被破坏的结果与现象并没有被考虑到 MarsODP 的模型之中,在拟合过程中,参量  $\bar{\beta}_{S_{1/2}}$  和  $\bar{\alpha}_{S_{1/2}}^A$  也没有被确定。从这个意义而言,文章下一节中获得的结果,并不能被认为是一个真实的“约束”(只有通过重新分析这些数据,并使用已经包含了这些现象的软件,来从统计上解它们才是)。但是这些残差给出的结果已经达到了目前所能接受的上限,故称之为“初步的上限”<sup>[12]</sup>。

图 1 展示了用 MarsODP 处理之后 MEX 的三程多普勒跟踪数据。图表左侧为其残差  $\delta v$ ,而残差的统计直方图被标示在了图表右侧,图表中的数据由 3 个分别位于上海、昆明以及乌鲁木齐的观测站得到<sup>[13]</sup>,时间系统选择以 2009 年 8 月 7 日 00:00:00.000(UTC)作为计时零点。图中时间轴上的空隙,是因在 24 h 中部分时间缺少上行信号所致。这些残差平均约为  $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的量级,而标准差在约为  $3 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这说明残差  $\delta z$  约在  $10^{-12}$  的量级,这些观测的精度不足以去检测可能对于 LPI 原理的破坏(见第 2 节关于探测能力的讨论)。因此,在第 3 节中,将只关注于 LLI 被破坏的上限。

## 3 关于 LLI 的初步上限

通过使用加权最小二乘方法,分 2 种情况估计了 LLI 被破坏的初步上限。第 1 种情况,假定:  $\bar{\beta}_{S_1} = \bar{\beta}_{S_2} = \bar{\beta}$ ,并同时舍去了式中其他的无关参数。作为比较,同时考虑到了由太阳产生的额外贡献,也会对 LLI 产生破坏的可能。类似于 Krisher 研究中的一个特殊情况<sup>[8]</sup>,假设:  $\bar{\beta}_{S_1} = \bar{\beta}_{S_2} = \bar{\alpha}_{S_1}^\odot = \bar{\alpha}_{S_2}^\odot = \bar{\beta}$ 。

根据上海、昆明和乌鲁木齐的下行站获得的下行数据,其中关于  $\bar{\beta}$  的估计值分别为  $(-8.497 \pm 0.010) \times 10^{-2}$ 、 $(-1.450 \pm 0.004) \times 10^{-2}$  以及  $(-0.975 \pm 0.002) \times 10^{-2}$  (统计结果见表 1)。由于在地球质心天球参考系中,新诺舍站和乌鲁木齐站有着最大的速度差,相比其他站点,它们之间有着最高

的灵敏度,并由此可以获得关于  $\bar{\beta}$  最精细的上限,正如第 2 节中关于探测能力的讨论,对 LPI 的破坏中含有与太阳相关的贡献,这一项相比于它们对于

LLI 的破坏少了至少两个数量级,这使得  $\bar{\beta}'$  与  $\bar{\beta}$  非常接近(参见表 1)。

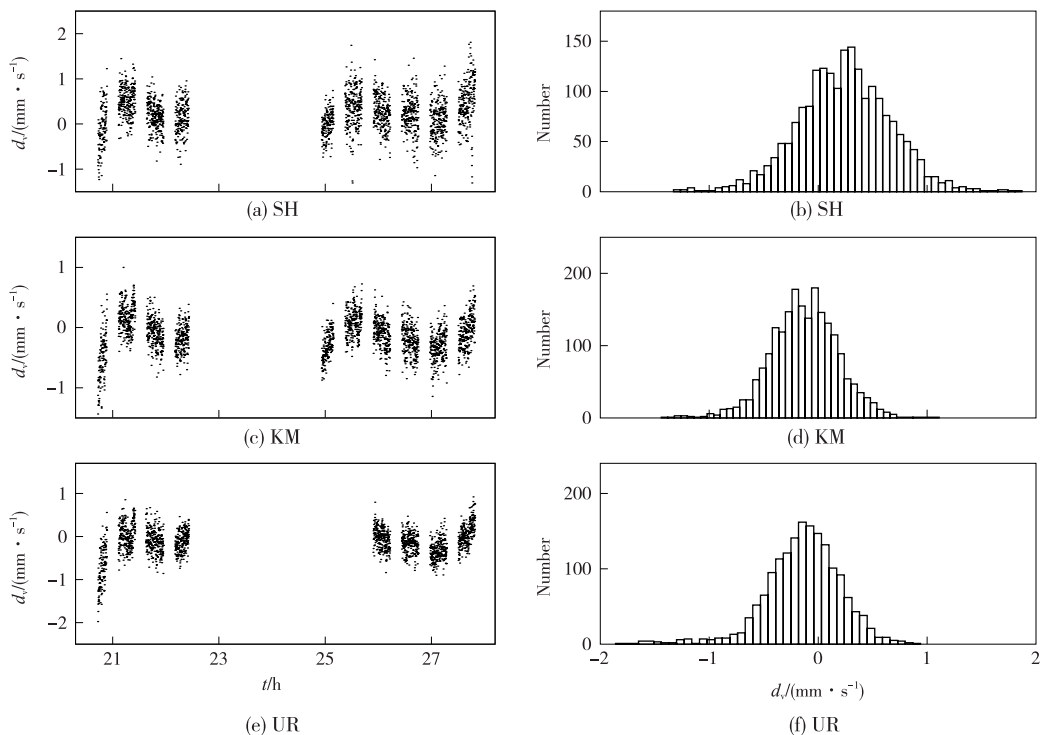


图 1 残差随测量时间变化图及相应统计直方图  
Fig. 1 The post-fit residuals  $\delta v$  and their statistical histograms

表 1 两种情况下最初上限的估计

Table 1 Summary of Preliminary Bounds on LLI for Case I and Case II

上行	下行	情况 1		情况 2	
		$\bar{\beta}(10^{-2})$	$\bar{\beta}'(10^{-2})$	$\bar{\beta}_U(10^{-2})$	$\bar{\beta}_D(10^{-2})$
NN	SH	$-8.497 \pm 0.010$	$-8.586 \pm 0.010$	$3.097 \pm 0.021$	$3.111 \pm 0.021$
NN	KM	$-1.450 \pm 0.004$	$-1.452 \pm 0.003$	$0.902 \pm 0.006$	$0.889 \pm 0.006$
NN	UR	$-0.975 \pm 0.002$	$-0.975 \pm 0.002$	$2.732 \pm 0.015$	$2.696 \pm 0.015$

注:NN——新诺舍站,SH——上海站,KM——昆明站,UR——乌鲁木齐站

第 2 种情况中,认为  $\bar{\beta}_{S_1}$  和  $\bar{\beta}_{S_2}$  是自由参量,对它们同时进行估算。在新诺舍作为上行站,上海站作为下行站的构型下, $\bar{\beta}_{NN}$  以及  $\bar{\beta}_{SH}$  都在 3% 的水平。如果昆明站、乌鲁木齐站分别作为下行站,则对应的值也可以被分别获得,也都处于约  $10^{-2}$  的量级(见表 1)。

### 4 总 结

研究根据前人提出的理论,分析了 MEX 的三程多普勒跟踪数据中产生的残差。在之前提出的这个理论中已经包含了可能对 LLI 以及 LPI 等原理被破坏情况的讨论。通过 1 个位于澳大利亚新诺舍属于 ESA 的上行站,以及 3 个位于上海、昆明及乌

鲁木齐的下行站,在 2009 年的 8 月 7 日—8 月 8 日完成了对多普勒观测数据的收集工作。利用这些观测数据,在约  $10^{-2}$  的量级上发现了 LLI 的初步上限。但是由于站点之间的相互位置以及观测站本身精度的限制,发现这些数据不适合对于 LPI 的检验。本研究发现:根据方程(10),若要在三程多普勒跟踪下给出 LPI 的上限,其观测误差需明显小于  $10^{-12}$  的量级。

### 参 考 文 献

[1] Thornton C L. 深空导航无线电跟踪测量技术[M]. 李海涛,译. 北京:清华大学出版社,2005. [Thornton C L. Deep space navigation radio tracking measurement technology[M]. Li H

- T, Transl. Beijing: Tsinghua university press, 2005.]
- [2] Moyer T D, Yuen J H. Formulation for observed and computed values of deep space network data types for navigation: jet propulsion laboratory, national aeronautics and space administration [M]. America: JPL Publication 00-7, 2000.
- [3] Koeipkin S, Efroimsky M, Kaplan G. Relativistic celestial mechanics of the solar system [M]. Berlin: Wiley-VCH, 2011.
- [4] Will C M. Theory and experiment in gravitational physics [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1993.
- [5] Will C M. The confrontation between general relativity and experiment [J]. Living Reviews in Relativity, 2006, 9(3): 5-100.
- [6] Krisher T P, Anderson J D, Campbell J K. Test of the gravitational redshift effect at Saturn [J]. Physical Review Letters, 1990, 64(12): 1322-1325.
- [7] Vessot R F C, Levine M W, Mattison E M, et al. Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser [J]. Physical Review Letters, 1980, 45(26): 2081-2084.
- [8] Krisher T P, Morabito D D, Anderson J D. The Galileo solar redshift experiment [J]. Physical Review Letters, 1993, 70(15): 2213-2216.
- [9] Deng X M, Xie Y. Spacecraft Doppler tracking with possible violations of LLI and LPI: a theoretical modeling [J]. Research in Astron. Astrophys, 2014, 14(3): 319-328.
- [10] Soffel M, Klioner S, Petit G, et al. The IAU 2000 resolutions for astrometry, celestial mechanics, and metrology in the relativistic framework: explanatory supplement [J]. AJ, 2003, 126(6): 2687-2706.
- [11] 黄勇, 胡小工, 曹建峰, 等. 上海天文台火星卫星定轨软件系统 [J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(6): 83-89. [Huang Y, Hu X G, Cao J F, et al. The Mars Satellite orbit determination software at shanghai astronomical observatory [J]. Journal of Spacecraft TT& C Technology, 2009, 28(6): 83-89.]
- [12] Iorio L. Constraining the preferred-frame  $\alpha_1, \alpha_2$  parameters from solar system planetary precessions [J]. International Journal of Modern Physics D, 2014, 23(1): 1450006.
- [13] 曹建峰, 黄勇, 胡小工, 等. 深空探测中的多普勒的建模与应用 [J]. 宇航学报, 2011, 32(7): 1583-1589. [Cao J F, Huang Y, Hu X G, et al. Modeling and application of Doppler data in deep space exploration [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(7): 1583-1589.]

作者简介:

谢懿(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 基本天文学。

通信地址: 江苏省南京市汉口路 22 号南京大学天文与空间科学学院(210093)

电话: (025) 89681230

E-mail: yixie@nju.edu.cn

## Spacecraft Doppler Tracking with Possible Violations of LLI and LPI: Preliminary Bounds on LLI from Mars Express

ZHANG Yufei<sup>1,2</sup>, LIU Jinghao<sup>1,2</sup>, HUANG Yong<sup>3</sup>, XIE Yi<sup>1,2</sup>

(1. Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Position Techniques, Shanghai 200030, China;

3. Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Three-way spacecraft Doppler tracking is currently widely used and it plays an important role in the control and navigation of deep space missions. Using the theory of three-way Doppler tracking, including possible violations of the local Lorentz invariance (LLI) and the local position invariance (LPI), we analyzed the post-fit residuals of three-way Doppler tracking data of Mars Express. These Doppler observations were carried out from August 7th to 8th in 2009, with an uplink station administered by the European Space Agency at New Norcia in Australia and three downlink stations at Shanghai, Kunming and Urumqi in China. We find that, although these observations impose preliminary bounds on LLI at the level of  $10^{-2}$ , they are not suitable for testing LPI because of the configuration of these stations and the accuracy of the observations. To our knowledge, this is one of the first attempts in China to apply radio science to the field of fundamental physics.

**Key words:** space vehicles; gravitation; Doppler tracking

[责任编辑:高莎]