

用于火星电离层探测的星—星无线电掩星技术^{*}

杜起飞[†] 孙越强 陶鹏 白伟华 赵华 胡雄 吴小成 李伟

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘要 火星和地球类似,周围束缚了不同密度的电离层.利用无线电掩星技术可以对火星电离层进行观测.星—地无线电掩星在探测精度和探测区域方面都受到一定的限制.中俄联合火星探测计划将于 2011 年 10 月一箭双星发射俄罗斯的 Phobos—Grunt 探测器和中国的萤火 1 号火星探测器.该计划将开展国际上首次火星电离层的星—星无线电掩星观测试验,重点是对星—地无线电掩星无法观测的正午和子夜区域的火星电离层进行探测.星—星无线电掩星观测试验采用双频工作模式,接收机灵敏度为-145dBm,相位测量精度优于 5% 周.在地面对接收机进行了动态模拟测试,测试得到的相位数据能很好地反演出火星电离层电子密度廓线.

关键词 空间物理学,电离层,掩星,火星,“萤火 1 号”火星探测器(YH-1)

Satellite-to-satellite radio occultation technology for martian ionosphere exploration

DU Qi-Fei[†] SUN Yue-Qiang TAO Peng BAI Wei-Hua ZHAO Hua
HU Xiong WU Xiao-Cheng LI Wei

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Like the Earth, Mars is surrounded by an ionosphere of different densities. This can be explored using radio occultation technology, but there are limitations in the precision and range of exploration. In October 2009, the Phobos-Grunt and Yinghuo-1 satellites will be launched as part of the joint Russian and Chinese Martian exploration project, and the first international satellite-to-satellite radio occultation experiment on the Martian ionosphere will be implemented. This will focus on the midday and midnight ionosphere which cannot be sounded by satellite-to-Earth radio occultation. Dual bands will be selected in the satellite-to-satellite experiment. The sensitivity of the radio occultation receiver is -145dBm, and the phase measurement error less than 5% of a cycle. The receiver has been tested with dynamic simulation on the ground, and from the data acquired it is found that the Martian ionosphere density profiles are inversed quite well.

Keywords space physics, ionosphere, occultation, Mars, YH-1 satellite

1 引言

火星是位于地球轨道外侧的第一颗行星,距地球的最近距离为 5670 多万公里,距太阳 1.5AU (AU 为天文单位).它和地球一样也自转,而且速度与地球几乎相等,自转一周为 24.6 小时,公转周期为 687 天.火星上有稀薄的大气,当大气的中性成分在太阳极紫外辐射或高能沉降电子的作用下产生电离,便形成了电离层.

早在上世纪 60,70 年代,美国的 Mariner 4(火星探测器)、前苏联的 Mars 4 和 Mars 5(火星探测器)在飞临火星时,星—地无线电掩星试验(即利用卫星与地面站之间的电波链路开展火星电离层掩星探测,如图 1 所示)就探测到了火星电离层的电子密

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号:2008AA12A206)资助项目
2009-07-24 收到初稿,2009-08-21 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: dqf@cssar.ac.cn

度分布^[1-3]. 此后,几乎所有的火星探测器都开展了电离层的星一地无线电掩星观测,在不同的时期,得到了不同的太阳天顶角位置所对应的火星电离层的电子密度分布,为研究电离层在不同的太阳活动时期的变化规律提供了依据. 利用星一地掩星方法进行火星电离层探测是目前最普遍的探测手段.

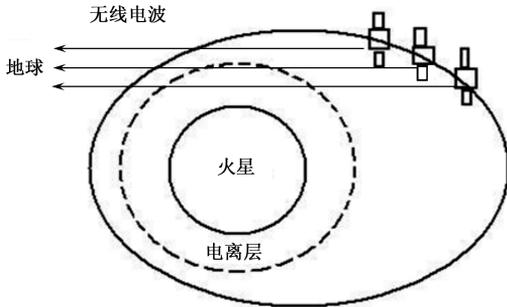


图1 星一地掩星探测示意图

火星电离层星一地掩星探测有两点局限:一是掩星试验受到行星际空间等离子体和地球电离层等等离子体扰动的影响,其探测精度受到限制. 如火星夜间电离层探测结果十分少,且精度低,难以满足研究的需要;二是掩星试验受到地球—火星—太阳运行的几何关系限制,只能探测太阳的天顶角为 42° — 138° 区域内的火星电离层. 星一地掩星不能对火星的正午和子夜上空电离层进行掩星探测,阻碍我们了解火星全球电离层数据.

“中国—俄罗斯联合火星探测计划”是中国国家航天局与俄罗斯联邦航天局之间的合作计划. 该计划将一箭双星发射俄罗斯的 Phobos—Grunt 探测器(福布斯探测器)和中国的萤火1号火星探测器. 两颗卫星入轨后,将开展国际上首次火星电离层的星—星无线电掩星观测试验(即利用两颗卫星之间的电波链路开展火星电离层掩星探测). 将重点对星—地无线电掩星试验无法观测的区域进行探测,有望填补正午和子夜上空火星电离层无线电掩星探测的空白.

2 探测原理

中俄联合星—星无线电掩星探测基本原理是,当两颗卫星到达一定的轨道位置后,福布斯探测器上掩星发射机发出无线电波,该无线电波穿过电离层,受到火星电离层折射作用,发生弯曲后到达萤火1号火星探测器上的掩星接收机,如图2所示. 掩星接收机记录下接收到的无线电波的载波相位,经数

据反演可以得到火星电离层的电子密度剖面.

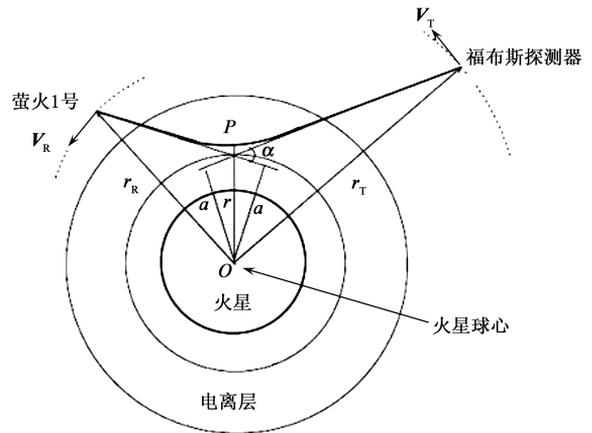


图2 火星电离层星—星掩星探测原理示意图(V_R 为萤火1号的运动速度, V_T 为福布斯探测器的运动速度, r_R 为火星球心到萤火1号的距离, r_T 为火星球心到福布斯探测器的距离, α 为弯曲角)

无线电掩星观测试验可以选用单频信号作为发射源,也可以选用双频信号作为发射源. 单频模式要求星上发射源时钟稳定度较高,以减小时钟抖动带来的误差. 双频模式可以消除时钟抖动误差,因此可适当降低对发射源时钟稳定度的要求. 中俄联合火星探测计划星—星无线电掩星探测采用双频方案.

电离层电子浓度总含量(TEC)又称电离层电子浓度柱含量、积分含量等. TEC的空间分布及时间变化,反映了电离层的主要特性. TEC可由给定频率的无线电波沿传播路径的电子密度积分^[4-8]得到:

$$TEC = \int_{\text{传播路径}} N_e(s) ds. \quad (1)$$

利用折射率可以计算沿传播路径的电子密度. 对于相位折射指数的一阶展开式,折射率可用下式求得:

$$n = 1 - \frac{C}{f^2} N_e, \quad (2)$$

其中 $C \approx 40.3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

可以根据电波相位延迟,导出电离层折射率,进而得到电离层电子密度剖面. 相位时延L可以通过积分信号路径的折射率得到:

$$L = \int_{\text{传播路径}} [1 - \frac{C}{f^2} N_e(s) ds]. \quad (3)$$

萤火1号火星探测器上的掩星接收机测量接收到的两个频率为 f_1 和 f_2 . 两个频率的相对相位延迟为

$$L_1 - L_2 = \int_{\text{传播路径}} \left[1 - \frac{C}{f_1^2} N_e(s) \right] ds - \int \left[1 - \frac{C}{f_2^2} N_e(s) \right] ds \quad (4)$$

$$= C \left[\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right] \int N_e(s) ds.$$

双频 $TEC_{1,2}$ 可由下式得到:

$$TEC_{1,2} = \frac{f_1^2 f_2^2}{C(f_1^2 - f_2^2)} (L_1 - L_2). \quad (5)$$

对 TEC 求导可以解算弯曲角 α 为

$$\alpha \approx \frac{C}{f^2} \frac{dTEC}{da}, \quad (6)$$

式中 a 是弯曲射线对应的碰撞高度, 即碰撞参数.

得到了掩星电波弯曲角 α 和碰撞参数 a 后, 可利用 Abel 变换公式计算电离层折射率:

$$n_i(a) = \exp\left(\frac{1}{\pi} \int_a^\infty \frac{\alpha(x) dx}{\sqrt{x^2 - a^2}}\right). \quad (7)$$

电子密度可由下式得到:

$$N_e(h) = \frac{f^2}{C} [1 - n(h)]. \quad (8)$$

3 仪器介绍

无线电波频率越低, 对电离层越敏感, 其相位超前越多, 探测精度越高. 结合考虑星载仪器体积重量等限制, 选择掩星试验双频工作频率为 $f_1 = 416.5 \text{ MHz}$, $f_2 = 833 \text{ MHz}$.

根据任务分工, 俄方负责无线电掩星发射机研制, 中方负责掩星接收机研制. 掩星发射机发射功率为 5 W , 天线增益大于 3 dB , 恒温晶振短期稳定度优于 $1 \times 10^{-12} / \text{s}$.

火星电离层不像地球那样有明显的 F, E 和 D 层, 火星电离层适合 Chapman 模型. 根据已有的火星电离层资料^[9,10], 采用单 Chapman 模型仿真计算得到, 萤火1号探测器和福布斯探测器之间星-星掩星在火星夜晚的斜路径的 TEC 约 0.65 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ 电子}/\text{m}^3$), 在火星白天的斜路径的 TEC 约为 22.5 TECU . 若掩星接收机载波相位测量精度为 5% 周, 则根据(5)式得到 TEC 的误差最大为 0.062 TECU , 可以满足探测要求.

掩星接收机灵敏度为 -145 dBm , 动态范围 50 dB , 载波相位测量精度优于 5% 周, 载波相位输出数据率为 20 Hz/s . 掩星接收机对天线接收到的双频信号做放大和下变频处理, 并进行载波跟踪提取. 提

取出来的载波信号在较窄的环路带宽下进行正交鉴相, 鉴相抵消掉由两颗卫星相对运动引起的多普勒频率变化, 输出由火星电离层引起的两个频率信号的相对相位延迟.

4 地面模拟测试及反演

在地面对星-星无线电掩星接收机进行了动态模拟测试. 它是根据两探测器运行轨道^[11] 和 Chapman 模型, 利用三维射线追踪法模拟产生火星白天和夜晚的上升及下降掩星事件的相位变化数据, 对星-星掩星接收机进行测试.

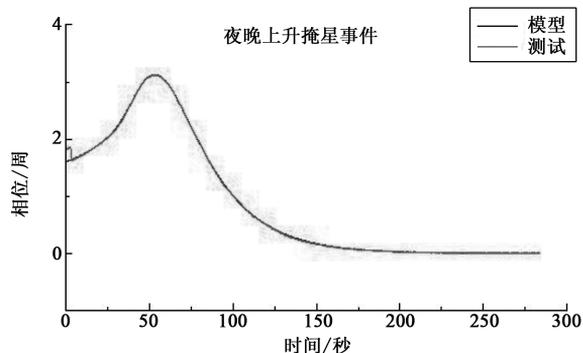


图3 模拟夜晚上升掩星事件的相位测试结果与仿真相位对比

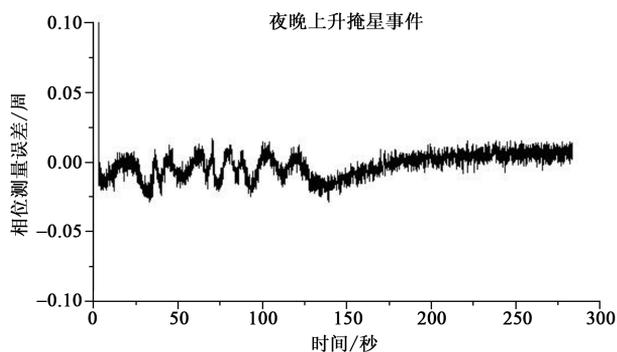


图4 模拟夜晚上升掩星事件的相位测量误差(标准差为 0.024 周)

模拟的夜晚上升掩星事件相位测试结果如图3所示, 相位测量误差为 0.024 周, 如图4所示.

根据测得的载波相位数据对火星电离层电子密度进行反演, 得到的曲线如图5和图6所示. 测试得到的相位数据能很好地反演出火星夜晚电离层电子密度廓线.

模拟的白天下降掩星事件相位测试结果如图7所示, 相位测量误差为 0.024 周, 如图8所示.

根据测得的载波相位数据对火星电离层电子密度进行反演, 得到的曲线如图9和图10所示. 测试

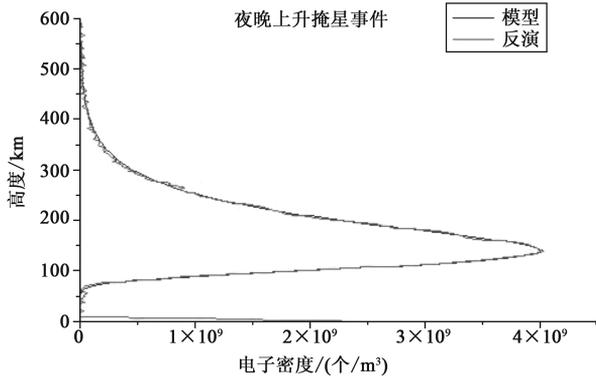


图5 反演得到电子剖面与模型数据对比

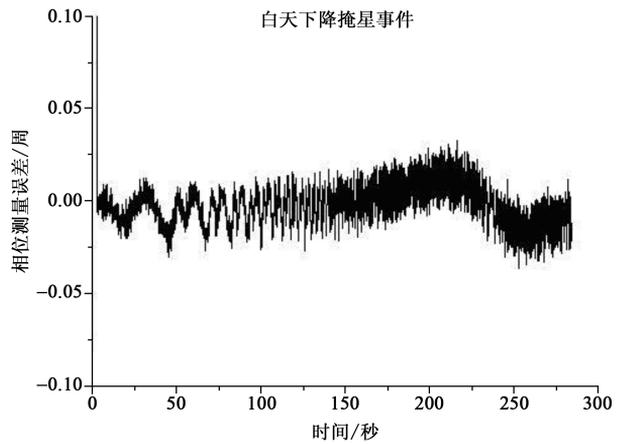


图8 相位测量误差(标准差为0.024周)

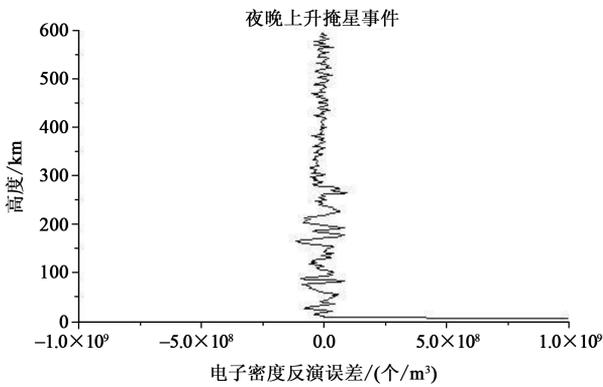


图6 电子密度反演误差

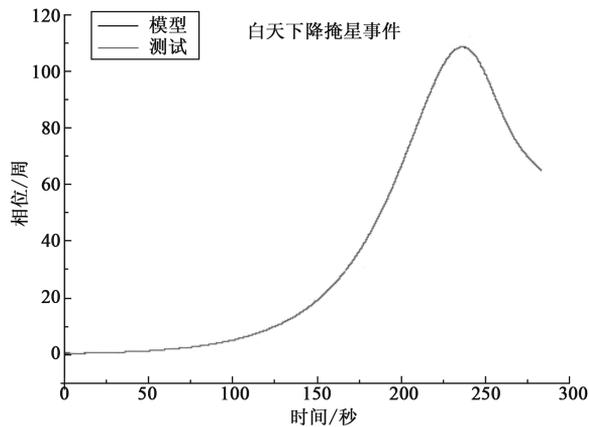


图7 相位测试结果与仿真相位对比

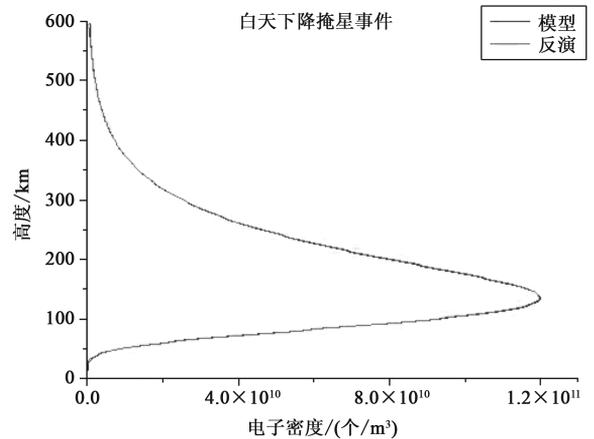


图9 反演得到电子剖面与模型数据对比

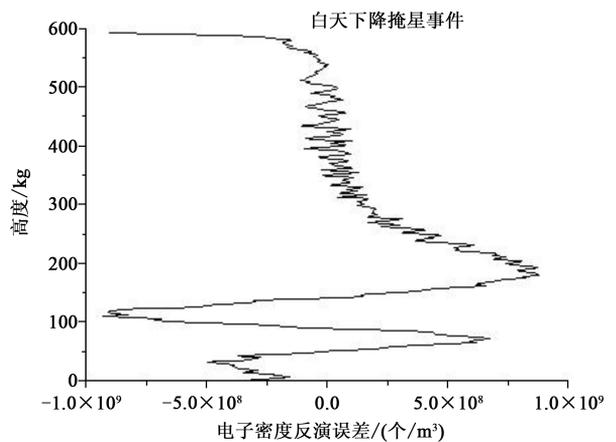


图10 电子密度反演误差

得到的相位数据能很好地反演出火星白天电离层电子密度廓线。

5 结束语

2011年10月,俄罗斯福布斯探测器和中国的“萤火1号”火星探测器将一同发射.利用俄罗斯福布斯探测器上发射的双频信号,中国和俄罗斯将联合开展火星电离层的星-星无线电掩星探测,反演火星电离层电子密度

分布,特别是对火星正午附近(太阳天顶角小于 42°)和子夜附近(太阳天顶角大于 138°)的电离层区域进行掩星探测,研究区域的特性及背阳面电离层的产生机制.

参 考 文 献

- [1] 平劲松,黄逸丹等. 深空探测研究,2007,5(2):18 [Ping J S, Huang Y D *et al.* Deep Space Exploration,2007,5(2):18 (in Chinese)]
- [2] 金亚秋,法文哲,徐丰. 空间科学学报,2008,28(3):264 [Jin Y Q, Fa W Z, Xu F. Chinese Journal of Space Science,2008,28(3):264 (in Chinese)]
- [3] 张素君,李磊等. 深空探测研究,2009,7(1):15 [Zhang S J, Li L *et al.* Deep Space Exploration,2009,7(1):15 (in Chinese)]
- [4] 周义炎,吴云等. 大地测量与地球动力学,2005,25(2):29 [Zhou Y Y, Wu Y *et al.* Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005,25(2):29 (in Chinese)]
- [5] 胡雄,曾桢等. 电波科学学报,2002,17(5):549 [Hu X, Zeng Z *et al.* Journal of Radio Science, 2002, 17 (5) : 549 (in Chinese)]

- [6] 郑军,王西京,丁文乐. 飞行器测控学报,2005,24(2):11 [Zheng J, Wang X J, Ding W L *et al.* Journal of Spacecraft TT&C Technology,2005,24(2):11 (in Chinese)]
- [7] Silvestrin P, Bagge R , Bonnedal M *et al.* Spaceborne GNSS Radio Occultation Instrumentation for Operational Applications. In :Proceedings of ION GPS 2000. Salt Lake City, Utah, September 19—22, 2000. 872—880
- [8] 曾桢,胡雄等. 地球物理学报,2004,47(4):578 [Zeng Z, Hu X *et al.* Chinese Journal of Geophysics,2004,47(4):578 (in Chinese)]
- [9] Kliore A, Dan L C, Gerald S L *et al.* Science,1965,149:1243
- [10] Kliore A, Gerald S L, Dan L C *et al.* Science,1967,158:1683
- [11] 吴燕. 航天器工程,2006,15(3):63 [Wu Y. Spacecraft Engineering, 2006,15(3):63 (in Chinese)]

• 书评和书讯 •

科学出版社物理类重点书推荐

书名	作(译)者	书名	作(译)者
高等量子力学	张永德	光学中的散斑现象——理论与应用(翻译)	Joseph W. Goodman
量子力学	张永德	非线性声学(第二版)	钱祖文
量子信息物理原理	张永德	现代热力学(英文版)	王季陶
陀螺力学(第二版)	刘延柱	等离子体动力学及其在太阳物理中的应用	黄光力
微分几何入门与广义相对论(下册)	梁灿彬、周彬	经典电动力学	曹昌祺
10000个科学难题物理卷	编委会	信息光学理论与计算	李俊昌、熊秉衡
铜氧化物高温超导电性实验与理论研究	韩汝珊	亚稳金属材料	胡壮麒
半导体自旋电子学	夏建白等	超快和纳米光学	张新平
结构相变物理(第二版)	Fujimoto, M	全息干涉计量—原理和方法	熊秉衡
实用量子力学	Flügge, S	量子统计力学(第二版)	张先蔚
经典力学新基础(第二版)	Hestenes, D	输运理论(第二版)	黄祖洽
相变和晶体对称性	Izyumov, Y. A	激光光散射谱学	张明生
普朗特流体力学基础(翻译)	H. 欧特尔等	拉曼光谱学与低维纳米半导体	张树霖
液晶物理学(影印)	P. G. de Gennes	路径积分与量子物理导引	侯伯元等
临界现象理论(影印)	J. J. Binney	技术磁学	钟文定
软凝聚态物质(影印)	Richard A. L. Jones	量子光学导论	谭维翰
量子力学原理(第四版)(影印)	P. A. M. Dirac	狭义相对论(第二版)	刘辽等
基本粒子物理学的规范理论(影印)	T. P. Cheng	凝聚态物理的格林函数理论	王怀玉
介观物理导论(第二版)(影印)	Y. Imry	超导、超流和凝聚体(注释版)	James F. A
纳米薄膜分析基础(影印)	T. L. Alford	现代经典光学(注释版)	Geoffrey Brooker
统计力学(第二版)(影印)	F. Schwabl	固体能带理论和电子性质(注释版)	Jone Singleton
磁性量子理论—材料的磁学性能(第三版)(影印)	R. M. White	原子物理学(注释版)	Christopher J. Foot
半导体物理电子学(第二版)(影印)	Sheng S. Li	固体的光学性质(注释版)	Mark Fox
碳纳米管——从基础到应用(影印)	A. Loiseau	凝聚态物质中的磁性(注释版)	Stephen Blundell

购书与咨询电子信箱: mlhukai@yahoo.com.cn