

星一地无线电掩星技术探测火星大气和电离层^{*}

张素君^{1,†} 平劲松¹ 洪振杰³ 韩婷婷^{1,2} 毛晓飞³

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 中国科学院研究生院 北京 100039)

(3 温州大学数学与信息科学学院 温州 325035)

摘要 历史上几乎所有的行星探测任务都开展了无线电掩星实验,以探测行星的大气、电离层、行星环以及磁场,并取得了很多重要的科学成果.掩星发生时刻前后,测量航天器发出的信号穿过行星电离层和大气层时被遮掩而引起的信号频率、相位、幅度或极化等物理特性的变化,通过某种反演技术,可以得到大气的折射率廓线,推出中性大气的密度、温度、压强廓线以及电离层的电子浓度廓线.文章围绕中国“萤火1号”火星探测器(YH-1)火星探测计划中将要开展的星一地无线电掩星实验,介绍了该技术用于探测火星大气和电离层的相关情况.

关键词 无线电掩星,火星大气,电离层,反演,“萤火1号”火星探测器(YH-1)

Detection of the martian atmosphere and ionosphere using spacecraft-earth radio occultation

Zhang Su-Jun^{1,†} Ping Jin-Song¹ Hong Zhen-Jie³ Han Ting-Ting^{1,2} Mao Xiao-Fei³

(1 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*)

(2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

(3 *College of Mathematics and Information Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China*)

Abstract Investigations of planetary atmospheres, ionospheres, rings, and magnetic fields using radio science techniques have been conducted by almost every planetary mission, and have acquired many significant scientific results. Changes in the frequency, phase, amplitude and polarization of spacecraft radio signals, caused by passage through a planet's atmosphere and ionosphere, have been observed in rising and descending planet occultation events. Utilizing an inversion method, we can obtain the refractivity profiles of the atmosphere, as well as the density, temperature and pressure profiles of the neutral atmosphere, and the electron density profile of the ionosphere. In the first Chinese YH-1 Mars mission, characteristics of the Martian atmosphere and ionosphere will be detected by a radio occultation experiment. The details are presented in this paper.

Keywords radio occultation, martian atmosphere, ionosphere, inversion, YH-1 Satellite

1 引言

行星无线电掩星技术是无线电科学的一个重要研究方向.无线电科学主要是利用航天器和地面天线之间的无线电链路进行科学实验.地面站和航天器上的通信单元是无线电科学实验的重要组成部分,此外,还要求航天器和地面跟踪站都配备高稳定的振荡器(ultra stable oscillator, USO).通过测量来自航天器的无线电信号的相位、振幅、极化特性的

^{*} 中俄火星联合探测计划“YH-1”项目;国家高技术研究发展计划(批准号:2007AA12A210;2008AA12A209)、国家自然科学基金(批准号:10973031)资助项目;中国科学院重要方向项目(批准号:KJXC2-YW-T13-2),中国科学院“天文地球动力学方向”百人计划资助项目

2009-07-15 收到初稿,2009-08-19 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: sjzhang@shao.ac.cn

变化,可以研究行星及其卫星的大气和电离层结构,研究行星的引力场、形状、质量和行星环,研究历表、太阳日冕、磁场、慧尾以及广义相对论范畴的引力波和引力红移^[1].

从20世纪60年代开始,国际上已经开始了太阳系内各大行星的探测.美国喷气推进实验室(jet propulsion laboratory, JPL)和Stanford大学的科学家在地震波反演地层结构技术的基础上,开拓了用无线电掩星技术研究行星大气和电离层的方法^[2].至今,美国宇航局(national aeronautics and space administration, NASA)已经进行了40多年的太阳系深空探测计划.早期的行星探测任务有Mariner, Pioneer, Viking号系列以及前苏联的一些探测计划,近期有Voyager, Ulysses, Giotto, Galileo, Magellan, Mars Global Surveyor (MGS), Cassini, Cassini-Huygens, Rosetta, Mars Express (MEX), Venus Express等任务,这些已经开展的行星探测任务大部分都取得了成功,得到了大量的关于行星大气和重力场的重要结果.

无线电掩星技术经历了一条行星—地球—行星的发展过程.由于无线电技术、通信等各方面技术限制,早期的大行星及其卫星的掩星观测实验还不能得到高精度的、全球覆盖的数据,这个问题在最近的MGS, MEX等新一代飞行器的实验中获得改善.20世纪80年代初,随着GPS(全球定位系统)星座的逐步完善以及计算机、通信技术等的发展,给科学家们提供了利用掩星技术来研究地球大气层结构的可能.一系列验证实验的成功和理论研究的成果以及GPS技术的发展,推动了GPS/MET计划的实施,它的良好实验结果拉开了GPS无线电掩星技术探测地球大气的序幕^[3,4].于1996年11月开始的MGS和2003年夏季开始的MEX火星探测计划,在无线电科学实验探测火星电离层和大气方面取得了巨大的成功.在2011年10月开始的中俄联合火星探测Phobos Grunt和YH-1计划中,我国将利用YH-1卫星和地面观测站开展星—地无线电掩星实验,本文主要介绍了这方面的相关情况.

2 行星无线电掩星技术的原理

从一个航天器中发出的无线电信号被一个行星(或它的一个卫星)所遮掩,然后再被地面接收站接收,以探测行星的外部大气,这是行星无线电掩星观测的基本原理.地面站通过测量无线电链路中的相

位和振幅变化,用某种反演方法计算下降和上升掩星事件中的大气折射率廓线,然后再推算出低层大气的分子数密度、温度、压强廓线和高层大气的电子数密度、等离子体温度廓线.如果是行星环掩星,可以得到行星周围环内的物质粒子大小分布的信息^[5].

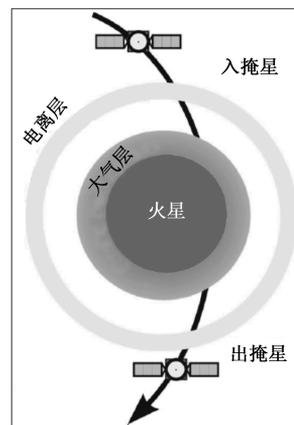


图1 从地球上利用双程链路探测大气层或电离层的示意图

掩星观测的基本原理如图1所示.下降掩星观测时对应双程或三程测量模式,双程链路信号穿过电离层上层到达行星表面,然后被行星遮掩.刚进入上升掩星观测时,由于火星大气的遮掩,卫星不能收到地面观测站发射的上行链路信号,只能由卫星上的晶体振荡器控制发射机产生下行链路信号,这种测量模式对应于单程测量模式,单程链路信号从行星表面穿过电离层上层和整个大气层,之后双程链路恢复通信^[6].

掩星技术首次在1965年水手4号飞过火星时付诸实施,探测到了火星大气的突变特征,证明了火星大气主要是由CO₂构成的,表面温度比地球的1%还要低^[7].图2给出了水手4号掩星实验得到的S波段折射率廓线^[5].其中廓线1—5是在遮掩前得到的,扣除非火星大气的影响部分后,可以看出偏差在0附近.廓线6表示入掩星时S波段探测到的火星大气折射率廓线,负折射率代表电离层,正的折射率代表中性大气.

火星大气以CO₂为主要成分,密度比地球小得多,偶尔有尘埃落入大气;火星具有弱的、空间分布零星的本征磁场,它能在太阳风与电离层之间产生直接作用,但它对太阳风的阻碍与地球不同^[8].从火星全球勘测者号(MGS)的掩星结果,火星大气的折射率廓线可以简单地描述为:地面的折射率大约比

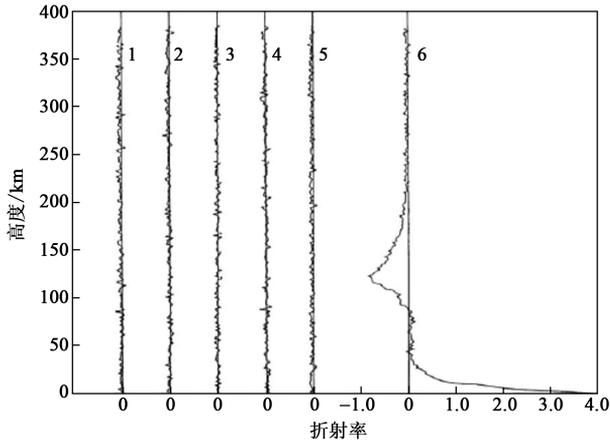


图2 水手4号火星掩星实验得到的S波段折射率廓线^[5](其中纵坐标的高度是相对于火星表面的高度,廓线1—5与横坐标的相交点的数字0表示掩星事件前(即廓线1—5)扣除非火星的影响部分后,折射率的偏差在0附近;廓线6为一个掩星事件期间对应的折射率廓线)

地球小2个量级,中性层与电离层的分界线为75km 势高(40—100km 之间可以认为是掩星观测火星电离层的不灵敏区域),电离层顶为220km 势高,电离层峰值为125km 势高(约130km 高度).火星大气的廓线见图3(a),典型的电离层廓线细节见图3(b)^[9].

图4(a)给出了火星白天典型中性大气密度廓线,但原子氧的结果是从离子密度测量中推出的.火星上200km 高度附近,原子氧成为主要的中性成分.图4(b)给出火星白天电离层离子密度直接测量的廓线和理论拟合结果^[10].

3 YH-1 无线电掩星实验

尽管 MGS, MEX 以及以往的火星探测计划取得了很大的成功,但由于火星掩星几何构型和探测器本身所在轨道的限制,迄今为止绝大多数的火星大气掩星观测都是在极轨上获得的,得到的中性大气和电离层物理参数廓线主要分布在纬度大于65度的高纬度地区和极地上空,不能完全覆盖火星全球,特别是正午和子夜区域.

在我国的 YH-1 火星探测计划中,将利用 X 波段下行单频无调制载波,在 YH-1 卫星被火星大气遮掩时,开展星—地和星—星掩星观测实验,并利用观测数据反演火星大气物理参数廓线. YH-1 的轨道近火星点 700—1000km,远火星点 74000—80000km,倾角 $0 \pm 5^\circ$,轨道周期为 76.8 小时.

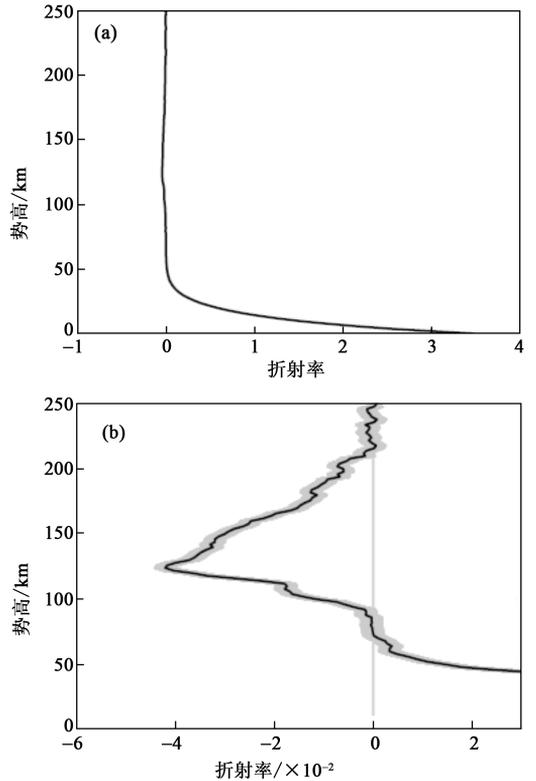


图3 (a)火星大气层廓线,分辨率为500m;(b)火星电离层廓线,阴影部分表示方差

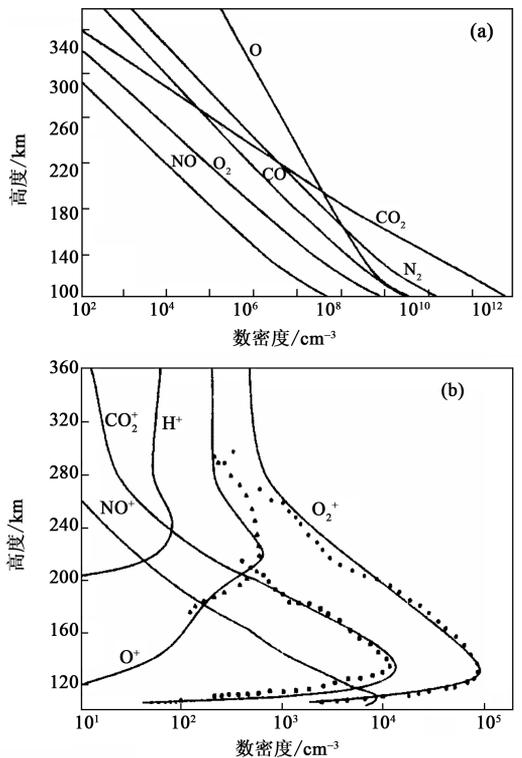


图4 (a)火星白天典型中性大气密度廓线;(b)火星白天电离层离子密度观测和理论廓线

利用地面多比特(multi-bit)高速数据采集系统,可以开展对火星大气的星一地无线电掩星观测.当 YH-1 和 Phobos Grunt 处于同一轨道面时,还可以进行星一星掩星观测.这两种观测模式可以获取低纬度地区的中性大气物理参数,星一星观测还可以探测到火星中午和子夜的时段区域,它们将有力地对火星大气进行全球一体化的补充研究.在反演算法中,如果采用非对称的模式,将有希望提高反演的精度^[11].

4 用于 YH-1 计划的开环多普勒测量

目前国际上对深空航天器的跟踪基本上依赖于多普勒和测距系统.在 YH-1 火星探测任务中,地面 VLBI 观测台站将利用 YH-1 高增益天线发射的 VLBI 信标进行单程多普勒和 VLBI 测量,来对该航天器进行定轨.

单程多普勒技术主要是通过测量探测器下行载波信号的频率来测定探测器的视向速度.该技术的关键是需要卫星上配备高稳定的振荡器,它是制约观测精度和数据质量的一个重要因素.

利用我国 VLBI 网的射电天线资源,分别在上海佘山站、乌鲁木齐南山站和云南昆明站安装了数据采集记录设备,可远程控制该设备对基带转换器输出的 4 路基带信号直接进行 A/D 采样,把 VLBI 原始电压信号记录到硬盘中,并通过 TCP-IP 协议传回到用户端,进行事后数据处理,最后提取出多普勒信息.

利用 ADLINK 公司生产的 NUDAQ PCI-9812/9810 高速数据采集板卡,通过适当改进,使其满足观测实验的要求.该板卡是基于 32 位总线的高性能数据采集卡,可连续不间断地进行高速数据采集,并将数据流送到计算机内存中,最大的采样速率可达到 20Mbps.数据接收、采集和处理流程如图 5 所示.

开环多普勒测量的目的是为 YH-1 探测器提供高精度的多普勒或相位观测,用于对 YH-1 探测器的定轨,同时作为行星无线电科学实验的前端数据获取部分,其观测的精度和质量将影响到掩星反演的结果.

5 星一地火星掩星观测资料处理系统

目前正在开发中的星一地火星掩星观测资料处

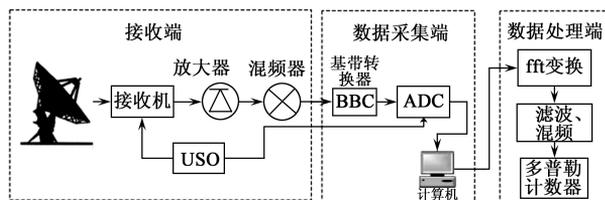


图 5 数据接收、采集、处理流程(图中 USO 为超稳晶体振荡器,BBC 为基带转换器,ADC 为模数转换器,fft 变换为快速傅里叶变换)

理系统的目标是,利用 YH-1 的单程多普勒观测测量反演,得到火星中性大气的密度、温度、压强廓线和电离层的电子密度廓线.作为我国在这一科学研究方面的首次尝试,在吸取国际上已有行星掩星实验的经验的基础上,自主开发了相应的观测设备和数据处理系统.

该系统总的设计模块包括:控制模块、观测资料整理模块、观测资料预处理模块、电离层反演模块和中性大气反演模块 5 个部分.总的系统流程如图 6 所示.

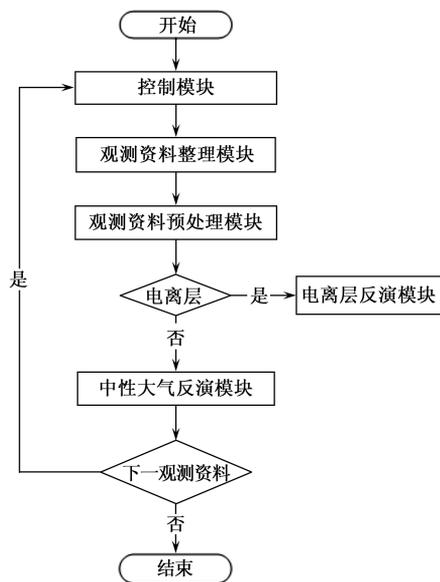


图 6 系统流程图

5.1 观测资料整理模块

观测资料整理模块是整个星一地火星掩星观测资料处理系统的重要部分.由于已知的飞行器、火星、地球历表以及观测资料的坐标和时间系统都不一致,故需要进行时间坐标系统的统一.然后求出信号传播时延,判定掩星时刻,确定掩星平面,建立掩星坐标系,得到地球和飞行器在掩星坐标系中的位置和速度矢量,同时也可以得到掩星点和太阳在火

固坐标系中的位置。

在该模块中,飞行器历表可由轨道仿真得到,实际任务中由定轨组提供,其时间和坐标系统分别是协调世界时(UTC)和火星瞬时平赤道坐标系;地球和火星历表可通过 DE405 或其他历表给出,其时间和坐标系统分别是太阳系质心动力学时(TDB)和太阳系质心坐标系;地面观测资料的时间系统为 UTC. TDB 和 UTC 时间系统的转换公式为^[12]

$$TDB = UTC + \Delta UTC + 32.184s, \quad (1)$$

其中 ΔUTC 为跳秒,目前的跳秒为34s。

可通过迭代的方法求出 t 时刻飞行器发出的无线电信号到达地球的传播时间 Δt 。根据 $t - \Delta t$ 时刻飞行器和火星的位置以及 t 时刻地球的位置,可建立掩星平面,以火星的中心为原点,地球到火星中心的方向为 Y 轴方向, Y 轴与掩星面法线方向叉乘得到 X 方向,从而建立掩星坐标系。

星一地火星掩星观测资料处理系统涉及的坐标系统如表1所示。根据IAU定义的火星北极指向和IAU向量,可以求出各坐标系的各轴的指向^[13,14]。IAU在历元火心天球平赤道坐标系(EME2000)中定义的火星瞬时平自转轴,即火星瞬时平赤道坐标系和火固坐标系的 Z 轴指向,IAU向量是由瞬时火星平赤道面与J2000地球平赤道面叉乘得到的,可以得到它跟火星平春分点及火星本初子午线的关系。根据这些已知条件,可以进行各坐标系间的转换。

表1 星一地火星掩星观测资料处理系统的坐标系统

坐标系	原点	参考平面	X轴指向
火星瞬时平赤道坐标系	火星质心	瞬时火星平赤道面	火星平春分点
火固坐标系	火星质心	瞬时火星平赤道面	参考平面与火星本初子午线的交线
历元火心天球平赤道坐标系(EME2000)	火星质心	平行于J2000地球平赤道面	J2000地球平春分点
太阳系质心天球坐标系	太阳系质心	J2000地球平赤道面	J2000地球平春分点

5.2 观测资料预处理模块

在星一地火星掩星观测资料处理系统中,有两类多普勒改正:牛顿多普勒改正和大气多普勒改正。牛顿多普勒改正包括地心与飞行器之间相对运动引起的多普勒改正以及测站相对于地心运动引起的多普勒改正。地心与飞行器之间的相对运动是地球与火星的相对运动和飞行器与火星的相对运动的综

合。大气多普勒改正包括地球大气多普勒改正和火星大气多普勒改正。由于地球自转引起了观测目标天顶距的变化,进而产生映射函数的相对变化,即地球大气多普勒效应。该项改正分别考虑了地球电离层多普勒改正和地球中性大气多普勒改正。

我们的目的是扣除火星大气多普勒改正之外的其他多普勒改正,得到只有火星大气部分引起的信号多普勒变化。然后进行观测资料的组合,区分单双频观测,按照某种平滑方案进行分段观测资料的平滑。最后按照观测资料的高度进行电离层和中性层的划分,中性层考虑为0—40km势高范围,电离层考虑为100—220km势高范围;40—100km势高范围被认为是掩星观测火星电离层的不灵敏区域,软件中对此高度范围观测资料暂不做处理。具体的多普勒改正公式和方法可参阅相关文献。

5.3 电离层反演模块

首先修正火星扁率,建立偏心坐标系。在偏心坐标系中,建立观测方程和Bouquer公式。掩星事件的几何构型如图7所示^[15]。

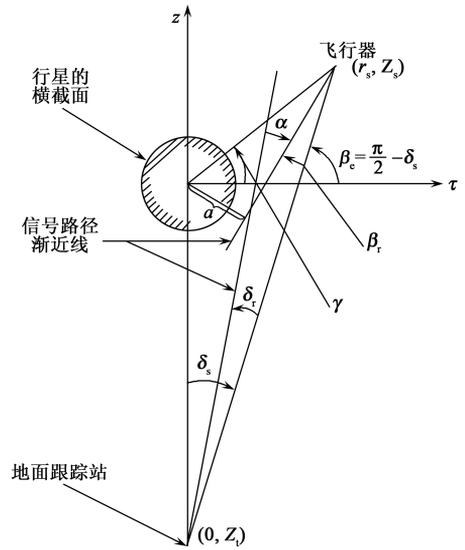


图7 掩星事件的几何构型图

可按照以下两条途径((1)和(2))进行电离层反演:

(1)观测资料为单频的相位或多普勒。如果是相位,则转换为多普勒,按照下面的(a),(b),(c)所述,得到电子密度 n_e 。

(a)如果假设地球上测站的位置是无穷远,则有 $\delta_s = 0, \delta_r = 0$ 和 $\beta_e = \pi/2$ (见图7),观测方程为

$$\Delta f = \left(-f_s \frac{v_{rs}}{c} \sin\beta_r - f_s \frac{v_{zs}}{c} \cos\beta_r + f_s \frac{v_{zs}}{c} \right), \quad (2)$$

式中 f_s 是飞行器发射的无线电波频率, c 是真空中

的光速, v_{rs}, v_{zs} 分别是飞行器径向(相对行星质心)和 z 方向的速度.

Bouquer 公式为

$$a = \sqrt{(r_s^2 + z_s^2)^2 \cos(\gamma + \beta_r)}, \quad (3)$$

通过迭代可以求出弯曲角序列 $\alpha(a)$:

$$\alpha(a) = \beta_r(a). \quad (4)$$

(b) 利用 Abel 变换, 可以获得用碰撞参数 a 表示的折射率序列 N . 从弯曲角序列 $\alpha(a)$, 利用 Abel 变换:

$$n(r_1) = \exp\left(\frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - a_1^2}} da\right), \quad (5)$$

可以获得折射指数廓线, 式中 $a_1 = r_1 n(r_1)$ 是切点半径为 r_1 的信号路径曲线的碰撞参数, 折射率 $N = 10^6 \times (n-1)$;

(c) 电离层的电子密度和折射率的关系可近似写成:

$$N = -\kappa_e n_e, \quad (6)$$

其中 n_e 是电子密度, $\kappa_e \approx \frac{r_e \lambda_{RS}^2}{2\pi}$ 是与掩星信号传播相关的常参数, 其中 λ_{RS} 是传输的无线电波波长(cm), $r_e = 2.819 \times 10^{-15}$ 是经典 Compton 电子半径.

(2) 如果观测资料是双频相位, 按照下面的(a)和(b)的介绍, 可以得到电离层的电子密度 n_e .

(a) 总电子含量 T_e (/m³) 与相位延迟的关系可以写成^[4]:

$$T_e = \frac{-f_1^2 \Delta \rho_1}{40.3} = \frac{-f_2^2 \Delta \rho_2}{40.3} = \frac{(\Delta \rho_1 - \Delta \rho_2) f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)}, \quad (7)$$

其中 $\Delta \rho$ 为信号的相位延迟, $\Delta \rho_1 - \Delta \rho_2$ 为两个波段信号的相位延迟组合. 掩星时段内, 用于总电子含量反演计算的飞行器轨道可采用轨道预报作为初始值, 内插得到与相位资料一致的轨道信息.

(b) 如同弯曲角的 Abel 变换, 也要对总电子含量的 Abel 变换使用球对称假设. 总电子含量和电子密度的关系可以写成如下积分形式:

$$T_e(r_0) = \int_{r_0}^{r_s/c} \frac{m_e(r)}{\sqrt{r^2 - r_0^2}} dr. \quad (8)$$

上述积分是直接对中心距进行的, 并没有引入碰撞参数. 由 Abel 变换可得电子密度 n_e :

$$n_e(r) = \frac{-1}{\pi} \int_{r_0}^{r_s/c} \frac{dT_e(r_0) dr_0}{\sqrt{r_0^2 - r^2}} dr_0. \quad (9)$$

5.4 中性大气反演模块

中性大气的反演对单双频观测资料的处理稍有不同. 具体的方法如下:

(1) 观测资料为单频的相位或多普勒. 如果是相位, 则转换为多普勒, 按照下面(a)~(e)所述, 可得到中性大气的密度、压强、温度廓线.

(a) 同电离层反演途径(1)中的(a), 根据观测方程和 Bouquer 公式, 得到弯曲角序列.

(b) 同电离层反演途径(1)中的(b), 从弯曲角序列 $\alpha(a)$ 得到折射率序列.

(c) 中性层的分子数密度和折射率的关系可以近似写成:

$$N = \kappa_n n_n, \quad (10)$$

其中 $\kappa_n \equiv \sum_i f_i \kappa_i$, f_i 是第 i 种成分的数比率(百分比), κ_i 是相应的分子折射体积. 根据 Viking 登陆舱的实验结果, $\kappa_n \approx 1.804 \times 10^{-29} \text{ m}^3$ 是火星的平均分子折射体积; n_n 是中性分子数密度.

(d) 中性层气压廓线可以从流体静力学方程

$$\frac{\partial p}{\partial r} = n_n \bar{m} g_{\text{Mars}} \quad (11)$$

得到, 其中 $\bar{m} = 7.221 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 是火星大气平均分子质量, $g_{\text{Mars}} = 3.7 \text{ m/s}^2$ 是火星表面重力加速度. 从上式得到中心距 r 处的气压

$$p(r) = n_{n0} k T_0 + \bar{m} \int_r^{r_0} n_n(r') g(r') dr', \quad (12)$$

其中 $k = 1.380662 \times 10^{-16} \times 10^{-7} \text{ J/K}$ 是 Boltzmann 常数. 气压廓线的上限 r_0 取决于热噪声水平, 在此高度上, 热噪声超过了大气 Doppler 的信号强度, 并且密度是已知的. 作为边界条件, 温度 T_0 可以来自模型值.

(e) 中性层温度廓线可由理想气体状态方程得到:

$$T = p / (n_n k). \quad (13)$$

(2) 观测资料为双频的相位或多普勒, 首先按照电离层反演途径(1)中的(a)分别得到两个频点的弯曲角序列, 然后进行双频弯曲角组合, 消除火星电离层的影响, 然后按照中性大气反演方法(1)中的(b)~(e)得到中性层的密度、压强、温度廓线.

6 结束语

本文主要介绍了用于 YH-1 火星探测任务的星一地掩星观测资料处理系统的最新研究进展, 介绍

了该处理系统的基本原理、数学实现和阶段性成果。利用行星数据系统(Planetary data system, PDS)公布的 MGS 无线电科学数据^[16], 对反演得到的火星电离层电子密度廓线数据进行了统计分析, 对火星电离层的分层结构和物理特性有了一定的了解。另外, 利用 PDS 公布的 MEX MaRS 2 级无线电科学数据和由 SPICE kernel 得到的 MEX 轨道数据, 验证了掩星面建立和各项多普勒改正的正确性。目前已经基本完成了系统大部分代码的编写, 下一步将利用 MEX 的残余多普勒观测量来反演火星中性大气和电离层的各种物理参数廓线, 以验证系统其他各方面的正确性和可靠性, 该方面的结果将在下一步的工作中给出。

参考文献

[1] Asmar S W, Renzetti N A. The Deep Space Network as an Instrument for Radio Science Research. Pasadena Calif.: JPL Pub., 1993. 80—93
 [2] Fjeldbo G, Eshleman V R. J. Geophys. Res., 1965, 70(13): 3217
 [3] 郭鹏. 无线电掩星技术与 CHAMP 掩星资料反演. 中国科学院上海天文台博士学位论文. 上海, 2005. 4—5 [Guo P. GPS Radio Occultation Technique and CHAMP Occultation Data Retrieval. Ph. D. Dissertation of Shanghai Astronomical Observatory of Chinese Academy of Sciences. Shanghai, 2005. 4—5 (in Chinese)]

[4] 严豪健, 符养, 洪振杰等. 天基 GPS 气象学与反演技术. 北京: 中国科学技术出版社, 2007. 26 [Yan H J, Fu Y, Hong Z J et al. Space Based GPS Meteorology and Inversion Technique. Beijing: Science and Technology of China Press, 2007. 26 (in Chinese)]
 [5] Fjeldbo G, Eshleman V R. Planet. Space. Sci., 1968, 16:1035
 [6] Pätzold M. <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fojectid=31033&fbodylongid=660>
 [7] Kliore A J, Cain D L, Levy G S et al. Science, 1965, 149: 1243
 [8] Nielsen E. Space Sci. Rev., 2004, 111(1): 245
 [9] Cahoy K L, Hinson D P, Tyler G L. J. Geophys. Res., 2006, 111: E05003, doi:10.1029/2005JE002634
 [10] Schunk R W, Nagy A F. Ionosphere: Physics, Plasma physics, and Chemistry. London: Cambridge University Press, 2000
 [11] Hinson D P, Simpson R A, Twicken J D et al. J. Geophys. Res., 1999, 104(26): 26997
 [12] Allen C W. Astrophysical Quantities, (4th Ed). London: The Athlone Press, 1999. 13—22
 [13] Burkhart P D. MSL Update to Mars Coordinate Frame Definitions, JPL Interoffice Memorandum, 2006. 1—19
 [14] Seidelmann P K, Archinal B A, A'hearn M F et al., Celestial Mech Dyn Astr., 2007, 98:157
 [15] Fjeldbo G, Kliore A J, Eshleman V R. Astrophys. J., 1971, 76: 123
 [16] <http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mep/index.htm>



北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

www.goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标, 备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校, 科研机构, 试验室随时选用, 我公司同时可为您的应用提供技术咨询. 我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料, 如硒化锌, 硫化锌, 多光谱硫化锌等。



- 光学透镜: 平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等。
- 光学棱镜: 各种规格直角棱镜, 及其他常用棱镜。
- 光学反射镜: 各种尺寸规格的镀铝, 镀银, 镀金, 及介质反射镜. 直径 5mm—200mm.
- 光学窗口: 各种尺寸规格, 材料的光学平面窗口, 平晶. 直径 5mm—200mm.
- 紫外石英光纤: 进口紫外石英光纤, SMA 接口光纤探头, 紫外石英聚焦探头。
- 国产滤光片: 规格为直径 5mm—200mm, (紫外, 可见, 红外) 及窄带干涉滤片。
- 进口光学滤光片: 长波通滤光片/短波通滤光片: 波长: 400—1000nm; 窄带干涉滤光片

地址: 北京市海淀区知春路 49 号希格玛大厦 B 座 #306 室 电话: 010—88096218/88096217 传真: 010—88096216

网址: www.goldway.com.cn E-mail: kevinchen@goldway.com.cn, shinan@goldway.com.cn, zengan@goldway.com.cn

联系人: 陈镔先生, 施楠小姐, 曾安小姐, 郑海龙先生