

临近空间星光掩星技术的初步应用

孙明晨^{1,2}, 涂翠^{1,2}, 胡雄¹, 宫晓艳¹, 郭文杰¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 大气星光掩星技术可以探测获得行星大气多种痕量成分密度等信息, 该技术基于大气光谱透过率来进行探测。根据星光掩星探测原理建立了掩星工作模型, 初步分析了气体分子光谱吸收特征, 获得了多种大气成分的透过率, 利用大气透过率反演得到了大气成分密度, 并与大气模式 MSISE-00 结果进行比较验证。进一步对光谱的信噪比和相对误差进行了估计, 并讨论了恒星的不同视星等对探测信噪比和相对误差的影响, 由此给出目标星视星等的范围。初步结果表明: 利用视星等在 -1.45~3.55 范围内的目标星作为光源进行探测, 信噪比在 100 以上, 且测量的相对误差最小可达到 1%。以上结果为地球临近空间高度上星光掩星探测的开展提供了初步的理论指导。

关键词: 星光掩星; 信噪比; 目标星

中图分类号: P356 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0909001

Preliminary application of stellar occultation in the near-space

Sun Mingchen^{1,2}, Tu Cui^{1,2}, Hu Xiong¹, Gong Xiaoyan¹, Guo Wenjie¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Atmospheric stellar occultation technology can detect information about the density of various trace components and atmospheric temperature and so on in the planetary atmosphere. The above parameters were obtained by using the atmospheric transmittance. An occultation model was established based on the principle of stellar occultation. The spectral absorption characteristics of gas molecules were analyzed, and then transmittance of various atmospheric components were obtained through simulating how it worked by model. The atmospheric component density was obtained by inversion of atmospheric transmittance and this model was verified through the comparison of MSISE-00. The results of the two were in good agreement. Furthermore, the signal-to-noise ratio and relative error of the spectrum were estimated, and signal-to-noise ratio and relative error about different stars were discussed, and then the range of magnitude of the target stars was given. The preliminary results show that the target stars in the range of -1.45~3.55 is used as the light source for detection, the signal-to-noise ratio is above 100, and the relative error of measurement is as low as 1%. The results of this paper provide preliminary theoretical guidance for the development of stellar occultation detection in the near-space of the Earth and other planetary.

Key words: stellar occultation; signal to noise ratio; target stars

收稿日期: 2019-05-05; 修订日期: 2019-06-03

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA17010303); 国家重点研发计划“天地联合多时空尺度近地空间环境监测”课题(2016YFB0501503); 中国科学院“十三五”信息化建设专项(XXH13505-04-03)

作者简介: 孙明晨(1993-), 女, 博士生, 主要从事空间物理学专业方面的研究。Email: sunmingchen16@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 胡雄(1967-), 男, 研究员, 博士, 主要从事中高层大气与电离层探测及研究方面的研究。Email: xhu@nssc.ac.cn

0 引言

星光掩星技术是利用光谱吸收特征进行行星中高层大气探测的有效手段,可探测获得大气密度、温度等行星大气参数。该技术具有全球覆盖、全天候、每天可探测大量大气剖面数据等优势。探测参量主要有大气痕量成分密度、温度、气溶胶等,星光掩星探测技术对于研究气候变化、臭氧层空洞,预测其动态变化等具有不可替代的潜在优势。

星光掩星技术的研究历史可追溯到 20 世纪 60 年代,NASA/ESA 等已经利用该技术成功探测地球以及其他行星大气。1968 年,NASA 发射 OAO-2,并利用该技术获得了地球低热层和中间层上层的分子氧和臭氧的夜间分布,证明了该技术的可行性^[1],此后该技术迎来广泛的应用前景。1972 年,NASA 发射的 OAO-3 和 MSX 分别对地球赤道地区和北极极涡地区进行了探测^[2-5];2002 年,ESA 发射 ENVISAT 卫星,对地球大气平流层和对流层进行探测^[6-7];2018 年,美国发射 SES-14(商业通信卫星),搭载的边缘与盘面全球尺度观测(GOLD)载荷,用于测量地球电离层的密度和温度,旨在回答磁暴如何改变地球大气的温度和成分等一系列天气环境问题(gold.cs.ucf.edu)。旅行者二号(NASA)、MEX(ESA)和 MAVEN 卫星(NASA)、VEX(ESA)卫星分别探测了木星大气、火星大气和金星大气^[8-11]。此外,星光掩星技术还将用于土星等行星大气的研究。在这个发展的过程中,该技术也实现了从最开始只能进行单谱线测量到现在的多谱段、多成分测量的过渡。

国内研究人员利用国外的星光掩星数据对地球的平流层和对流层臭氧和二氧化氮特性进行了研究^[12-14],关于星光掩星相关的设备仪器研制未见报道。

为促进地球中高层大气探测和研究,自主发展探测大气成分、温度和密度的星光掩星探测技术,文中利用星光掩星原理,结合仪器参数,初步分析具体大气成分的星光掩星吸收光谱特征、观测信噪比、测量精度、垂直分辨率和光谱分辨率等,讨论不同视星等恒星对信噪比和探测精度的影响,为进一步研发星光掩星技术奠定科学理论基础。

1 星光掩星原理

星光掩星技术的基本原理^[15]是在卫星轨道上利

用探测器跟踪接收恒星进入(或出来)地球大气层遮掩区域的过程,通过分析大气成分对星光光谱的吸收变化特征,获得大气成分含量垂直剖面的技术,如图 1 所示。这里假设星光以射线传播,定义恒星至卫星的连线到地球表面的最近距离为切点高度(或碰

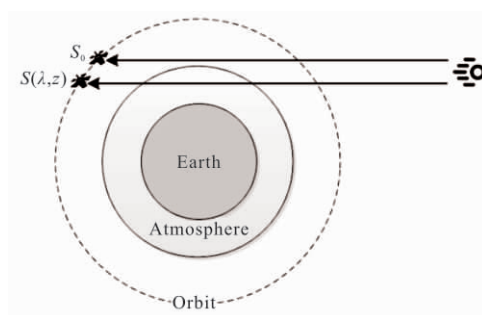


图 1 星光掩星模型

Fig.1 Model of stellar occultation

撞高度)。大气对某大气成分光谱线的作用主要包括:折射、散射和吸收。当光线切点高度较高时,如 40 km,一般可忽略大气的折射作用;当光线切点高度超过大气吸收成分含量的最高高度时,探测器可测得无大气吸收作用的恒星光谱 $S_0(\lambda)$,在该高度之间测量的大气吸收特征星光光谱为 $S(\lambda, z)$ 。由 Beer-Lambert 定律,大气吸收光谱的透过率为:

$$T = S(\lambda, z) / S_0(\lambda) = \exp[-\sigma_\lambda N(z)] \exp[-\sigma_s n a(z)] \quad (1)$$

式中: z 为切点高度; $\sigma(\lambda)$ 为某大气成分的吸收截面,与波长有关; $N(z)$ 为沿射线方向的某大气成分积分密度, $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2}$; σ_s 为瑞利散射界面; $n a(z)$ 为沿射线大气密度。假设在分子吸收线附近只有大气散射作用的光谱线,忽略其光谱流量的细微差别,则其透过率为:

$$T' = S' / S_0 = \exp[-\sigma_s n a(z)] \quad (2)$$

利用公式(2)可消除公式(1)中的散射项:

$$T / T' = \exp[-\sigma_\lambda N(z)] = S / S' \quad (3)$$

可得沿视线方向密度为:

$$N(z) = -\frac{1}{\sigma_\lambda} \ln \frac{T}{T'} \quad (4)$$

在一次星光掩星事件中,得到的沿视线方向密度 $N(z)$ 是不同高度积分所得,通过洋葱剥除法^[16]公式(5),可以得成分局部密度的垂直分布 $n(z) (\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3})$

$$N(z) = \int_l n(z(s)) ds \quad (5)$$

在观测过程中,由于轨道的一半被太阳照亮,因

此探测器需背对太阳光观测，此时只受到散射太阳光的影响。在保证恒星成像在狭缝中央时，太阳散射光以及其他背景光作为杂散光成像在 CCD 上下两侧，根据指数插值来估计其太小，再利用 CCD 中心光源信号减去估计值，即得到恒星光源的值。

2 星光掩星大气吸收光谱特征初步仿真

大气中臭氧是主要的温室气体，任何水平的浓度变化将导致气候变化；二氧化氮和三氧化氮参与臭氧的催化循环反应，与臭氧层变化密切相关；氧气是大气中的恒定气体，当空气处于流体静力学平衡状态时，其标高与温度有关，因此可以根据探测氧气分子的密度得出大气温度、大气密度等环境信息。利用星光掩星技术对这些大气成分进行探测，对于中高层大气的科学研究具有重要的意义。

为研究以上四种气体成分的探测信噪比和探测精度，开展了仿真分析研究，仿真方法是利用图 1 的仿真模型，计算大气透过率，再结合仪器参数估计实际探测的信噪比和相对误差。初步计算图 1 中星光穿过大气层达到卫星上探测器前的大气成分吸收光谱特征，选定上述四种成分的吸收谱线(如表 1 所示)^[16]。设卫星轨道高度为 700 km，圆周轨道，速度为 7.5 km/s。星星-卫星光线的切点高度位于 40~90 km 高度之间，切点高度变化间隔设置为 1 km。

采用 MODTRAN4.0^[17]计算大气透过率，其分辨率可达到 2 cm^{-1} 。其中，MODTRAN 是目前应用最广泛的中分辨率大气透过率计算软件，它是在低分辨率 LOWTRAN 基础上发展的，包括六种大气模式，可计算高达 100 km 的大气透过率，文中选择中纬度夏季模式计算。Sirius 天狼星是肉眼可见的视星等最亮的恒星，将这颗恒星作为掩星光源来进行仿真，其光谱通过哈勃望远镜获取(<ftp://simbad.u-strasbg.fr>)。为了解所测成分的大致廓线，图 2 给出在中纬度夏季模式下三种大气成分的柱密度，需要说明的是，MODTRAN 作为中分辨率计算模式，只给出其中三种成分的柱密度，且每隔 5~10 km 给出一个柱密度值；图 3 给出了大气透过率的模式计算结果，以氧分子 760 nm 为例。从图 3 中可看出，在吸收光谱线上，大气透过率随着切点高度降低越来越小，这是由于大气成分吸收和大气分子散射影响的结果。在吸收

线之外的附近谱线，如 A 点和 B 点，大气透过率随着切点高度降低也变小，但没有吸收线下降强烈，这是由于只有大气分子散射影响的结果。根据公式(4)，可以利用测量的吸收谱线和附近非吸收谱线的透过率获取大气成分的含量。图 4 给出了氧气分子红外 760 nm 的 T/T' 曲线，其中 760 nm 处的散射值通过 A、B 两点的散射值利用插值法得到。

表 1 大气探测成分的特征谱线及谱带宽度

Tab.1 Characteristic lines and band widths of atmospheric detection composition

Atmospheric composition	O ₃	O ₂	NO ₂	NO ₃
	255	760	433	617
	690	865	436	655
Characteristic Spectrum/nm			438	
			442	
			447	
Band width/nm	1.1	0.4	0.5	0.4

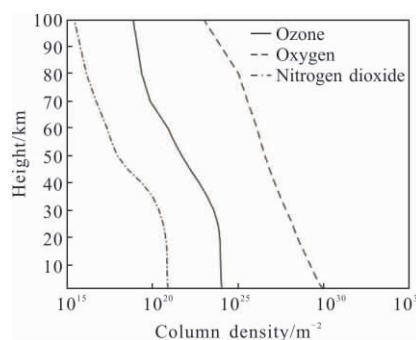


图 2 中纬度夏季模式输出的大气成分剖面图

Fig.2 Atmospheric composition profiles of mid-latitude summer mode

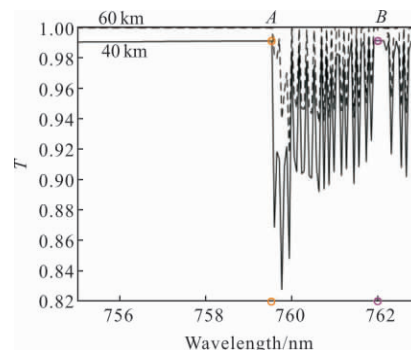


图 3 氧气分子大气透过率

Fig.3 Oxygen molecular atmospheric transmissivity

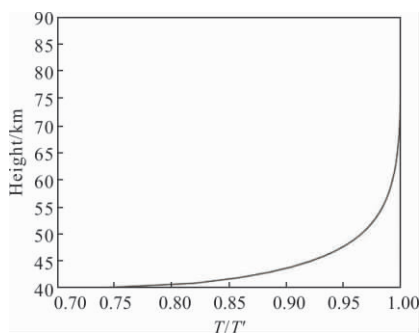


图 4 透过率随高度的变化

Fig.4 Transmissivity changing with height

利用图 4 所得氧气分子随高度变化的大气透过率比值,根据公式(4)可得其沿视线方向的密度随高度的变化,再根据公式(5),可进一步得到其局部密度,已知氧气分子在空气中是充分混合的,假定空气处于流体静力学平衡状态,在得知其局部密度的情况下,则有公式(6):

$$\frac{1}{T_p} \frac{dT_p}{dz} + \frac{1}{[O_2]} \frac{d[O_2]}{dz} = -\frac{mg}{kT_p} = -\frac{1}{H} \quad (6)$$

式中: T_p 为大气温度; H 为氧气分子的标高,根据公式(6)可进一步计算得到大气温度及大气密度信息。如图 5 给出氧气分子沿视线方向的密度,其中,分子的吸收截面除与谱线强度有关外,还与分子能态寿命、参与跃迁的量子态的布局数目有关,而后两项依赖

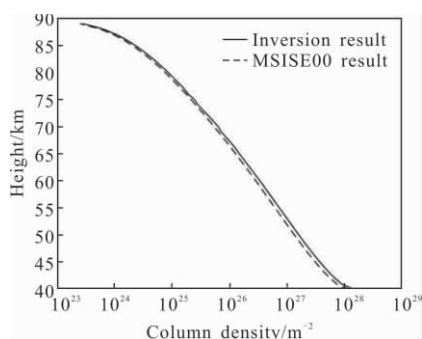


图 5 氧气分子沿视线方向的密度

Fig.5 Column density of oxygen molecules

于大气温度和压强,因此吸收截面还与温度、压强有关^[18]。在 HITRAN 页面中,设置温度为 250 k,压强为 0.003 atm,计算 760 nm 光谱的吸收截面 $\sigma(\lambda) = 0.0213 \times 10^{-27} \text{ m}^2$ 。其中 760 nm 位于氧气红外吸收 A 带(758~778 nm),是由分子转动跃迁而形成的,该光谱位置不易受天气的影响,且没有其他大气分子的干扰。计算过程中的 HITRAN 是为满足研究大气红

外特性的需要而组织编写的包括 H_2O 、 CO_2 在内的 39 种重要气体分子的 1 789 569 条谱线的吸收参数的数据库^[19-21]。利用 HITRAN 计算氧气分子吸收截面的好处有考虑到气压和温度对吸收截面的影响,且收录 1 789 569 条谱线的逐线参数,能够精确计算 760 nm 处的吸收截面。

反演的结果是根据图 4 中的 T/T' ,反演得到氧分子沿视线方向的密度,模式的结果是先用 MSISE00 输出氧气局部密度随高度的变化,然后以 1 km 为间隔将大气分层,再将每一层的局部密度按路径积分,最终叠加得到每一个切点高度上氧分子沿视线方向的密度。积分过程中,认为一层中 1 km 路径中氧气分子局部密度是线性递减的。从拟合结果来看,MSISE00 输出的氧气密度和根据透过率反演得到的氧气密度拟合的很好。

3 观测信噪比和探测精度估计

为确定探测光谱信号的强弱以及探测精度,则需要结合仪器参数,分析观测值的信噪比和测量误差。另外,由于探测的每种成分具有两条及以上的光谱位置,通过信噪比和测量误差的分析,可确定使用其中的某一条光谱位置进行探测可使结果更可靠。

参照 GOMOS 的仪器参数,再利用市面可用的器件参数进行计算,假设探测器参数值如表 2 所示。

表 2 仪器参数

Tab.2 Instrument parameters

Telescope	30 cm×20 cm	Optical transmittance L : UV-VIS0.82; IR0.92
CCD	Back-illuminated	QR: UV0.3; VIS0.75; IR0.25
Grating	UV-VIS: Holographic grating; IR: Diffraction grating	Diffraction efficiency η : UV0.45; VIS0.6; IR0.6

仪器效率为 $k=L \times QR \times \eta$, 计算得紫外波段为 0.110 7,可见光波段为 0.369,红外波段为 0.138。设恒星的流量值为 F_0 ($\text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{\AA}^{-1}$) ($1 \text{\AA} = 0.1 \text{ nm}$),积分时间 $t=0.5 \text{ s}$,结合卫星轨道速度 7.5 m/s,计算得到空间分辨率为 1.38 km/s。卡塞格林望远镜主镜口径为 30 cm,次镜口径为 20 cm,遮光比为 44%,有效接收面积 $s=393 \text{ cm}^2$,紫外、可见光和红外的光谱分辨率分别为 $w=0.1/0.2/0.7 \text{ nm}$,某一波长的接收光子

数为:

$$N_I = \frac{F_0 \times t \times s \times w \times 10^{-7}}{h\nu} \times T \times k \quad (7)$$

式中: $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, 为普朗克常量; ν 为频率。由于每种成分在不同的高度有不同的透过率, 通过公式(7)计算可得不同高度接收的光子数 N_I , 噪声为:

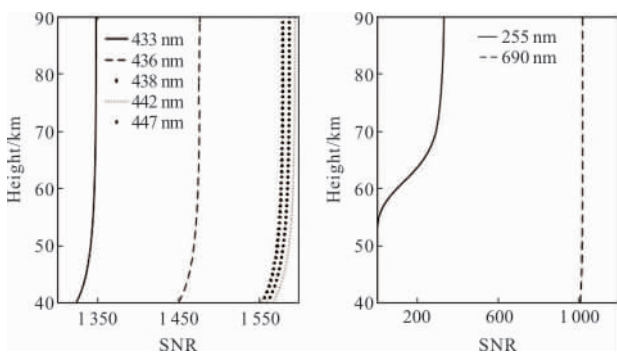
$$N_S = \sqrt{N_I + D + R} \quad (8)$$

式中: D 为暗电流噪声; R 为读出噪声; 假设接收光强比较强, 这两项的大小相比光强来说可以忽略, 则接收到的信噪比为:

$$\text{SNR} = \frac{N_I}{N_S} = \sqrt{N_I} \quad (9)$$

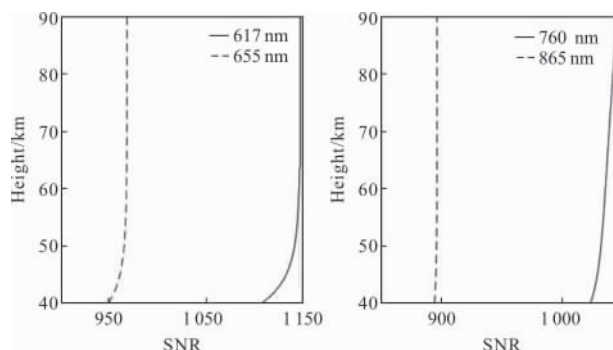
表 1 中各谱线接收信号的信噪比结果如图 6 所示。参照 GOMOS^[7]接收的光谱信噪比 SNR 大于 100 即可用来反演较为可靠的大气成分数据。GOMOS 探测到了 O_3 、 NO_2 、 NO_3 、水蒸气、气溶胶等的线密度和局部密度, 其中, O_3 密度在 20 km 以下的误差达到 10%, 20~40 km 之间误差为 1%~3%, 100 km 以上误差为 8%; NO_2 的误差达到 10%~20%; NO_3 的误差为 20%~40%左右; 气溶胶的误差为 30%左右。

图 7 给出各成分沿视线方向密度测量的相对误差随高度的变化。结合图 6 和图 7 可以得到在实际操作中探测这四种成分所用的光谱位置, 该探测光谱具有信噪比高、测量精度高的特点, 如表 3 所示。



(a) 二氧化氮 433 nm/436 nm/438 nm/442 nm/447 nm 接收的信噪比随高度的变化
(a) Signal-to-noise ratio of nitrogen dioxide at 433 nm/436 nm/438 nm/442 nm/447 nm received as a function of height

(b) 臭氧 255 nm/690 nm 接收的信噪比变化的
(b) Signal-to-noise ratio change of ozone at 255 nm/690 nm



(c) 三氧化氮 617 nm/655 nm 接收的信噪比变化
(c) Nitrogen trioxide at 617 nm/655 nm receives the signal-to-noise ratio change

(d) 氧气 760 nm/865 nm 接收的信噪比变化
(d) Signal-to-noise ratio change of oxygen at 760 nm/865 nm

图 6 各成分在不同高度的信噪比

Fig.6 Signal-to-noise ratio of each component at different heights

从图 6 中可以看出, 目标星是天狼星的情况下, 光谱接收的信噪比都在 1000 左右, 信号足够强可以获得可靠的信息。但低高度臭氧在谱线 255 nm 吸收强烈, 接收的信噪比为零, 因此测量低高度的臭氧需要利用 690 nm 谱段。另外, 二氧化氮在 438、442、447 nm 的信噪比大小基本一致, 三氧化氮和氧气的信噪比分别在光谱位置 617 nm 和 760 nm。

因为

$$N(z) = -\frac{1}{\sigma_\lambda} \ln \frac{T}{T'} = -\frac{1}{\sigma_\lambda} \ln \frac{N_I}{N_R} \quad (10)$$

则

$$\partial N(z) = -\frac{1}{\sigma_\lambda} \partial \ln \frac{N_I}{N_R} = -\frac{1}{\sigma_\lambda} \left(\frac{\partial N_I}{N_I} - \frac{\partial N_R}{N_R} \right) \quad (11)$$

所以, 沿视线方向的密度测量误差为:

$$\Delta N(z) = \frac{1}{\sigma_\lambda} \sqrt{\left(\frac{\Delta N_I}{N_I} \right)^2 + \left(\frac{\Delta N_R}{N_R} \right)^2} = \frac{1}{\sigma_\lambda} \sqrt{\frac{1}{N_I} + \frac{1}{N_R}} \quad (12)$$

则沿视线方向的密度测量的相对误差:

$$\frac{\Delta N(z)}{N(z)} = -\left(\ln \left(\frac{N_I}{N_R} \right) \right)^{-1} \sqrt{\frac{1}{N_I} + \frac{1}{N_R}} = -\left(\ln \left(\frac{T}{T'} \right) \right)^{-1} \sqrt{\left(1 + \frac{T}{T'} \right)} / \sqrt{N_I} \quad (13)$$

式中: $N_I = \frac{F_0 \times t \times s \times w \times 10^{-7}}{h\nu'} \times T' \times k$ 。

由于二氧化氮和三氧化氮主要分布在 60 km 以下, 因此 60 km 以上的相对误差增大, 如图 7(a) 所示 60 km 以下测量的相对误差小于 1%, 随着探测高度

的升高,误差逐渐增大;如图 7(d)所示,60 km 以下的探测误差控制在 2% 以内;综合图 7(b)和图 7(c),可以发现利用 690 nm 光谱探测 65 km 以下的臭氧误差小于 1%,而由于 255 nm 在低高度紫外强吸收,且在 65 km 以上的相对误差小于 1%,因此可利用 255 nm 和 690 nm 分别进行臭氧高高度和低高度的

测量;对比图 6,发现 690 nm 的信噪比高于 255 nm,而反演时 255 nm 的相对误差反而小,这是由于臭氧在紫外强吸收,该吸收作用大于在可见光区的吸收,导致 255 nm 的吸收信号强,接收光谱信号弱。分析图 7(e),利用 MODTRAN 计算氧气透过率时,865 nm 光谱位置的透过率在 75 km 以上接近于 1,因此无法计算

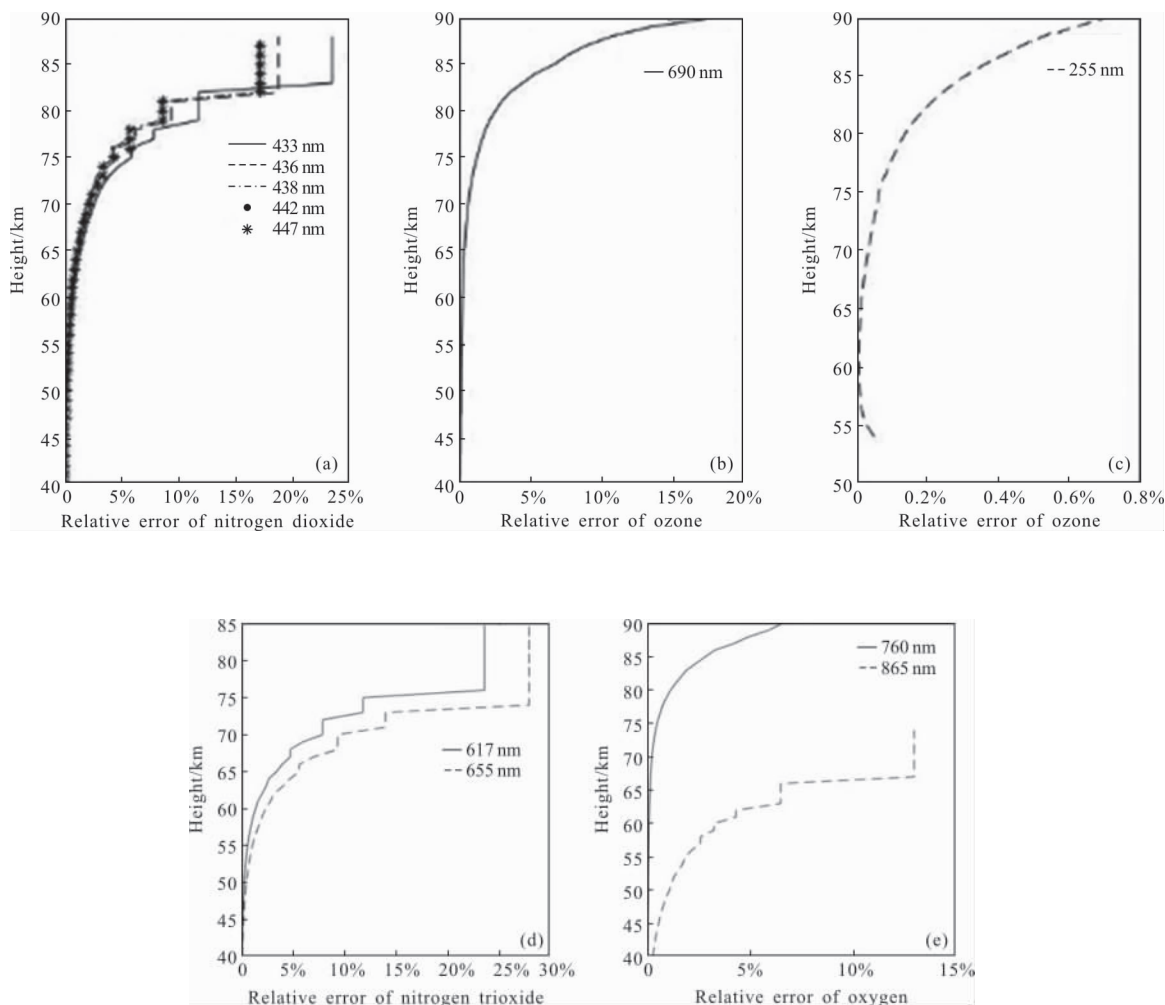


图 7 沿视线方向的密度测量的相对误差:(a) 二氧化氮的相对误差随高度的分布;(b)和(c) 臭氧的相对误差随高度的分布;(d) 三氧化氮的相对误差随高度的变化;(e) 氧气的相对误差随高度的变化
 Fig.7 Relative error of density measurement along the line of sight: (a) relative error of nitrogen dioxide with height; (b) and (c) relative error of ozone with height; (d) relative error of nitrogen trioxide with height; (e) relative error of oxygen with height

该高度以上的相对误差,且 760 nm 的相对误差小于 865 nm,因此利用 760 nm 光谱位置来探测氧气。

综合图 6 信噪比和图 7 相对误差,得到探测这四种大气成分的光谱位置,如表 3 所示。

表 3 临近空间高度可探测的大气成分
Tab.3 Detectable atmospheric components
in near space

Atmospheric composition	Spectrum/nm	Spectral resolution/nm
O ₃	255	0.01
	690	0.04
NO ₂	438	0.04
NO ₃	617	0.04
O ₂	760	0.052

4 不同视星等对探测的影响

为保证利用星光掩星技术获得更多的观测量,需要选择尽可能多的星星作为目标星,以上分析利用的目标星是天空中肉眼可见的视星等最亮的天狼星,其视星等为-1.45,因此需要计算探测信噪比和相对误差随视星等不同的变化,来确定可利用的星星的视星等范围。在仿真过程中,假设不关注每一颗星光谱的特征,只关注所测谱线位置的亮度随视星等的变化,因而视星等与光谱流量的关系为:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10}(F_1/F_2) \quad (14)$$

式中: m 表示视星等, m 值越小表示星越亮; F 表示流量值,取 m_2 的视星等为0,由公式(15)得流量值,

$$F_1 = F_2 \times 10^{(-m_1/2.5)} \quad (15)$$

式中: F_2 是视星等为0的织女星的流量,为一定值。

当视星等 $m_1 = -1.45$ 时,光谱流量值 $F_1 = F_2 \cdot 10 \cdot$

(1.45/2.5);当视星等 $m_1' = -0.45$ 时,光谱流量值 $F_1' = F_2 \cdot 10(0.45/2.5)$;由此得视星等 $m_1' - m_1 = 1$ 时,相应光谱位置的流量值 $F_1'/F_1 = 1/10(0.4) = 0.398$,不同视星等在同一光谱位置接收信噪比的比值 $\frac{\sqrt{N_n'}}{\sqrt{N_n}} = 0.631$,即当视星等每增加1,对应光谱位置接收的信噪比为上一等级的恒星的0.631倍。以此类推,当视星等 $m = 3.55$ 时,信噪比为原信噪比的0.6315。

根据图6,当视星等为3.55时,信噪比为原来的0.6315,具体表现为二氧化氮438 nm的信噪比最小为158,臭氧在255 nm的信噪比最小为36,在690 nm的信噪比最小为102;三氧化氮在617 nm的信噪比最小为112,氧气在760 nm的信噪比最小为104。

根据图7,对同一种大气成分而言,当视星等为3.55时,由公式(9) $SNR \propto \sqrt{N_t}$,和公式(13) $\frac{\Delta N(z)}{N(z)} \propto \frac{1}{\sqrt{N_t}}$,得测量的相对误差为原来的1.585。具体表现

为,二氧化氮在438 nm的相对误差最小为0.47%,臭氧在690 nm的相对误差最小为0.43%,255 nm相对误差最小为0.09%,三氧化氮在617 nm相对误差最小为0.32%,氧气在760 nm相对误差最小为0.32%。

由以上分析计算得到视星等在-1.45~3.55之间可以作为目标星。

分析表3中各谱线接收的光子数,以确定目前CCD型号能否用来接收光谱。每条谱线位置接收光子数如表4、5所示。40 km高度接收到的光子数 N_1 ,

表 4 动态范围分析

Tab.4 Dynamic range analysis

Type	Pixel	Bin	Size	Capacity
(1) 30-11 front illuminated advanced inverted mode	1 022(H)×255(V)	1	26 μm×26 μm	50×10 ⁵
(2) CCD30-11 NIMO back illuminated deep depleted	1 022(H)×256(V)	4	26 μm×26 μm	70×10 ⁵

表 5 动态范围分析

Tab.5 Dynamic range analysis

Dynamic range	Atmospheric composition	Spectrum/nm	N_1	N_2
(1) 125 000:1	O ₃	255	9 654	111 477
	O ₃	690	1 013 706	1 037 641
	NO ₃	617	1 225 069	1 315 157
(2) 83 000:1	O ₂	760	1 046 636	1 091 135
	NO ₂	438	2 443 030	2 517 537

该高度具有强吸收的特征;500 km 高度接收到的光子数 N_2 , 此时无大气吸收, 其中 N_1 和 N_2 根据公式(7) 计算得到。从表 4、5 中得到接收的光子数最大为 2517537, 而目前 CCD 最大的满阱容量为 70 万个光子, 因此需要 4 个 bin 来接收, 其中, CCD 的像素大小、满阱容量、动态范围等参数是由 CCD 型号决定的。

通过上述分析, 可知视星等小于 3.55 即可作为目标星源, 根据依巴谷星表, 视星等范围在 -1.45~3.55 的星星有 208 颗。根据图 6 的信噪比分析和图 7 相对测量误差, 可知当视星等为 3.55 时, 除臭氧在紫外外的信噪比最小低于 100 以外, 选择的其他光谱位置均大于 100, 四种成分测量的误差最小控制在 1% 以内。

5 结 论

文中通过对地球大气星光掩星技术的理论与仿真分析, 对该技术的信噪比、时空分辨率、光谱分辨率、测量精度、目标星源视星等范围进行了初步的分析, 主要结论如下:

(1) 在当前的初步仿真条件下, 时间分辨率为 0.5 s, 该技术的空间分辨率可达到 1.38 km/s, 紫外的光谱分辨率为 0.01 nm, 可见光的光谱分辨率为 0.04 nm, 红外的光谱分辨率为 0.052 nm。目标星源选择视星等在 -1.45~3.55 范围内的恒星。

(2) 结合测量精度、信噪比和 CCD 的指标, 笔者得到当目标星星的视星等在 -1.45~3.55 之间时, 探测的信噪比可达到 100 以上, 最小测量误差小于 1%。

上述结果表明星光掩星技术具有目标星源多、信噪比大、相对测量误差小等优点, 可在临近空间进行大气成分探测。但文中仅对该技术进行初步的分析, 存在不足。为实现星光掩星技术的自主发展, 形成小型化的仪器, 推动中高层大气的探测和研究, 下一步的工作将集中以下 3 个方面: (1) 仪器参数将根据实际的工作需求进行优化, (2) 大气的透过率不再局限于使用 MODTRAN 计算, 而是沿实际的光线进行仿真追踪计算, (3) 改进密度反演算法, 提高探测精度。

参考文献:

[1] Hay P B, Roble R G, Shah A N. Terrestrial atmospheric

composition from stellar occultations. NASA, Washington[J]. *The Sci Results from the Orbiting Astron Obs (OAO-2)*, 1972, 176(4036): 793-794.

- [2] Hays P B, Roble R G. Stellar occultation measurements of molecular oxygen in the lower thermosphere [J]. *Planetary and Space Science*, 1973, 21(3): 339-348.
- [3] Riegler G R, Atreya S K, Donahue T M, et al. UV stellar occultation measurements of nighttime equatorial ozone [J]. *Geophysical Research Letters*, 1977, 4(4): 145-148.
- [4] Festou M C, Atreya S K, Donahue T M, et al. Composition and thermal profiles of the Jovian upper atmosphere determined by the Voyager Ultraviolet Stellar Occultation Experiment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86 (A7): 5715-5725.
- [5] Swartz W H, Yee J H, Vervack R J, et al. Photochemical ozone loss in the Arctic as determined by MSX/UVISI stellar occultation observations during the 1999/2000 winter [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 217(D20): 39-1-39-10.
- [6] Kyrölä E, Tamminen J, Leppelmeier G W, et al. GOMOS on Envisat: An overview [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(7): 1020-1028.
- [7] Bertaux J L, Kyrölä E, Fussen D, et al. Global ozone monitoring by occultation of stars: An overview of GOMOS measurements on ENVISAT[J]. *Atmos Chem Phys*, 2010, 10 (24): 12091-12148.
- [8] William E M, Nicholas M S, Gregory M H, et al. The Imaging Ultraviolet Spectrograph (IUVS) for the MAVEN mission [J]. *Space Science Reviews*, 2014, 195 (1-4): 75-124.
- [9] Que'merais E, Bertaux J L, Korablev O, et al. Stellar occultations observed by SPICAM on Mars Express [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111 (E9): doi10.1029/2005JE002604..
- [10] Francois F, Frank M, Jean-Loup B, et al. Density and temperatures of the upper atmosphere measured by stellar occultations with Mars Express SPICAM [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114 (E1): doi.org/10.1029/2008JE003086.
- [11] Bertaux J L, Nevejans D, Korablev O, et al. SPICAV on venus express: Three spectrometers to study the global structure and composition of the Venus atmosphere [J]. *Planetary and Space Science*, 2007, 55(12): 1673-1700.
- [12] Liu Yi, Lu Chunhui, Wang Yong, et al. The quasi-biennial and semi-annual oscillation features of tropical O_3 , NO_2 , and

- NO₃ revealed by GOMOS satellite observations for 2002 – 2008[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(18): 1921–1929.
- [13] Liu Yi, Cai Zhaonan, Erkki K. Comparison of ENVISAT GOMOS and MIPAS ozone profiles with balloon sonde measurements from Beijing [C]//Proceedings of the Dragon, 2008: 21–25.
- [14] Liu Chuanxi, Liu Yi, Zhang Yuli. Simulation of the Madden-Julian oscillation in wintertime stratospheric ozone over the Tibetan Plateau and East Asia: Results from the specified dynamics version of the whole atmosphere community climate model[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015, 8(5): 264–270.
- [15] Kyrölä E, Blanot L, Tamminen J, et al. GOMOS algorithm theoretical basis document[Z]. Cirra Colostate Edu, 2012.
- [16] Bertaux J L, Mégie G, Widemann T, et al. Monitoring of ozone trend by stellar occultations: the GOMOS instrument [J]. *Advances in Space Research*, 1991, 11(3): 237–3242.
- [17] Berk A, Bernstein L S, Robertson D C. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN [R]. US: Air Force Geophysical Laboratory Technical Rep, 1989.
- [18] Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [19] Zong Pengfei. Algorithm analysis of oxygen a absorption band transmission based on line-by-line integration [D]. Taiyuan: School of Physics, North University of China, 2013. (in Chinese)
- [20] Zhang Yu, Liu Bingqi, Wei Heli, et al. Study on cloudless sky background radiation characteristic in passive ranging based on oxygen spectral absorption [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 298–304. (in Chinese)
- [21] An Yongquan, Wang Zhibin, Li Jinhua, et al. Research on single station passive based on O₂ absorption characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 310–316. (in Chinese)