

星光掩星探测技术的轨道模拟结果分析

孙明晨^{1,2}, 吴小成^{1*}, 胡 雄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 星光掩星技术是利用恒星光谱进行地球及其他行星大气痕量成分密度、温度、气溶胶等测量的有效手段。该探测原理主要是根据大气成分在恒星光谱的不同位置上表现出不同的吸收特征, 具体表现在: 紫外波段可进行臭氧、氧气、氢气等的测量, 可见光谱段可探测二氧化氮、三氧化氮、氧气等, 红外可探测水蒸气、气溶胶、甲烷、二氧化碳、氧气等。星光掩星的实现过程为: 当 LEO 卫星和恒星分别位于地球的两侧时, 恒星发射的光经过地球大气的吸收、散射等作用, 被另一侧的 LEO 所接收, 即构成掩星观测。根据光谱流量得到恒星的视星等范围, 给出恒星在天球坐标系中的分布和不同的光谱型, 以及利用各光谱型可探测的大气成分, 再利用恒星和 LEO 卫星在地固坐标系中的相对位置, 进行恒星-LEO 星光掩星轨道观测模拟, 基本流程为: 首先读取 LEO 卫星的轨道位置以及目标恒星的位置, 设置 24 h 的模拟时间, 其次判断是否处于掩星状态, 当掩星开始时, 计算并输出掩星发生的经纬度、速度等, 直至模拟时间结束。其中涉及恒星从天球坐标系转换到地固系的过程, LEO 卫星轨道、掩星切点经纬度等的计算。根据模拟流程, 计算并分析掩星事件的日观测量、全球分布、持续时间以及漂移速度等, 得到以下结果: (1) 目标恒星在全天区都有一定数量的分布且具有不同的光谱型, 可进行臭氧、二氧化氮等成分的探测; (2) 在对星光掩星进行 24 h 的轨道模拟过程中, 日观测量为 5 563 次, 其中包括 2 737 次上升掩星, 2 826 次下降掩星; (3) 从全球分布来看, 掩星事件主要分布在低纬度, 两极最少, 其他纬度数量相当, 且经度方向分布均匀; (4) 根据方位角的分布, 正常掩星占比为 78.25%, 持续时间平均为 1.5 min, 切点水平漂移在 18~600 km; (5) 21.75% 的侧面掩星事件, 其较正常掩星来说, 持续时间长, 切点的水平漂移速度大, 方位角变化也大。该结果为卫星轨道设计和探测载荷设计提供理论指导。

关键词 星光掩星; 光谱型; 卫星; 持续时间; 漂移速度

中图分类号: P356 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)01-0298-07

引 言

大气星光掩星技术是利用光谱透过率获取行星大气痕量成分密度、温度的手段, 具有覆盖率高、全天候等优点^[1-2]。自 1968 年 NASA 发射 OAO-2 卫星, 获取地球低热层和中间层上层的分子氧和臭氧的夜间分布, 证明了该技术获取大气成分信息的可行性^[3], 用于研究大气成分随季节变化之后, 直到 2018 年 NASA 发射 SES-2 卫星, 利用星光掩星技术探测地球热层和电离层的密度和温度, 回答热层和电离层对整合的太阳-地球系统强迫的全球尺度响应, 实现用于天气研究的转变(www.gold.cs.ucf.edu), 50 年间该技术在研究地

球、火星、木星等行星大气和气候研究方面发挥了巨大的潜能^[4-9]。

星光掩星的实现过程描述如下: 在一次掩星事件时间内, 目标恒星的位置可视为不变, 当 LEO(Low Earth Orbit) 卫星运动的位置和观测的恒星分别位于地球的两侧时, 目标恒星在地球一侧发射紫外、可见光、红外波段的光, 光线经过地球大气的吸收和散射, 使得光谱在特定的位置出现吸收特征, 然后 LEO 卫星在地球的另一侧进行光谱接收, 构成掩星观测。随着 LEO 卫星沿轨道运动和观测不同位置目标恒星, 完成一次自上而下或者自下而上的扫描地球大气的事件成为一次掩星事件。

目前国内并未见利用恒星光谱进行大气探测的星光掩星

收稿日期: 2018-11-20, 修订日期: 2019-04-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0501503)和国家自然科学基金项目(41204137)资助

作者简介: 孙明晨, 女, 1993 年生, 中国科学院国家空间科学中心博士研究生 e-mail: sunmingchen16@mails.ucas.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: xcwu@nssc.ac.cn

技术的报道,为自主发展该技术,需要在工程技术上对该技术进行仿真研究,得到掩星事件的数量,在全球的分布情况等,对制定掩星观测计划进行指导。其中,仿真分为前向观测模拟和后向反演,而观测模拟又分为轨道模拟和观测数据模拟,本文主要给出轨道模拟的结果。轨道模拟指的是,利用 LEO 轨道数据(精密轨道或预报轨道)和恒星位置数据,计算恒星、卫星以及地球三者之间的几何关系,根据掩星事件判据,判断是否发生掩星事件,并计算掩星事件发生时间、地点、持续时间、经纬度分布等,必要时可输出某次掩星事件过程中恒星和卫星的位置,为观测数据模拟提供轨道数据。

本文第一部分介绍目标恒星在天球坐标的赤经赤纬分布以及光谱型,有利于模拟过程中仪器对目标恒星的准确定位,还给出恒星在天球坐标系到地固坐标系的转换过程;第二部分介绍轨道模拟过程,包括 LEO 轨道计算、掩星事件经纬度计算等;第三部分分析仿真过程得到的掩星事件结果,如随经纬度等的分布、事件持续时间、水平漂移等等;第四部分给出本文的结论以及基于这些结论进行讨论。

1 目标恒星分布及坐标转换

1.1 恒星在天球坐标系的分布

恒星作为一种自然光源,其发出的光主要取决于它的表面积、外层温度和化学成分。通常将一颗恒星的视亮度表示为视星等,两颗测得流量为 F_1 和 F_2 的恒星,视星等 m_1 和 m_2 之间的关系为

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10}(F_1/F_2) \quad (1)$$

当 $m_2 = m_1 + 1$, 星 1 就要比星 2 亮约 2.5 倍。在掩星过程中,我们并不测量一颗恒星发射的全部光,而是测量给定波段范围内发射的光。因此利用不同视星等来计算在同一波段范围内光谱流量随视星等的变化,而不考虑某一颗恒星光谱的特征。根据流量随视星等的变化能够量化探测信噪比、探测精度随视星等的变化,由此给出目标恒星的视星等范围。

根据光谱接收信号的信噪比大于 100 以及最小的相对测量误差控制在 1% 的要求,目标恒星的视星等范围为 $-1.45 \sim 3.55$, 根据依巴谷星表找出 218 颗目标恒星。此外,星系的光谱是复合的,由不同温度恒星的光谱混合而成,因此每颗星主要发不同波段的光谱,进而可进行不同波段成分的探测,具体表现为:紫外波段可进行臭氧、氧气、氢气等的测量,可见光谱段可探测二氧化氮、三氧化氮、氧气等,红外可探测水蒸气、气溶胶、甲烷、二氧化碳、氧气等。目前常用的光谱分类法将恒星光谱分为 7 类或者 10 类,为 O-B-A-F-G(-R-N)-K(-S)-M, 表面温度逐渐降低, M 型星温度最低。

为了解目标恒星的分布情况,进行准确定位,图 1 给出目标恒星在天球坐标系中的赤经赤纬分布,其中三种发光波段的恒星覆盖 7 种光谱型。

1.2 恒星的天球坐标换算到地固坐标系

要实现掩星过程,要求目标恒星和 LEO 卫星在同一个

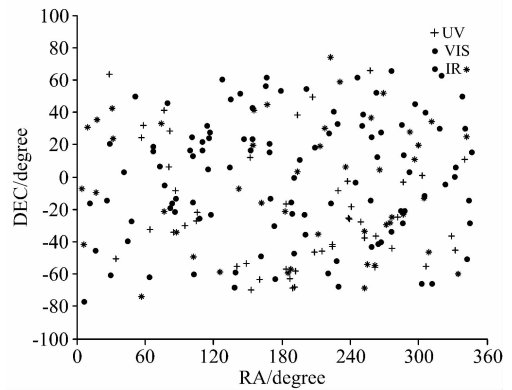


图 1 恒星的赤经赤纬分布

+ : 恒星主要发紫外波段的光谱; · : 恒星主要发可见光波段的光谱;
* : 恒星主要发红外波段的光谱

Fig. 1 Longitude and latitude distribution of stars

The stars represented by (+) mainly emit the spectrum of the ultra-violet band; the stars represented by (·) mainly emit visible light; the star represented by (*) are in the infrared band

坐标系内,因此需要对恒星的坐标进行转换,将恒星在天球坐标系的坐标 $\vec{r}_{\text{GCRS}}(X, Y, Z)$ 转换到 LEO 所在的地固系的坐标 $\vec{r}_{\text{IERS}}(X, Y, Z)$ 。

$$\vec{r}_{\text{IERS}}(X, Y, Z) = W(t)Q(t)R(t)\vec{r}_{\text{GCRS}}(X, Y, Z) \quad (2)$$

转换过程中需要极移矩阵 $w(t)$, 这是由于地球自转轴相对北极有个小范围的移动;地球自转轴摆动和微小的抖动导致的岁差章动矩阵 $Q(t)$, 自转矩阵 $R(t)$ ^[10-12], 具体的流程如图 2: 首先将跳秒输入,跳秒可从当年的 RINEX 导航电文中查找,根据 UTC(协调宇宙时)时刻计算 TT(地球时)时刻,由 TT 时刻计算儒略日,有式(3),基于 TT 时刻的儒略日调用 SP00, 输出 sp, 将 xp, yp 以及 sp 输入 POM00, 得到 R_x (sp), R_y (yp)和 R_z (xp)三者相乘得 $W(t)$, 其中 xp 和 yp 能够在 IERS 网站直接下载使用(<http://www.IERS.org>);再次利用 TT 值计算得到的儒略日,调用 XYS00, 在该程序中分别调用 bpn2xy 和 s00, 相应得 x, y 值和 s 值,基于 x, y, s 值,调用 C2ixys, 得 $Q(t)$;将 UTC 时刻转换成 UT1(世界时)时刻,计算得到儒略日,基于 UT1 时刻的儒略日,调用 IauEra00, 得地球自转角度,基于该值,调用 IauRz, 得到 $R(t)$ 。该过程中调用的函数涉及到 IAU 基础天文学标准库 SOFA 中的函数(<http://www.iau-sofa.rl.ac.uk/>)。

$$JD = 1\,721\,013.5 + 367Y - \text{int}\left\{\frac{7}{4}\left[Y + \text{int}\left(\frac{M+9}{12}\right)\right]\right\} + d + \frac{h}{24} + \text{int}\left(\frac{275M}{9}\right) \quad (3)$$

2 星光掩星轨道模拟基本流程

星光掩星轨道模拟基本流程:首先读取恒星的位置以及 1 颗 LEO 卫星轨道数据(精密轨道或预报轨道),设置掩星事件开始和终止的时间,历时 24 h。以其中一颗恒星为例,从掩星开始时间算起,计算 LEO 卫星和恒星的位置,根据卫星、恒星和地球三者几何关系,判断是否处于掩星状态,当

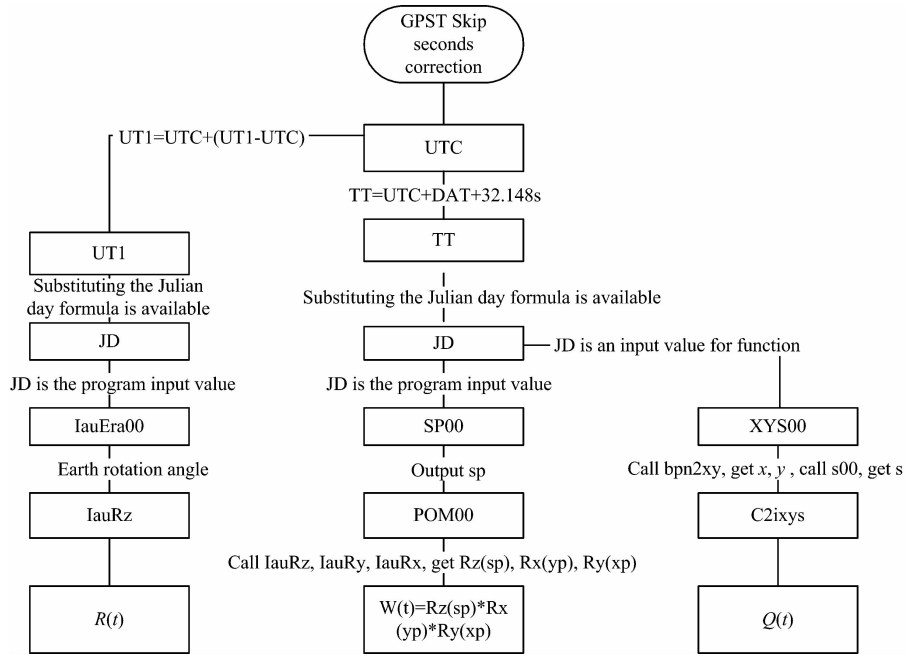


图 2 坐标转换流程图

Fig. 2 Coordinate conversion flow chart

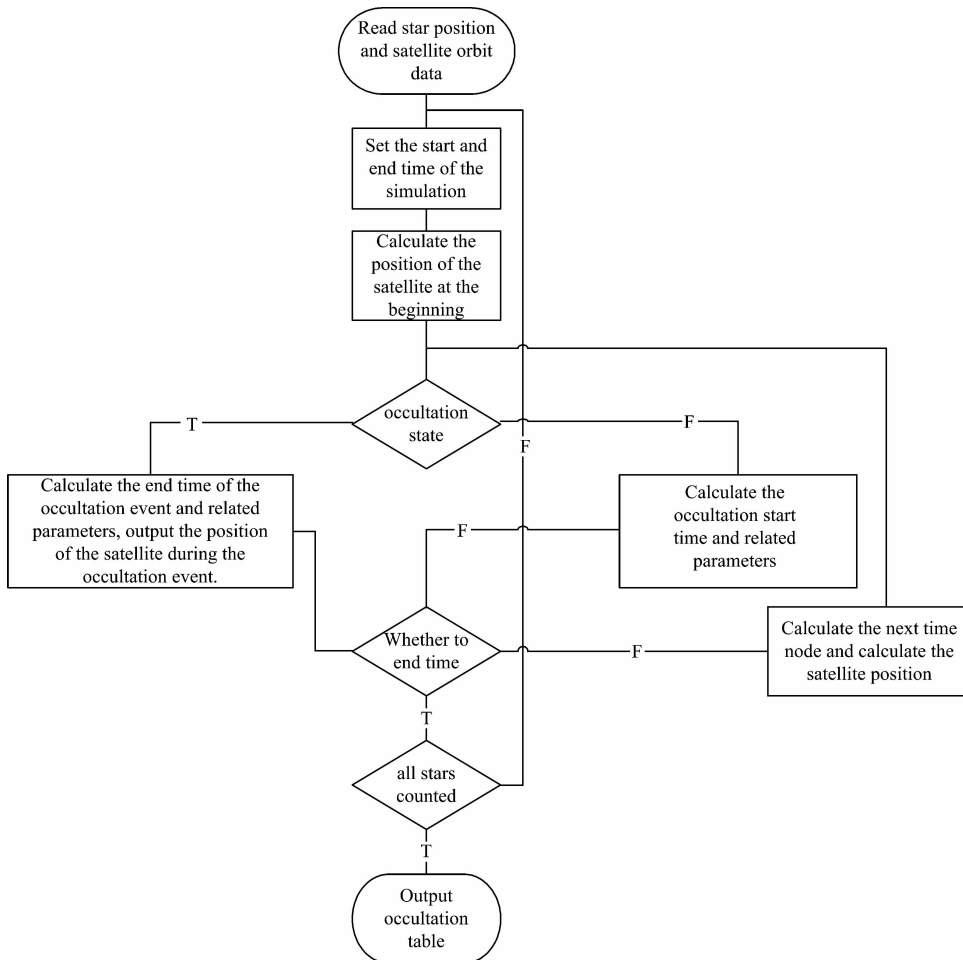


图 3 星光掩星轨道模拟流程图

Fig. 3 Stellar occultation orbit simulation flow chart

掩星事件开始时, 计算并输出经纬度、速度、时间等参数, 当掩星事件结束时, 可得到整个过程中卫星和恒星的数据; 随着一个又一个时间节点的结束, 一直模拟到截止时间。当 218 颗恒星都按照以上过程完成掩星模拟以后, 输出掩星日观测量、持续时间、经纬度分布、高度角和方位角分布等信息, 形成掩星表, 具体流程如图 3 所示。

2.1 LEO 卫星轨道计算

LEO 卫星轨道计算具体如下: 方法一, 利用卫星精密轨道数据, 进行多项式拟合插值, 以计算某确定时刻的卫星位

置; 方法二, 利用卫星预报轨道进行计算, 掩星事件发生时间计算结果可以作为控制掩星接收机工作的一个依据, 也可作为地面进行配合观测试验提供依据。本文在利用方法一计算时, 采用了八阶 Chebyshev 多项式拟合, 利用方法二计算卫星位置和速度。由 LEO 卫星 6 个轨道根数计算 LEO 位置和速度的方法参考文献[13], 6 个轨道根数包括卫星过近地点时刻 t_p 、轨道偏心率 e 、轨道倾角 i 、升交点赤经 Ω_0 、近地点角距 ω 、轨道半长轴 A , 如表 1 所示。

表 1 轨道参数

Table 1 Orbital parameters

majoraxis	eccentricity	inclination	ascending node	perigee angular	perigee moment
7 178. 14 km	$3. 15 \times 10^{-4}$	$87. 24^\circ$	$277. 30^\circ$	$56. 72^\circ$	8 212. 98 s

由开普勒第三定律, 得卫星平均运动角速度 n 和 t 时刻的平近点角 M 和偏近点角 E ,

$$n = \sqrt{GM_0/A^3}, M = n(t - t_p) \quad (4)$$

其中, G 为万有引力常数, M_0 为地球质量。根据开普勒方程迭代计算偏近点角 E , 得

$$E_{i+1} = M + e \sin E_i, E_0 = M \quad (5)$$

直至 $|E_{i+1} - E_i| \leq \epsilon = 10^{-12}$ 时停止迭代。真近点角 ν 和升交距角 μ_0 的计算方法如式(6)

$$\nu = \tan^{-1}(\sqrt{1-e^2} \sin E / (\cos E - e)), \mu_0 = \nu + \omega \quad (6)$$

根据式(7)计算卫星距离地心的距离 r 和升交点经度 Ω , ω_e 是地球自转角速度,

$$r = A(1 - e \cos E), \Omega = \Omega_0 - \omega_e(t - t_p) \quad (7)$$

卫星在轨道平面中的直角坐标为,

$$x = r \cos \mu_0, y = r \sin \mu_0 \quad (8)$$

利用旋转矩阵法, 计算卫星在地固系中的坐标, 得

$$\begin{aligned} X &= (-\Omega)(-i)x = x \cos \Omega - y \cos(i) \sin \Omega \\ Y &= (-\Omega)(-i)y = x \sin \Omega + y \cos(i) \cos \Omega \\ Z &= (-\Omega)(-i)z = y \sin(i) \end{aligned} \quad (9)$$

2.2 掩星事件切点经纬度、高度计算

判断过程中涉及到掩星切点高度以及经纬度的计算, 具体的计算过程如下: 已知恒星位置 \vec{r}_{star} 和 LEO 卫星位置 \vec{r}_{leo} , 计算掩星切点坐标矢量 \vec{r}_1 , 再将切点坐标转化为大地坐标系。其中, a 是掩星事件直线切点至地心距离, L 和 B 分别是切点的经纬度, H 为距离地面的高度。

$$\vec{r}_0 = \vec{r}_{\text{star}} - \vec{r}_{\text{leo}}, \vec{n} = \frac{\vec{r}_0}{\|\vec{r}_0\|}, R_1 = \|\vec{r}_{\text{star}} \cdot \vec{n}\| \quad (10)$$

$$a = \sqrt{r_{\text{star}}^2 - R_1^2} \quad (11)$$

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_{\text{star}} - \vec{n} \cdot R_1 = (X, Y, Z) \quad (12)$$

$$L = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (13)$$

$$B = \arctg\left\{\frac{Z(N+H)}{\sqrt{X^2+Y^2}[N(1-e^2)+H]}\right\} \quad (14)$$

$$H = \frac{Z}{\sin B} - N(1-e^2) \quad (15)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}} \quad (16)$$

通过迭代求得纬度 B , 初始值可由 $B = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{Z}{a}\right)$ 计算。

2.3 恒星相对于 LEO 卫星的高度角和方位角计算

此外, 还需要计算恒星相对于 LEO 卫星的高度角 E 和方位角 A , 其中 LEO 卫星位于站心坐标系, 该坐标系定义如下

$$\vec{x} = \vec{v}, \vec{y} = \vec{r}_{\text{leo}} \times \vec{v}, \vec{z} = \vec{x} \times \vec{y} \quad (17)$$

$$\sin E = \frac{\vec{z} \cdot \vec{r}_0}{\|\vec{z}\| \|\vec{r}_0\|} \quad (18)$$

$$\vec{r}_A = \vec{r}_0 - \|\vec{r}_0\| \cdot \sin E \cdot \frac{\vec{z}}{\|\vec{z}\|} \quad (19)$$

$$\cos A = \frac{\vec{r}_A \cdot \vec{x}}{\|\vec{r}_A\| \|\vec{x}\|} \quad (20)$$

其中, \vec{v} 是 LEO 卫星速度, \vec{r}_{leo} 是从地心指向 LEO 卫星的矢量, \vec{r}_0 是从 LEO 卫星指向恒星的矢量, \vec{r}_A 是 \vec{r}_0 在垂直于 LEO 轨道的平面内的投影, 方位角 A 为 \vec{r}_A 和 \vec{x} 的夹角。

3 掩星模拟结果分析

星光掩星事件发生的判据: ①掩星切点必须在恒星和 LEO 卫星之间, 以确保恒星发出的光线能够穿过地球大气; ②掩星的切点高度在 $-150 \sim 150$ km 之间; ③假设地球大气为真空, 不考虑大气折射等作用。

利用低轨卫星的精密轨道和恒星位置, 模拟 24 h 星光掩星的分布情况, 发生 5 563 次掩星事件, 其中 2 737 次上升掩星, 2 826 次下降掩星。图 4 给出星光掩星开始时刻的切点经纬度分布、恒星高度角和方位角分布, 可以看出, 星光掩星主要分布在低纬度, 在 $-15^\circ \sim -75^\circ$ 和 $15^\circ \sim 75^\circ$ 数据相当, 在 $-90^\circ \sim -75^\circ$ 和 $75^\circ \sim 90^\circ$ 数量最少; 在经度方向分布均匀。再分析高度角分布, 主要集中在 -26° 和 -29° , 此时对应的切点高度分别是 150 和 -150 km, 相应的是下降掩星和上升

掩星。最后分析方位角分布,根据开始和结束时刻的方位角的平均值,方位角在 $45^\circ \sim 135^\circ$ 和 $225^\circ \sim 315^\circ$ 两个范围内的掩星事件为侧面掩星。根据仿真结果,有侧面掩星 1210 次,占总数的 21.75%。

根据表 2,分析正常掩星和侧面掩星的特点。正常掩星平均持续时间约为 1.5 min,掩星切点水平漂移约 226 km,纬度跨度约 1° ,经度跨度约 2.7° ,高度角跨度为 5.2° ,方位角跨度约为 0.9° 。侧面掩星的持续时间较正常掩星长,切点的水平漂移比较大,方位角变化也大,有少数侧面掩星切点

高度随时间变化曲线呈驼峰状,这导致侧面掩星高度角跨度比正常掩星的跨度小。需要指出的是,掩星切点速度式(21)

$$V_{\text{HTP}} = \frac{|H_1 - H_2|}{t} \quad (21)$$

其中, H_1 和 H_2 分别是掩星开始和结束时的切点高度, t 为掩星持续时间。在考虑到大气折射的情况下,即有大气存在时,高度差比在真空中的小,因此切点的垂直速度要比目前的值小。

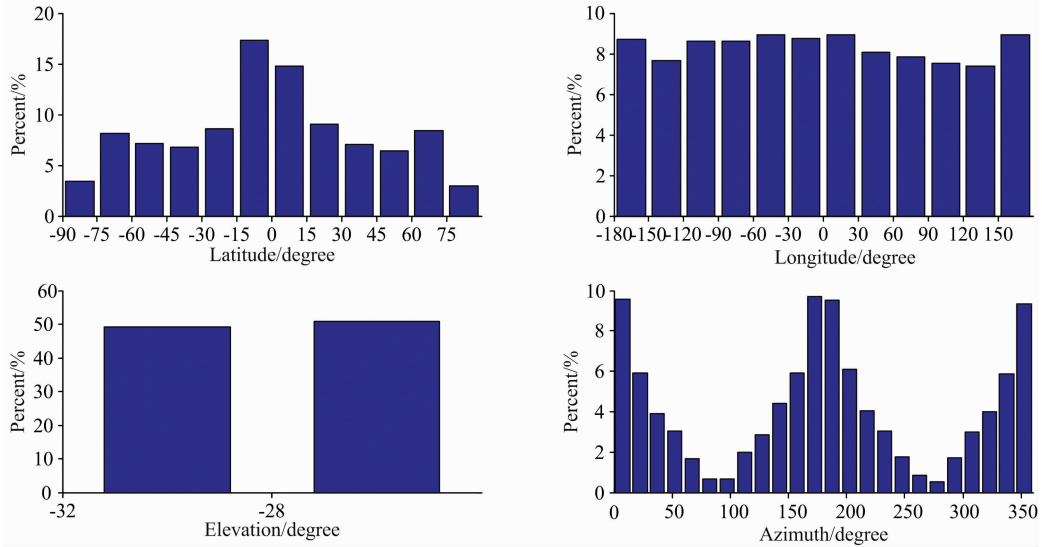


图 4 星光掩星开始时刻的切点经纬度分布、恒星高度角和方位角分布

Fig. 4 Latitude and longitude distribution of the star occultation at the beginning and stellar elevation and azimuth distribution

表 2 正常掩星和侧面掩星的比较

Table 2 Comparison of normal occultation and side occultation

	normal occultation		side occultation	
	average value	standard deviation	average value	standard deviation
duration/s	98.49	9.74	249.33	209.99
vertical speed of target point/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	3.07	0.26	1.56	0.64
horizontal drift of target point/km	226.06	172.71	1 620.17	1 553.05
latitude span/ $(^\circ)$	1.04	1.61	11.03	12.26
longitude span/ $(^\circ)$	2.69	2.78	12.06	14.88
elevation span/ $(^\circ)$	5.21	0.13	4.79	1.37
azimuth span/ $(^\circ)$	0.90	0.74	5.85	5.89

由于通常发生侧面掩星时,其探测的区域非常大,无法满足反演大气成分时要求的局部球对称近似的条件,因此主要分析正常掩星。

图 5 给出星光掩星持续时间和掩星切点水平漂移随方位角的变化,可以看出,正常掩星持续时间为 $90 \sim 125$ s,根据观测时长和掩星事件数量,可指导卫星存储设备的设计;掩星切点水平漂移为 $18 \sim 600$ km 左右,漂移速度越大,越无法满足后续数据反演的局部球对称的条件,因此要根据掩星切点的漂移速度来预先制定掩星观测计划。

4 掩星模拟结果结论和讨论

通过设置 LEO 卫星的六个轨道根数,目标恒星的位置,计算了 24 h 的星光掩星事件,分析掩星事件的时空分布,得出以下结论。

(1) 目标恒星有 218 颗,全天 88 个天区都有一定数量的分布且覆盖 7 个光谱型,因此任一轨道的卫星都有一定数量的目标恒星可进行掩星观测。

(2) 在 LEO 卫星轨道高度 800 km,轨道倾角 87° 的模拟

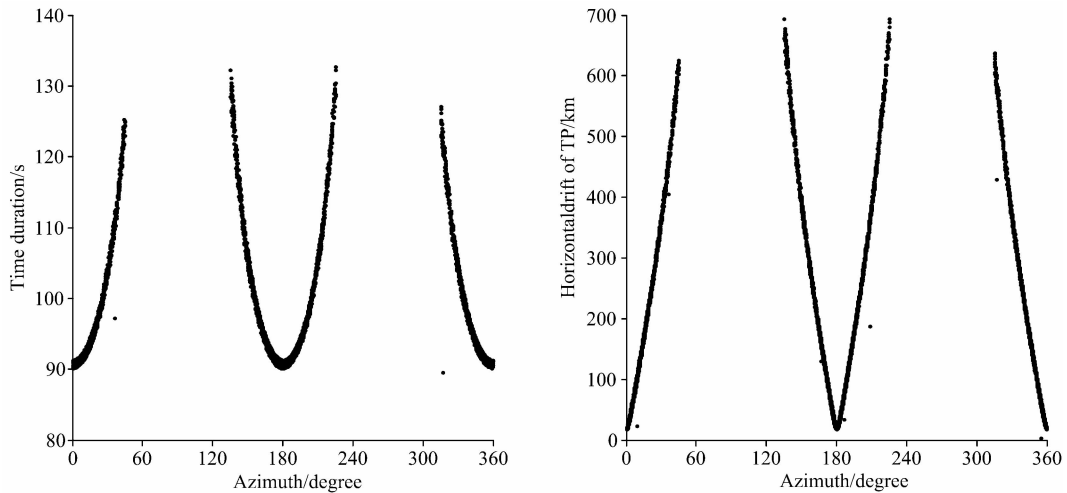


图 5 星光掩星持续时间和掩星切点水平漂移随方位角的变化

Fig. 5 Stellar occultation time duration and tangent point horizontal drift with azimuth

条件下,在 24 h 内星光掩星事件有 5 563 次,在经度方向分布均匀,在低纬度数量最多。考虑到掩星时长,选择掩星方位角在 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$, $135^{\circ}\sim 225^{\circ}$, $315^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 的正常掩星,共 4 353 次,平均持续时间为 1.5 min,切点水平漂移在 18~600 km。

(3) 在实际观测中,一方面仪器追踪目标恒星并将其置于视野中央需要一定的时间,另一方面,仿真过程认为大气为真空,而在实际的大气中星会由于强闪烁、云层等原因,使得星星消失。此外,观测过程还与 LEO 卫星的工作状态有关。因此,在实际环境中,掩星事件将少于仿真的数量。

针对以上的模拟结果,我们做如下的讨论:

(1) 太阳作为视星等最低的恒星,其亮度对其他恒星的

影响不可忽略,因此在实际的掩星观测过程中,探测器需要背对太阳进行观测,以便去除太阳对目标恒星的影响。

(2) 追踪目标星的系统通过平面镜和星形追踪器完成,当一颗目标星掩星事件结束后进行下一颗目标星的追踪。在载荷只有一台望远镜的情况下,我们需要设置观测时间间隔,因为目标星的经纬度分布比较均匀,因此望远镜需要根据目标星的方位来进行方向调整,这个过程需要一定的时间,该仿真过程时间间隔设置为 10 s。

(3) 考虑侧面掩星的观测时间长,因此应当设置方位角的角度范围,优选正常掩星;此外,上升掩星由于受到大气折射的作用,捕捉难度大,因而要尽量选择下降掩星进行观测。

References

- [1] Kyrölä E, Tamminen J, Leppelmeier G W, et al. *Advances in Space Research*, 2004, 33: 1020.
- [2] Bertaux J L, Kyrölä E, Fussen D, et al. *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, 10: 12091.
- [3] Hays P B, Roble R G. *Planetary and Space Science*, 1973, 21: 339.
- [4] William H S, Jeng H Y, Ronald J, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D20): 39-1.
- [5] Bertaux J L, Hanchecorne A, Dalaudier F, et al. *Advances in Space Research*, 2004, 33: 1029.
- [6] Festou M C, Atreya S K, Donahue T M, et al. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86: 5715.
- [7] William E M, Nicholas M S, Gregory M H, et al. *Space Science Reviews*, 2015, 195: 75.
- [8] Bertaux J L, Nevejans D, Korabiev O, et al. *Planetary and Space Science*, 2007, 55: 1673.
- [9] Quémerais E, Bertaux J L, Korabiev O, et al. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(E9): E09S04.
- [10] CHEN Chao, GE Yu-chao, ZHANG Fa-qi, et al(陈超,葛余超,张发奇,等). *Geomatics and Spatial Information Technology(测绘与空间地理信息)*, 2014, 37(2): 223.
- [11] ZHANG Han-wei, ZHENG Yong, MA Gao-feng(张捍卫,郑勇,马高峰). *Journal of Geodesy and Geodynamics(大地测量与地球动力学)*, 2011, 31(1): 63.
- [12] Gérard Petit, Brian Luzum. *IERS Technical Note*, 2010, 36: 1019.
- [13] SUN Li-gang, WU Xiao-cheng, HU Xiong(孙立刚,吴小成,胡雄). *Chin. J. Space Sci. (空间科学学报)*, 2017, 37(5): 574.

Analysis of Simulation Results of Orbit Observation of Stellar Occultation Technology

SUN Ming-chen^{1,2}, WU Xiao-cheng^{1*}, HU Xiong¹

1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Stellar occultation is an effective means of measuring the trace components density, temperature, aerosol, etc. on the Earth and other planets using stellar spectra. The detection principle mainly shows different absorption characteristics in different positions of the stellar spectrum according to different atmospheric components, and the specific performance is as follows: the ultraviolet band can measure ozone, oxygen, hydrogen, etc., the visible spectrum can detect nitrogen dioxide, nitrogen trioxide, oxygen, etc., and infrared can detect water vapor, aerosol, methane, carbon dioxide, oxygen and so on. The realization process of the stellar occultation is: when the LEO satellite and the stars are located on both sides of the earth, the light emitted by the star passes through the absorption and scattering of the earth's atmosphere, and is received by the LEO on the other side, which constitutes an occultation observation. According to the spectral flow, the magnitude range of stars is obtained, and the distribution of stars in the celestial coordinate system and different spectral types are given, as well as the atmospheric components detectable by each spectral type. The stellar-LEO occultation orbit observation simulation is carried out using the relative positions of the stars and LEO satellite in the ground-solid coordinate system. The basic process is: firstly, reading the orbital position of the LEO satellite and the position of the target star, setting the simulation time of 24 hours, and then judging whether it is in the occultation state. When the occultation starts, parameters of occultation, such as the latitude and longitude are calculated and output until the end of the simulation time, which involves the process of the stellar transformation from the celestial coordinate system to the ground-solid system and calculation of LEO satellite orbit, occultation point latitude and longitude, etc. Through calculation and analysis of the daily measurement, global distribution, duration, and drift velocity of the occultation event according to the simulation process, the following results are obtained: (1) The target stars have a certain number of distributions in the whole sky zone. (2) During the 24-hour orbital simulation of the stellar occultation, the daily observation is 5 563 times, including 2 737 rising occultations and 2 826 descending occultations. (3) From the perspective of global distribution, occultation events are mainly distributed at low latitudes, with the least two poles, the other latitudes are equal, the longitude direction is evenly distributed. (4) According to the azimuthal distribution, the normal occultation ratio is 78.25%, the average duration is 1.5 minutes, and horizontal drift of the tangent point is between 18 and 600 km. (5) The side occultation is 21.75%, longer than the normal occultation, the horizontal drift speed of the tangent point is large, and the azimuth angle is also large. The above results provide theoretical guidance for satellite orbit design and detection of load design.

Keywords Stellar occultation; Spectral type; Satellite; Duration; Drift speed

(Received Nov. 20, 2018; accepted Apr. 6, 2019)

* Corresponding author