

单颗 LEO 卫星轨道参数对 GPS 掩星事件分布和数量影响的模拟研究

徐晓华¹ 李征航¹ 罗 佳¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:针对利用 LEO 星载 GPS 接收机对 GPS 卫星进行掩星观测的任务,在建立 LEO 卫星轨道模拟系统的基础上,考虑卫星几何关系和天线视场的情况下,对掩星事件进行了模拟。分析了对于单颗 LEO 卫星,掩星事件的分布和数量随着 LEO 轨道参数包括轨道升交角距、升交点赤经、轨道高度和倾角而变化的规律,并得出了相应结论。

关键词:LEO 卫星;掩星;轨道参数

中图法分类号:P228.42

利用装载星载 GPS 接收机的 LEO 卫星,可以对 GPS 卫星进行掩星观测。这些观测量能够提供丰富的大气信息,并为诸如大气监测、天气预报等领域提供服务。在实施掩星观测的 LEO 计划中,系统的评价、设计和实施都必须建立在有效的模拟设计基础之上。本文的主要目的是利用 LEO 卫星轨道模拟系统,在考虑 LEO 和 GPS 卫星几何关系以及掩星观测天线的视场的条件下,对全球范围内的掩星事件进行模拟。分别通过调整卫星的升交角距(argument of latitude, AOL)、卫星升交点赤经(right ascension of ascending node, RAAN)、卫星轨道高度和卫星轨道倾角的情况下对掩星事件所进行的模拟计算,分析了 LEO 卫星各轨道参数对 GPS 掩星事件的分布和数量的影响。

1 掩星事件模拟基础

本文对掩星事件的模拟是建立在 LEO 卫星轨道模拟系统基础上的。在近地空间运行的 LEO 卫星会受到各种力的影响,导致卫星实际轨道相对于 Kepler 轨道产生偏离的摄动力包括保守力与非保守力两类^[1]。由于非保守力对卫星轨

道的影响远小于保守力,因此,本文模拟只考虑了保守力部分。

在掩星事件的模拟中,判断掩星事件是否发生主要考虑如下两个步骤。

1) 确定 LEO 与 GPS 卫星在几何关系上是否构成掩星,这是通过判断 LEO 与 GPS 连线是否穿过地球大气特定圈层而定的。由于目前主要关注的是利用掩星事件反演地球中性大气层的信息,因此,将这个圈层定义为距地面 0~80 km 的范围。

2) 在几何关系上发生掩星的基础上,进一步考虑天线视场范围对信号接收的影响,确定在考虑了天线视场范围的几何关系情况下是否构成掩星事件,即确定 LEO 与 GPS 连线方向是否在天线的视场范围之内。

在步骤 2) 中,为了确定卫星连线方向和天线指向在惯性系中的夹角,首先需要确定惯性系中这两个矢量的指向,因此,主要问题是确定惯性系中的天线指向。由于天线在卫星固联坐标系(sbf)中的指向在卫星设计阶段就已确定,因此,问题转化为确定 sbf 在惯性系中的指向,其中需要卫星的姿态数据。本文在模拟中对此进行了合理的简化,即假设卫星在运行中姿态稳定,而且

sbf 的三轴与卫星轨道坐标系(RTN)的三轴依次平行。由于卫星实际运行时,通常都需要保证卫星按照设计的姿态运行,此时 sbf 的三轴与 RTN 三轴相差很小的角度,这对掩星分布的影响甚微。在这样的近似考虑下,根据 RTN 与惯性系的转换关系和天线在 sbf 下的参数,就可以将天线的指向转换为惯性系下的矢量方向了。得到卫星连线方向和天线指向这两个矢量的夹角后,就可以确定信号的入射方向是否在由天线的极限功率波束宽(TPBW)所确定的天线视场范围内。

2 参数设置

实施掩星观测的 LEO 卫星大都是多用途卫星,以 CHAMP 和 GRACE 为例,它们都处在高度为 500 km 左右的近圆轨道上,倾角接近 90°。针对这类测地 LEO 卫星,本文按照表 1 中的轨道参数设置进行了模拟计算,由于是近圆轨道,模拟中轨道偏心率设置为一很小的常数。

表 1 LEO 卫星轨道参数设置

	研究对象			
	AOL/(°)	RAAN/(°)	高度/km	倾角/(°)
AOL/(°)	0~360	0	0	0
RAAN/(°)	0	0~360	0	0
高度/km	500	500	300~1 500	500
倾角/(°)	90	90	90	0~90
轨道偏心率	0.002	0.002	0.002	0.002

在模拟中考虑了 28 颗 GPS 卫星,LEO 卫星采用了两个星载 GPS 接收机天线,可以同时观测上升与下降掩星事件。两个天线的特性参数设定如表 2 所示。

表 2 天线参数设定

	GPS Antenna Parameters Settings			
	天线类型	高度角/(°)	方位角/(°)	TPBW/(°)
1	圆锥形	27.0	180.0	45.0
2	圆锥形	27.0	0.0	45.03

3 LEO 卫星轨道参数影响的模拟结果与分析

3.1 升交角距的影响

由于实施掩星观测的 LEO 卫星大都运行在小偏心率轨道上,可以利用 AOL^[2]代替近地点角和真近点角的变化规律。

按照表 1 中的相关设定,模拟了 AOL 以 10 为阶梯在 0~350°之间递增变化时,掩星事件在

全球的分布。发现在沿经度方向,AOL 的变化对于掩星事件的分布没有本质的影响;在沿纬度方向,掩星事件的分布有较小幅度的变化,但总体而言,在南北纬 60°内是掩星事件数量比较多的区域。作为代表,图 1 列出了 AOL 分别为 0°、240°时掩星事件沿经纬度分布的情况。

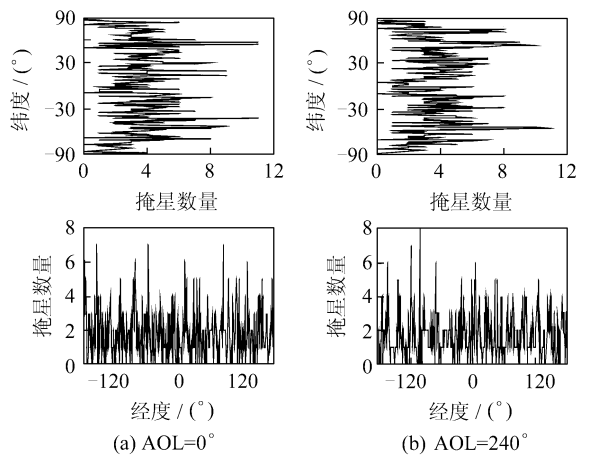


图 1 掩星事件分布随 AOL 的变化
Fig. 1 Impact of AOL on the Distribution of Occultation Events

图 2 为掩星事件的分布随 AOL 的变化。由图 2 可以发现,对于该类 LEO 实施掩星观测,掩星事件数量与 AOL 没有显著的关联,AOL 在 0~350°间变化时,掩星事件数量在 635 次附近变化,变化幅度不超过±15 次。同时,由于 AOL 是随时间变化的量,在轨道设计和控制时,不可能随意控制卫星在特定历元的 AOL,所以对实施掩星观测的 LEO 进行轨道设计时,这部分的影响较小。

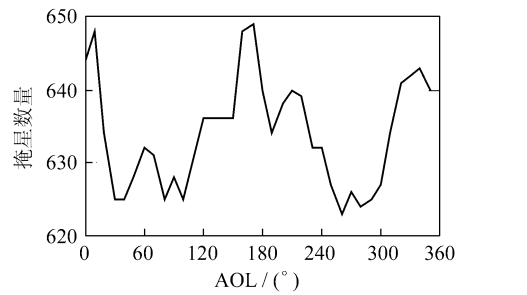


图 2 掩星事件数量随 AOL 的变化
Fig. 2 Impact of AOL on the Number of Occultation Events

3.2 升交点赤经的影响

按照表 1 中的设定,对 RAAN 进行的模拟研究发现,在掩星事件的空间分布上,RAAN 的变化无论对沿纬度方向还是沿经度方向的影响都不显著,但不同的 RAAN 对于掩星事件数量的影响明显强于 AOL 对于掩星事件数量的影响。如图 3 所

示,当 RAAN 在 $0\sim 350^\circ$ 变化时,掩星数量呈规律性的波动变化,平均约为 680 次,波动幅度不超过 ± 55 次。这对于卫星的设计将产生一定的影响。

LEO 的运行高度,以利于获得较多的掩星事件。

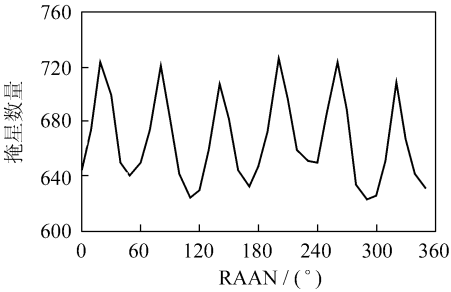


图 3 掩星事件数量随 RAAN 的变化
Fig. 3 Impact of RAAN on the Number of Occultation Events

此外,掩星事件的分布和数量近似具有以 180° RAAN 为周期的变化规律。掩星数量在 RAAN 为 $0\sim 180^\circ$ 之间变化的波峰和波谷,加上 180° 后,也基本对应掩星数量的波峰或波谷。

3.3 轨道高度的影响

卫星高度是卫星轨道设计中的重要参数。一方面要考虑任务的需要,另一方面还要考虑控制的难度和卫星的寿命。按照表 1 中的参数设置,对轨道高度在 $300\sim 1\,500\text{ km}$ 间以 100 km 为阶梯变化时,对应的掩星事件的模拟计算发现,在掩星事件的空间分布上,LEO 卫星轨道高度的上升对于掩星事件的分布没有显著影响。但由图 4 可见,LEO 轨道高度在 $300\sim 1\,200\text{ km}$ 区间变化时,随着轨道高度的递增,掩星数量逐渐减少;而当 LEO 轨道高度上升到 $1\,200\text{ km}$ 时,会产生一个明显的 30 次左右的掩星事件的阶梯性变化,之后,减少的趋势又趋于缓和。在实施 LEO 任务时,应该适当降低

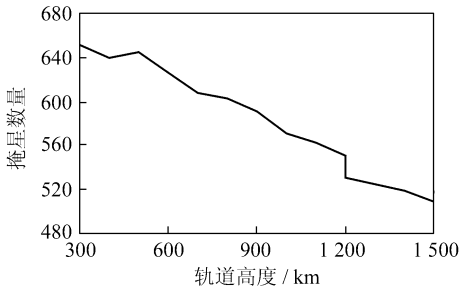


图 4 掩星事件数量随卫星轨道高度的变化
Fig. 4 Impact of Orbit Height on the Number of Occultation Events

3.4 轨道倾角的影响

图 5(a)~5(d)分别列出了不同轨道倾角下掩星事件数量随经纬度变化的情况。可以发现,卫星轨道倾角是影响掩星事件沿纬度方向分布的重要因素。当倾角在 10° 附近时,虽然有较多的掩星数,但是掩星事件集中在南北纬 30° 以内,这对于普通意义下的 LEO 掩星任务是不利的。随着卫星倾角的增大,掩星沿纬度方向的分布趋于均匀,明显可以看出,随着倾角的增大,高纬度地区的掩星事件也逐渐增加,并且向纬度 90° 方向扩展,这对于利用掩星手段研究全球和极地大气是很有意义的,所以通常实施掩星观测的卫星都需要设计在较大的倾角轨道上。图 6 表明,就掩星事件数量而言,当轨道倾角由 $60^\circ\sim 80^\circ$ 变化时,掩星事件数量有一个急剧增加的过程,从 595 次左右增加到 645 次左右。

由于 GPS 卫星是顺行轨道(倾角小于 90°),所以当 LEO 的轨道倾角大于 90° 时,可能获得更多的掩星事件(LEO 与 GPS 相向而行),但是由

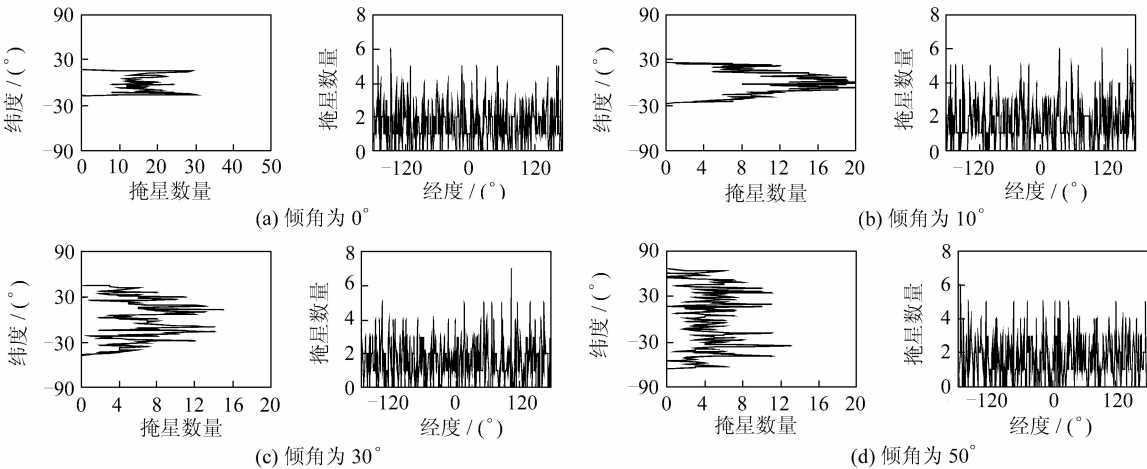


图 5 掩星事件分布随轨道倾角的变化
Fig. 5 Impact of Orbit Inclination on the Distribution of Occultation Events

于它们之间的相对速度过大,很难保证获取高质量的掩星事件。所以当前在设计实施掩星的 LEO 任务时,都考虑将 LEO 设计为顺行轨道(LEO 与 GPS 同向运行)。

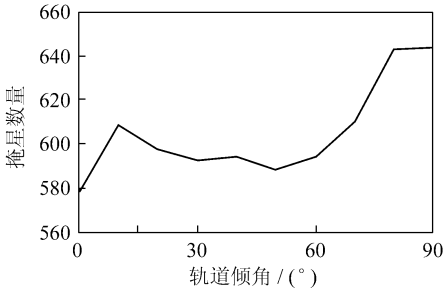


图 6 掩星事件数量随倾角的变化

Fig. 6 Impact of Orbit Inclination on the Number of Occultation Events

4 结 语

为了服务于大气和气象领域,LEO 卫星的轨道设计要求实现掩星观测全球分布均匀而且数量尽可能多。本文在建立 LEO 卫星轨道模拟系统的基础上,利用该系统模拟计算并分析了在其他轨道参数不变、GPS 掩星观测天线参数设定的情况下,LEO 卫星的轨道升交角距、升交点赤经、轨道高度和倾角分别变化时对全球内掩星事件的分布和数量的影响规律。

目前,本文对掩星事件的模拟还没有考虑进行掩星观测的 GPS 天线性能对于信号接收的影响,这需要利用接收信号方向的天线增益和信号强度确定 GPS 信号能否为 LEO 卫星上的接收机所接收。另外,由于单颗 LEO 卫星所观测的掩星事件无论在空间还是时间分布上都有局限性,研究 LEO 星座的掩星观测情况很有必要,这些内容都将是下一步的工作目标。

参 考 文 献

1 周忠谟,易杰军,周 琪. GPS 卫星测量原理与应用. 北京:测绘出版社,1997

2 肖 峰. 人造地球卫星轨道摄动理论. 北京:国防科技大学出版社,1995

3 Kirchengast G. Orbit Quality Requirements for Spaceborne Atmospheric Sounding Using GNSS. The EGS XXIII General Assembly, Nice, France, 1998

4 黄 栋. GPS 无线电掩星技术监测地球大气:[博士论文]. 上海:上海天文台,1999

5 刘 林. 人造地球卫星轨道力学. 北京:高等教育出版社,1992

6 徐晓华. 利用 GNSS 无线电掩星技术探测地球大气的研究:[博士论文]. 武汉:武汉大学,2003

第一作者简介:徐晓华,博士。现主要从事 GPS 气象学方面的研究。
E-mail:xh xu@sgg. wtusm. edu. cn

Simulation of the Impacts of Single LEO Satellite Orbit Parameters on the Distribution and Number of Occultation Events

XU Xiaohua¹ LI Zhenghang¹ LUO Jia¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Focused on the task of carrying out GPS occultation observations with a receiver set on LEO satellite, this paper develops the LEO orbit simulation system based on which the occultation events can be simulated taking into account the geometric relationship of the satellites and the field of view of the receiver antenna. In this paper, the impacts of 4 types of LEO orbit parameters—argument of latitude(AOL), right ascension of ascending node (RAAN), orbit height and inclination—on the distribution and number of occultation events a single LEO satellite observed are discussed through simulation and some conclusions are drawn.

Key words: LEO satellite; occultation; orbit parameters

About the first author: XU Xiaohua, Ph. D. She is concentrated on the research of GPS meteorology.
E-mail: xh xu@sgg. wtusm. edu. cn