

GPS 掩星切点水平漂移规律的数值研究*

孙学金 赵世军 余 鹏

(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

摘 要

在现有 GPS 星座和大气球对称假设条件下,利用射线追踪法对掩星事件进行了数值模拟,讨论了大气折射指数垂直分布、LEO 卫星轨道倾角和高度对 GPS 掩星切点水平漂移的影响情况。结果表明:在太阳活动剧烈的白天和夜间两种典型情况下,切点平均水平漂移变化约 20 km;对 735 km 高度的 LEO 卫星来说,轨道倾角在 130°附近时,切点平均水平漂移最小,并随着倾角向 0°或 180°变化,切点平均水平漂移均增大,但在 55°附近时随倾角变化稍有波动;对倾角为 70°的 LEO 卫星来说,当轨道高度从 400 km 变化到 1500 km 时,切点平均水平漂移变化约 141 km,且随高度增加而单调减小。

关键词: GPS LEO 掩星事件 切点水平漂移

引 言

建立在坚实的理论依据和技术基础之上,美国于 1995 年 4 月 3 日首先发射了用于 GPS 掩星技术遥感地球大气的低地球轨道卫星(LEO) Microlab-I,它的观测结果充分证实了 GPS 掩星技术探测地球大气的可行性和科学意义^[1],从而提供了一种新的探测地球大气的方法,引起了国际同行的广泛关注。每颗 LEO 卫星在现有 GPS 星座下,每天可发生大约 600 多次掩星事件,从而得到 600 多条大气折射率廓线以及温度、气压、湿度廓线。若发射多颗 LEO 卫星进行掩星观测,并选择适当的轨道参数则可获得全球分布的更多的探测资料。目前,丹麦、南非、德国、阿根廷都相继发射了用于 GPS 掩星探测的 LEO 卫星,欧洲的 ACE+ 计划以及美国与中国台湾地区合作的 COSMIC 计划(均由 6 颗 LEO 卫星组成)也正在积极运作中。

在一次掩星事件发生的过程中(持续时间约 1 min),GPS 射线从横切中性大气层顶到横切地球表面,随着时间的变化,掩星切点(射线离地球最近的点)不仅高度上发生变化,而且,掩星切点在水平方向上也会发生变化^[2],这种变化称之为掩星切点的水平漂移。一次掩星事件切点水平漂移的区域跨度很大,从地面到中性大气层顶,掩星切点跨度一般在二、三百公里以上。考虑到掩星反演的结果实际代表的是射线路径上的平均情况,因此 GPS 掩星测量的是水平方向几百公里的移动平均值,从而限制了掩星探测结果在中、小尺度天气上的应用。

要使 GPS 掩星探测结果能有效地应用于气象研究,必须了解掩星探测的数量和分布

* 2002-10-29 收到,2003-04-06 收到修改稿。

规律,以及掩星切点的水平漂移变化规律。在文献[3]中,我们已经研究了 LEO 卫星轨道参数对掩星数量和全球分布的影响情况,在此将进一步探讨 GPS 掩星切点水平漂移与大气折射指数垂直分布、LEO 卫星的轨道参数(倾角和高度)的关系,从而了解 GPS 掩星切点水平漂移的变化规律,以便发射 LEO 卫星选择轨道参数时,能充分考虑到所需探测的大气尺度的大小,使之适应实际气象应用的需要。

1 计算方法

(1) GPS 卫星和 LEO 卫星的位置模拟

利用实际某参考时刻的 24 颗 GPS 卫星星历和经过地球非球形摄动力修正后得到的 LEO 卫星星历,根据卫星轨道计算模式计算得到这 25 颗卫星在未来一天中任意时刻所处的位置坐标。

(2) 掩星事件的确定

在大气二维球对称假设下,掩星事件的发生与 LEO 卫星和 GPS 卫星之间的地心夹角有关。设发生掩星时,射线横切中层顶(约 86 km)和地表(0 km)时的地心夹角分别为 θ_1 和 θ_2 ,则当 GPS 和 LEO 地心夹角 θ 满足关系式 $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ 时,就可以判断发生了掩星事件。当 θ 从小到大变化时,则为下沉掩星,反之为上升掩星。如果 θ 完全从 θ_1 变化到 θ_2 ,则为完整掩星,反之则为不完全掩星。这样可以达到掩星种类的区分。

本文首先根据中性大气层和电离层的不同物理特性,建立了具有代表性意义的全球大气折射指数垂直分布模型,然后利用射线追踪法^[4]仿真 GPS 信号从 GPS 卫星到 LEO 卫星的传输过程,从而确定 GPS 掩星发生时的 θ_1 和 θ_2 值。最后计算一天中每一时刻每颗 GPS 卫星与 LEO 卫星之间的地心夹角,根据上述 GPS 卫星和 LEO 卫星间的地心夹角约束关系,确定是否发生掩星事件。

(3) 水平漂移的计算

当确定了掩星事件发生后,根据 GPS 卫星和 LEO 卫星的位置坐标,通过射线追踪法确定射线近地点(切点)所在处的坐标,并将此坐标投影到地球表面上得到切点投影点。在一次掩星事件中,投影点在地球表面上会发生水平漂移。根据漂移轨迹,计算其几何中心作为本次掩星事件在地球上的位置,并求出水平漂移的大小。

由于利用掩星探测结果来反演大气参数垂直廓线,是基于大气球对称假设的基础之上的,而大气球对称假设不能无限制外推,为此,我们在下述讨论中只考虑了切点水平漂移小于 600 km 的掩星。

2 大气折射指数垂直分布对掩星切点水平漂移的影响

实际大气中的折射指数垂直分布随季节、一天中的不同时刻、太阳活动情况的不同而变,为了讨论方便,我们选择了太阳活动剧烈时的两种典型大气折射指数垂直分布:一种为白天的情况,另一种为夜晚的情况。通过模拟这两种情况下一天中发生的掩星事件,来研究不同大气折射指数垂直分布对 GPS 掩星切点水平漂移的影响。

(1) 廓线一

假设 $h > 1000 \text{ km}$ 的地球大气折射指数为 0。对 $h \leq 86 \text{ km}$ 的中性大气,采用中国绝大多数地区都符合的单指数模型^[5]:

$$N = 347 \exp(-0.137 h) \quad h < 9 \text{ km} \quad (1)$$

$$N = 101.1 \exp[-0.137(h - 9)] \quad 86 \text{ km} \geq h \geq 9 \text{ km} \quad (2)$$

对电离层,采用 2 个 Chapman 廓线的组合来表示电离层 E 层和 F 层的电子浓度分布^[6],未考虑 F1 层和 D 层:

$$N_e = N_e(h_0) \exp\left\{\frac{1}{2}\left[1 - \frac{h - h_0}{H} - \exp\left(-\frac{h - h_0}{H}\right)\right]\right\} \quad (3)$$

式中 $N_e(h_0)$ 为最大电子浓度, h 为距地面的高度, h_0 为最大电子浓度距地面的高度, H 为尺度高度。在太阳活动剧烈时的白天典型情况下,对 E 层,取 $N_e(h_0) = 2 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$, $h_0 = 105 \text{ km}$, $H = 5 \text{ km}$;对 F 层,取 $N_e(h_0) = 3 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$, $h_0 = 300 \text{ km}$, $H = 60 \text{ km}$ 。在电离层中,大气折射指数与电子浓度和电磁波频率的关系为:

$$N = -4.028 \times 10^7 N_e / f^2 \quad (4)$$

(2) 廓线二

对中性大气($h \leq 86 \text{ km}$),采用国际电信联盟(ITU)所属的国际无线电咨询委员会(CCIR)建议采用的作为世界性的折射指数参考大气模型^[5]:

$$N = 315 \exp(-0.136 h) \quad (5)$$

其中 h 为距地面的高度。

对电离层,由于白天和夜晚的电子浓度一般相差在一个数量级,因此,将 E 层和 F 层白天时的峰值电子浓度减小一个数量级,得到夜晚时的电离层电子浓度分布。然后再根据式(4)得到电离层中折射指数分布廓线二。两条大气折射指数分布廓线如图 1 所示。

以近似 Microlab-I 轨道参数为例(倾角 70° , 高度 735 km),用上述大气折射指数分布廓线计算得到的水平漂移结果列于表 1。为了讨论不同纬度地区掩星切点水平漂移情况,我们把地球按照纬度分为:低纬地区($0^\circ \sim 30^\circ$ 纬度)、中纬地区($30^\circ \sim 60^\circ$ 纬度)和高纬地区($60^\circ \sim 90^\circ$ 纬度)。

从表中可以看到,两种情况下发生的所有掩星的切点水平漂移平均分别为

433.725 km 和 413.032 km ,并且在 中纬地区的切点平均水平漂移均比 高纬和低纬地区大,低纬地区切点平均水平漂移最小,中纬地区平均要比低纬地区约大 36 km 。比较两种

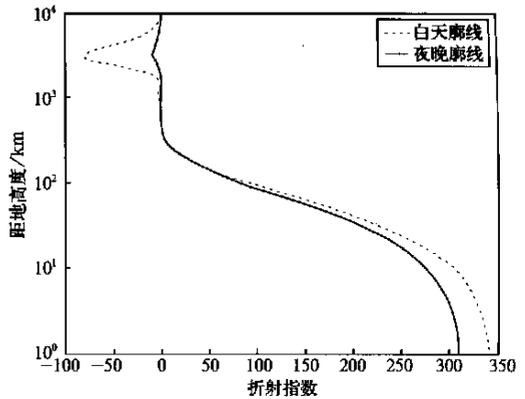


图 1 大气折射指数垂直分布图

表 1 两种大气折射指数垂直分布时的

水平漂移	水平漂移		km
	廓线一	廓线二	
全球平均	433.725	413.032	20.693
高纬平均	430.747	408.724	22.023
中纬平均	452.086	430.615	21.471
低纬平均	414.914	395.897	19.017

大气折射指数廓线下的切点水平漂移,可发现无论是所有掩星事件平均,还是按不同纬度平均,两者相差均约 20 km 左右。总的来说,一天中大气折射指数分布廓线变化所引起的掩星切点水平漂移的变化,相对于掩星切点水平漂移的地理分布变化要小些。

3 轨道倾角对掩星切点水平漂移的影响

基于大气折射指数分布廓线一,固定 LEO 卫星的轨道高度(735 km),通过改变轨道倾角进行数值模拟,研究 LEO 轨道倾角对掩星切点水平漂移的影响规律。不同轨道倾角下一天的掩星事件切点平均水平漂移的计算结果如图 2 所示。

由图 2 可以看到,随轨道倾角的增加,掩星切点的平均水平漂移首先不断减小,在 55° 附近出现波动,然后继续减小到约 130° 后又开始增加。当轨道倾角为 10° 时,切点平均水平漂移为 381 km;当轨道倾角为 130° 时,切点平均水平漂移达 332 km,两者相差 49 km。由此可见,不同的 LEO 卫星轨道倾角对掩星的切点水平漂移有较大影响,倾角接近于 0° 或 180° 时,由于 LEO 卫星在赤道上空运行,因此其与 GPS 卫星之间的掩星事件大多发生在中低纬,水平漂移较大;当轨道倾角在 130° 附近时,此时 LEO 卫星的轨道平面与某一 GPS 卫星的轨道平面(其倾角为 55°)几乎重合。而且 GPS 卫星和 LEO 卫星向相反方向运动,掩星事件的持续时间短,掩星的切点水平漂移也最小。在其它轨道倾角时,随二轨道面之间的夹角和卫星的运动方向的不同,掩星事件的持续时间变化不一,掩星的切点水平漂移也不断变化。深入讨论轨道倾角变化对水平漂移的影响是相当复杂的,因为还需要考虑到 LEO 卫星的升交点变化的影响。

为了了解不同纬度地区在不同轨道倾角下掩星事件的切点水平漂移情况,我们分别进行了统计,结果如图 3 所示。可以看到,低纬地区的掩星切点水平漂移随倾角的变化较小,而中纬地区和高纬地区则变化较大,变化曲线以 90° 倾角近似对称。LEO 卫星轨道倾角和地球赤道平面夹角较小(倾角小于 30° 或大于 150°)时,高纬地区几乎不发生掩星事

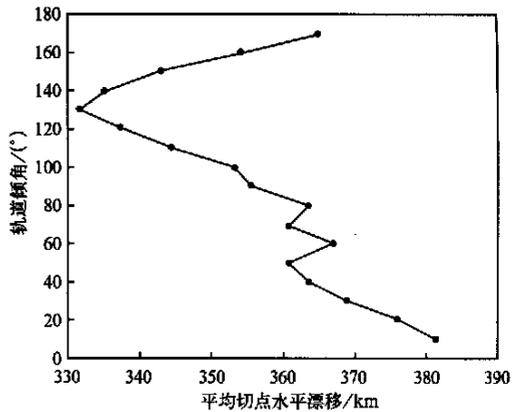


图 2 不同轨道倾角下掩星切点水平漂移变化

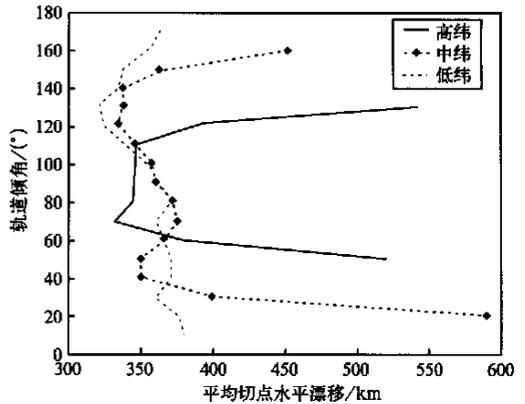


图 3 不同轨道倾角下不同地区掩星切点的水平漂移变化

件^[3],此时中纬地区的切点水平漂移比低纬地区显著增大;而夹角较大(倾角为 60°至 110°)时,各纬度地区的切点水平漂移相差不大,高纬地区稍小。

4 轨道高度对掩星切点水平漂移的影响

在大气折射指数分布廓线一的情况下,固定 LEO 卫星的轨道倾角(70°)下,通过改变轨道高度进行数值模拟,来研究 LEO 卫星轨道高度的变化对掩星事件的切点水平漂移的影响。不同轨道高度下一天的掩星事件的切点水平漂移的统计结果如图 4 所示。

由图 4 可以看到,掩星切点的平均水平漂移随轨道高度的增加而单调减小。当轨道高度为 400 km 时,切点平均水平漂移为 435 km,当轨道高度为 1500 km 时,切点平均水平漂移为 294 km,相差 141 km。由此可见,LEO 卫星的轨道高度对掩星切点水平漂移的影响也比较大。

进一步对掩星事件的切点水平漂移按纬度分别进行统计,其结果如图 5 所示。可以看出,在 LEO 卫星倾角为 70°的情况下,对一定的轨道高度,高纬地区的切点平均水平漂移最小,低纬地区次之,中纬地区大,但在轨道高度约小于 450 km 时,中纬地区掩星切点平均水平漂移略比低纬地区小。而对不同纬度,切点平均水平漂移均随轨道高度的减小而单调增加。

5 结 语

利用低地球轨道(LEO)卫星上的 GPS 接收机进行地球大气掩星探测,是一种新的地球大气探测手段。由于在整个掩星事件中,GPS 射线的切点从中性大气层顶到地球表面将会有较大的水平漂移,因而反演出的折射率或温度廓线,实际上代表的是较大水平范围的平均情况。由于反演结果常表示为某一地点的折射率或温度垂直分布情况,因而在使用这些掩星探测资料时,应特别注意其所代表的水平尺度。

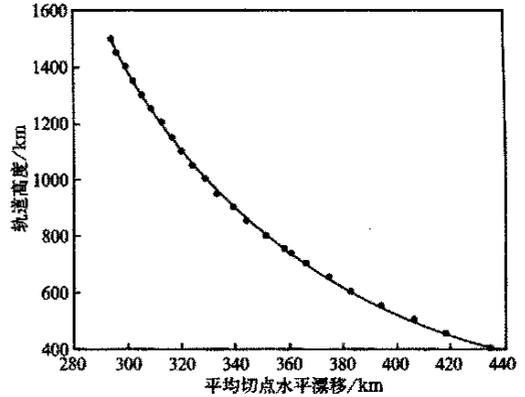


图 4 不同轨道高度下掩星事件的切点水平漂移变化

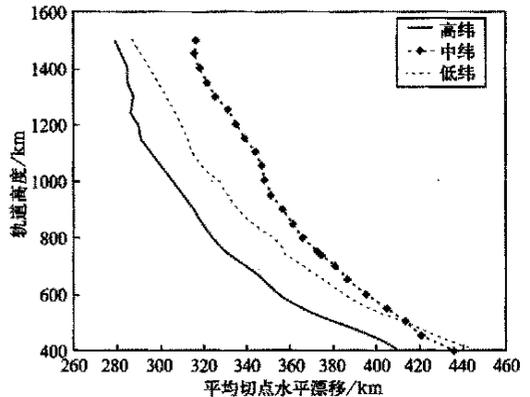


图 5 不同轨道高度下不同地区的掩星事件的切点水平漂移变化

本文在一定的大气折射指数分布模型和现有 GPS 星座下,利用射线追踪法对掩星事件进行了数值模拟,讨论了大气折射指数垂直分布、LEO 卫星的轨道倾角和高度对 GPS 掩星切点水平漂移的影响情况,结果表明:

(1) 在太阳活动较强的白天和夜间两种典型大气折射指数垂直分布情况下,切点平均水平漂移变化不大。中纬地区的切点平均水平漂移要稍大于高纬和低纬地区。这也表明在 LEO 轨道参数一定的情况下,由于一天中大气折射指数的变化引起的切点水平漂移变化不大。

(2) 在 LEO 卫星的轨道高度为 735 km 的情况下,当其轨道倾角在 130° 附近时,切点平均水平漂移最小,其后随着轨道倾角接近 0° 或 180° ,切点平均水平漂移均增大,其中倾角在 55° 附近时,平均水平漂移变化稍有波动。

(3) 在 LEO 卫星的轨道倾角为 70° 的情况下,切点平均水平漂移随着轨道高度的增加而单调减小,且变化较明显。

掩星切点的水平漂移主要由相对地球运动的 GPS 发射机和接收机所决定。当发射机和接收机相向运动时,发生的掩星事件持续时间较短,相应的水平漂移也较小。在切点从中性大气层顶向地表下降的过程中,切点水平漂移与其下降高度的比值也不断增加,从而使得接近地表时的折射率反演精度降低^[2]。

本文在大气球对称假设下,对切点水平漂移变化规律进行了初步讨论。为了深入讨论切点水平漂移的变化规律,还需要进一步在实际大气的情况下,综合考虑 LEO 卫星的倾角、高度和升交点等因子。

由于切点水平漂移代表了反演结果的水平尺度,因而为了使得反演结果对气象应用有效,在发射 LEO 卫星时,应选择适当的轨道参数,本文所得结论对轨道参数的选取也有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Ware R, Exner M, Feng D, et al. GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: Preliminary results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, **77**(1): 19 ~ 38.
- 2 Kursinski E R. The GPS Radio Occultation Concept: Theoretical Performance and Initial Results. In Partial Fulfillment of The Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, California Institute of Technology Pasadena, California, March 17, 1997. 3 - 45 ~ 3 - 47.
- 3 赵世军, 孙学金, 廖仿玉, 等. LEO 卫星轨道参数对 GPS 掩星的影响. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2002, **3**(2): 85 ~ 89.
- 4 Fjeldbo G, Kliore A J, Eshleman V R. The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiments. *Astronomy Journal*, 1971, **76**: 123 ~ 40.
- 5 谢益溪, J·拉菲涅特, J·P·蒙等. 电波传播——超短波·微波·毫米波. 北京: 电子工业出版社, 1990.
- 6 Stig Syndergaard. On the ionosphere calibration in GPS radio occultation measurements. *Radio Science*, 2000, **35**(3): 871.

NUMERICAL STUDY OF THE HORIZONTAL DRIFT OF THE GPS SIGNAL RAY'S PERIGEE IN OCULTATION EVENT

Sun Xuejin Zhao Shijun Yu Peng

(*Institute of Meteorology, PLA Univ. of Sci. and Tech., Nanjing 211101*)

Abstract

The GPS signal ray's perigee from the top of neutral atmosphere to the ground drifts largely in horizontal direction at an occultation event. The occultation event is simulated using the ray-tracking technique on the situation of the specified atmospheric refractive index model and the GPS constellation. The effect of atmospheric refractive index profile, LEO satellite's height and inclination on the horizontal drift of the perigee is studied. The results indicate that the difference between the average horizontal drift on day and that at night is about 20 km, the minimum of the average horizontal drift appears at some inclination 130° and the average horizontal drift increases from inclination 130° to 0° or 180° for a LEO satellite which is at an altitude of 735 km above ground, and the average horizontal drift decreases from 400 km to 1500 km above ground for a LEO satellite at inclination 70° .

Key words: GPS LEO Occultation event Perigee's horizontal drift