

王先毅,孙越强,白伟华等. 北斗掩星事件数量与分布的模拟研究. 地球物理学报, 2013, 56(8): 2522-2530, doi:10. 6038/cjg20130803.

Wang X Y, Sun Y Q, Bai W H, et al. Simulation of number and distribution of Compass occultation events. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(8): 2522-2530, doi:10. 6038/cjg20130803.

# 北斗掩星事件数量与分布的模拟研究

王先毅<sup>1,2</sup>, 孙越强<sup>1</sup>, 白伟华<sup>1</sup>, 杜起飞<sup>1</sup>, 王冬伟<sup>1,2</sup>,

吴迪<sup>1</sup>, 余庆龙<sup>1</sup>, 韩英<sup>3</sup>

1 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 北京石油化工学院, 北京 102617

**摘 要** 北斗卫星导航系统作为我国自主开发的卫星导航系统, 在掩星探测领域有着广泛的应用前景. 文章针对利用 LEO 星载掩星接收机进行北斗掩星探测的任务, 在建立 LEO 卫星轨道模拟系统和北斗全星座模拟系统的基础上, 通过仿真计算研究了不同 LEO 轨道参数条件下北斗掩星事件的特点. 分析了对于单颗 LEO 卫星, 北斗掩星事件的数量和分布随 LEO 轨道参数包括轨道近地点角距、升交点赤经、轨道高度和倾角而变化的规律. 针对北斗导航系统由 GEO、IGSO 和 MEO 三种轨道卫星组成的特点, 对不同类型北斗卫星的掩星事件进行了研究, 并分别总结了三种轨道北斗卫星掩星事件的特点. 研究结果对利用北斗导航系统进行掩星探测有参考作用.

**关键词** 北斗导航系统, 低轨卫星, 掩星, 轨道参数, 模拟

doi:10. 6038/cjg20130803

中图分类号 P405

收稿日期 2012-02-17, 2013-07-12 收修定稿

## Simulation of number and distribution of Compass occultation events

WANG Xian-Yi<sup>1,2</sup>, SUN Yue-Qiang<sup>1</sup>, BAI Wei-Hua<sup>1</sup>, DU Qi-Fei<sup>1</sup>,

WANG Dong-Wei<sup>1,2</sup>, WU Di<sup>1</sup>, YU Qing-Long<sup>1</sup>, HAN Ying<sup>3</sup>

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

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

3 Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China

**Abstract** As a China's self-developed satellite navigation system, Compass has broad application prospects in the field of radio occultation. Focused on the task of carrying out Compass occultation observations with a receiver set on LEO satellite, this work developed a simulation system of LEO orbit and Compass constellations, based on which the occultation events can be simulated taking into account different LEO orbit parameters. The effect of LEO satellite's orbit parameters on occultation events' number and distributions are discussed considering argument of perigee, right ascension of ascending node, orbit height and inclination. Occultation events for different types of Compass satellites, including GEO, IGSO and MEO, are analyzed individually. The characteristics of all three kinds of Compass satellite occultation events were summarized. The results can serve as a reference when the Compass navigation system is used in detection of radio occultation.

**Keywords** Compass navigation system, Low Earth Orbit, Occultation, Orbit parameters, Simulation

## 1 引言

GNSS 无线电掩星探测能提供全球覆盖的地球电离层<sup>[1-3]</sup>和中性大气<sup>[4-8]</sup>剖面,同时具有全天候、长期稳定、高精度和高垂直分辨率等优点,对数值天气预报<sup>[9]</sup>和气候<sup>[10]</sup>研究具有重要作用,在天文、气象、空间以及国防领域具有广泛的应用前景<sup>[11]</sup>. 最初的 GNSS 掩星探测计划是 1995 年的 GPS/MET 计划<sup>[12]</sup>,该计划由美国实施,在低轨卫星上安装了一台 GPS 掩星探测器,对 GNSS 掩星测量地球大气的理论进行了验证. GPS/MET 在轨运行了两年时间,获得了很多宝贵的观测资料. 科学家们利用 GPS/MET 提供的掩星数据,成功地反演得到了中性大气 0~60 km 高度的大气参数剖面<sup>[13-15]</sup>. 结果证明了 GNSS 无线电掩星测量地球大气理论的可行性,从此以后,世界各国开展了许多 GNSS 无线电掩星探测项目<sup>[16]</sup>,掩星探测地球大气技术取得了极大进展.

美国的 GPS 系统是至今为止最完善也最稳定的 GNSS 系统,因此,在已有的掩星探测项目中,使用的 GNSS 信号来源主要为 GPS 卫星信号. 然而,近年来不少国家和地区也在积极研制自己的卫星导航系统. 俄罗斯从 1978 年 10 月开始筹备发射自己的全球导航卫星系统(GLONASS),该系统由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成,均匀分布在 3 个轨道平面上. 欧空局(ESA)也在筹建民用导航卫星系统(GALILEO),到 2011 年底已经发射了 4 颗实验卫星. 然而,GLONASS 和 GALILEO 系统的建设都由于资金问题有所延迟. 中国的北斗卫星导航系统(COMPASS)是我国正在实施的自主研发、独立运行的全球卫星导航系统<sup>[17]</sup>,具有开放性、自主性、兼容性、渐进性的特点,其建设按照“先区域、后全球”的总体思路分步实施,在 2012 年建立包含 14 颗北斗卫星的中国及周边区域导航系统,并将在 2020 年全面建成全球覆盖的北斗卫星导航系统<sup>[18]</sup>. 截止 2011 年底,我国已成功发射了十余颗北斗导航卫星,基本完成了中国区域的覆盖.

GNSS 掩星事件的数量及切点分布与 GNSS 系统的空间卫星星座有着密切关系. 在不同的 GNSS 卫星星座下,需要进行大量的仿真以选择合适的 LEO 轨道参数,用以获取尽量多的掩星数量和全球覆盖并均匀分布的掩星切点. 国内外学者在这方面的的工作针对 GPS 卫星星座的较多. 赵世军等<sup>[19]</sup>在

一定的大气折射指数分布模型和现有 GPS 星座的假设条件下,利用射线追踪法模拟了掩星事件,并讨论了 LEO 卫星的轨道倾角和高度对掩星事件发生的数量和分布的影响. 徐晓华等<sup>[20]</sup>分析了对于单颗 LEO 卫星, GPS 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,并采用数值模拟方法,对不同卫星数和不同星座参数的玫瑰型星座在一天内所观测的掩星事件的数量和分布进行了比较分析<sup>[21]</sup>. 杜晓勇等<sup>[22]</sup>通过仿真计算,定量地讨论了轨道参数对 LEO-LEO 掩星事件数量及分布的影响.

与 GPS 卫星星座由 6 个轨道的 MEO 卫星所构成不同,中国的北斗卫星导航系统空间星座由地球静止轨道<sup>[23]</sup>(GEO)、倾斜地球同步轨道(IGSO)和中圆地球轨道(MEO)三种轨道的卫星组成,并且北斗的 MEO 卫星轨道分布与 GPS 的 MEO 卫星轨道分布有所不同. 现阶段北斗导航系统已基本完成由 14 颗星组成的区域导航系统的建设,在中国区域内具有较好的可见性和定位精度以及良好的可用性<sup>[24]</sup>. 与 GPS 相比,北斗系统可以方便的提供双频或三频载波相位<sup>[25]</sup>,有利于掩星反演. 如何高效地使用北斗卫星星座进行 GNSS 掩星探测值得深入研究. 国内外文献中还未发现描述利用北斗卫星星座,特别是利用北斗 GEO 与 IGSO 卫星进行掩星探测的研究.

本文对全球范围内的北斗掩星事件进行了模拟,并在不同的 LEO 轨道高度、倾角、升交点赤经、近地点角距条件下,对北斗掩星事件的数量和分布进行了仿真分析. 仿真中针对北斗 GEO、IGSO 和 MEO 卫星特点,对其掩星事件特性分别进行了研究. 结论对利用北斗卫星导航系统进行掩星探测具有参考价值.

## 2 北斗掩星事件仿真

本文中采用的北斗导航卫星星座构成参考文献<sup>[26]</sup>,文献中采用了总共 35 颗卫星的北斗星座配置,包括 5 颗 GEO、3 颗 IGSO、27 颗 MEO. 考虑到最新的北斗接口文件<sup>[17]</sup>中包括 5 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星,因此在本文涉及的仿真中将北斗卫星总数扩展为 37,包括 5 颗地球静止轨道(GEO)、5 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星和 27 颗中圆地球轨道(MEO)卫星. 5 颗北斗 GEO 卫星的轨道位置分别为 58.75°E、80°E、110.5°E、140°E

和  $160^{\circ}\text{E}$ . 5 颗北斗 IGSO 卫星的倾角为  $55^{\circ}$ , 交叉点经度为  $118^{\circ}\text{E}$ , 同一时刻的平近点角间隔  $72^{\circ}$ . 27 颗北斗 MEO 卫星分布于升交点赤经分别为  $0^{\circ}$ 、 $120^{\circ}$ 、 $240^{\circ}$ , 倾角为  $55^{\circ}$  的三个轨道平面, 每个轨道上的第一颗卫星在仿真起始时刻的平近点角分别为  $0^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ , 其余卫星平近点角依次增加  $45^{\circ}$ . 此外, 3 个轨道面上备用卫星的平近点角分别为  $10^{\circ}$ 、 $55^{\circ}$  和  $105^{\circ}$ [26]. 北斗的 MEO 卫星倾角与 GPS 倾角接近, 星下点轨迹也较为相似. 北斗 GEO 和 IGSO 卫星的星下点轨迹见图 1, 其中 IGSO 星下点轨迹呈 8 字型, 且 5 颗 IGSO 卫星轨迹重合.

LEO 卫星的轨道参数设置见表 1. 在对某一参数进行研究时, 则把其它参数设置为默认值. 由于是近圆轨道, 轨道偏心率被设置为一很小的常数. 仿真时首先利用卫星开普勒轨道参数, 计算不同时间北斗卫星、LEO 卫星的位置和速度. 然后计算两颗卫星和地球表面的几何关系, 计算地心到两卫星连线切点距离和切点高度, 同时计算出北斗卫星相对于 LEO 卫星的仰角和方位角. 当满足如下条件时, 认为发生一次掩星事件:

- (1) 切点在北斗卫星和 LEO 卫星连线之间;
- (2) 切点高度在  $0\sim 100\text{ km}$  之间;
- (3) 北斗卫星相对于 LEO 的方位角在天线接收范围之内(前后向掩星天线极限功率波束宽都为  $40^{\circ}$ ).

表 1 LEO 卫星的轨道参数设置

Table 1 LEO satellite orbit parameters settings

	倾角 ( $^{\circ}$ )	高度/km	升交点赤经 ( $^{\circ}$ )	近地点角距 ( $^{\circ}$ )	偏心率
默认值	50	800 km	135	0	0.002
研究范围	$0\sim 90$	$300\sim 1500$	$0\sim 360$	$0\sim 360$	0.002

### 3 不同 LEO 轨道参数下北斗掩星事件仿真结果

#### 3.1 不同近地点角距和升交点赤经条件下, 北斗掩星事件分析

分别在不同的 LEO 卫星轨道的近地点角距和升交点赤经条件下, 计算一天中北斗掩星事件数量和分布的变化. 从仿真结果可以看出, 近地点角距和升交点赤经对北斗卫星的掩星事件切点的经度及纬度分布的变化和掩星事件数量和分布影响并不明显.

不同近地点角距条件下对掩星事件数量的仿真结果见图 2a, 由图中可以看出, 一天内的北斗掩星

总数随 LEO 卫星的近地点角距变化不大, 平均掩星次数约为 600 次, 变化范围为  $\pm 10$  次. 其中上升掩星和下降掩星的数量都在 300 次左右. 而不同的北斗卫星造成的掩星事件中, MEO 卫星掩星事件数量最多, 并稳定在 445 次左右, 而 GEO 和 IGSO 掩星事件数量都稳定在 80 次左右. 说明在不同的 LEO 近地点角距条件下, 北斗的三种轨道卫星掩星事件数量都保持稳定. 图 2b 显示了一天内的北斗掩星事件数量随 LEO 升交点赤经变化的规律. 从图中可以看出, MEO 掩星事件数量变化具有周期性, 在 LEO 卫星的升交点赤经在  $60^{\circ}$ 、 $180^{\circ}$  和  $300^{\circ}$  时, 无论是上升还是下降的 MEO 掩星事件数量都位于波谷, 而 MEO 掩星数量的波峰位于波谷的左右  $15^{\circ}$ . 联系仿真中采用的 MEO 三个轨道的升交点赤经设置, 可以发现在 LEO 轨道与 MEO 轨道的升交点赤经互补时, 掩星事件数量达到最低, 实际进行北斗掩星探测时应避免这种情况. 北斗 GEO 掩星事件数量基本稳定不变. 而北斗 IGSO 掩星事件数量变化不大.

#### 3.2 不同轨道高度条件下, 北斗掩星事件分析

按照表 1 中的参数设置, 将 LEO 轨道高度设置为在  $300\sim 1500\text{ km}$  间, 以  $50\text{ km}$  为阶梯变化, 对北斗掩星事件进行了模拟计算. 图 3 显示了一天内的不同 LEO 轨道高度条件下的北斗掩星数量. 从图中可以看出, 不论是 GEO、IGSO 还是 MEO 卫星, 其掩星事件数量都随 LEO 轨道高度呈下降趋势. 而总的北斗掩星事件数量从  $300\text{ km}$  轨道的 690 次下降到  $1500\text{ km}$  轨道的 490 次左右.

另一方面, 在不同的 LEO 轨道高度条件下, 北斗掩星事件切点的地理分布也稍受影响. 图 4 分别显示了 LEO 轨道高度为  $300\text{ km}$  和  $1500\text{ km}$  时的掩星事件切点分布. 对两个高度的掩星事件切点的经度和纬度分布进行比较, 可以发现不同轨道高度下掩星事件切点的经度分布变化不大; 而轨道高度越低, 掩星事件切点的纬度分布越集中, 轨道高度变高, 掩星事件切点的纬度分布趋于分散. 且 LEO 轨道高度对 GEO 卫星掩星事件的影响相对较大, 其切点分布变化较明显.

#### 3.3 不同轨道倾角条件下, 北斗掩星事件分析

设置 LEO 卫星轨道倾角为  $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ , 步长  $5^{\circ}$ , 其它默认参数设置见表 1, 计算一天内北斗掩星事件随卫星轨道倾角的变化. 从仿真中发现, 在不同的轨道倾角条件下, 北斗掩星事件数量和分布的变化较大.

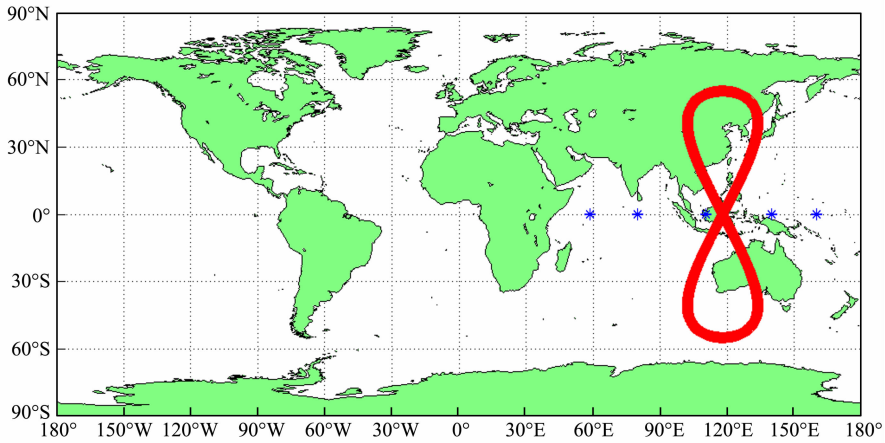


图 1 北斗 GEO 和 IGSO 星下点轨迹

Fig. 1 Subsatellite point track of Compass GEO and IGSO

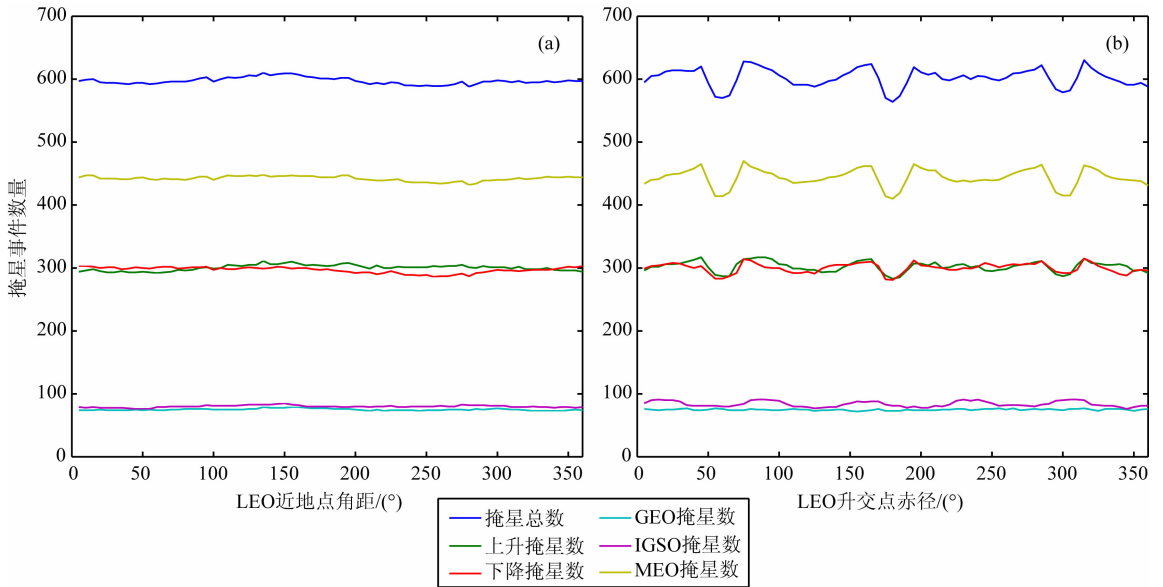


图 2 不同近地点角距和升交点赤经条件下的北斗掩星事件数量

(a)不同近地点角距; (b)不同升交点赤经.

Fig. 2 Compass occultation number variation with LEO's argument of perigee and LEO's right ascension of ascending node

北斗掩星事件数量随轨道倾角变化的曲线见图 5. 图中可以看出,北斗 MEO 掩星事件数量随轨道倾角提高而增加,直到 85°倾角附近开始小幅下降. 而 10°~20°倾角之间北斗 MEO 掩星事件数量有一个急剧增加的过程. 北斗 GEO 掩星事件数量在倾角为 30°以下时保持在 115 次左右,此后掩星事件数量随倾角增加而减小. IGSO 掩星事件数量基本稳定. 总的掩星事件次数的峰值在 20°~30°倾角附近.

而不同的 LEO 轨道倾角条件下,北斗掩星事件的切点分布也变化很大. 图 6 和图 7 分别显示了 LEO 轨道倾角为 30°和 90°时的北斗掩星事件分布. 倾角为 30°时的北斗掩星切点基本集中在北纬 30°

与南纬 30°之间,北斗 GEO 掩星切点都分布在在固定经度点上,而北斗 IGSO 掩星切点基本集中在 0~50°E和 130~180°W 两片区域. 当 LEO 倾角为 90°时,北斗掩星事件切点在高纬度地区的分布明显增加,可以探测到地球极地区域,但赤道区域的掩星事件较为稀少. 与倾角 30°时相比,北斗 GEO 掩星切点分布有明显变化,基本集中在极地附近,且纬度分布不像 30°时一样集中. 北斗 IGSO 掩星切点在 LEO 倾角为 90°时变得较为发散.

在不同的倾角下,对北斗掩星事件切点的经度和纬度分布进行统计的结果见图 8,图中显示了 LEO 轨道倾角  $I$  为 0°、30°、60°、90°时的北斗掩星切

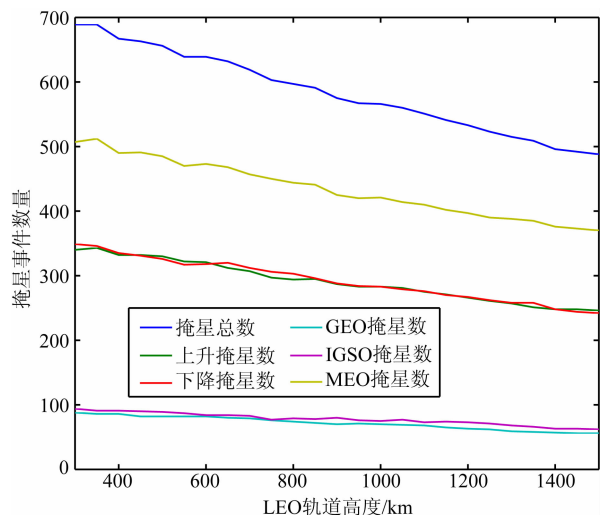


图3 不同 LEO 轨道高度条件下北斗掩星事件数量

Fig. 3 Compass occultation number variation with LEO's orbit height

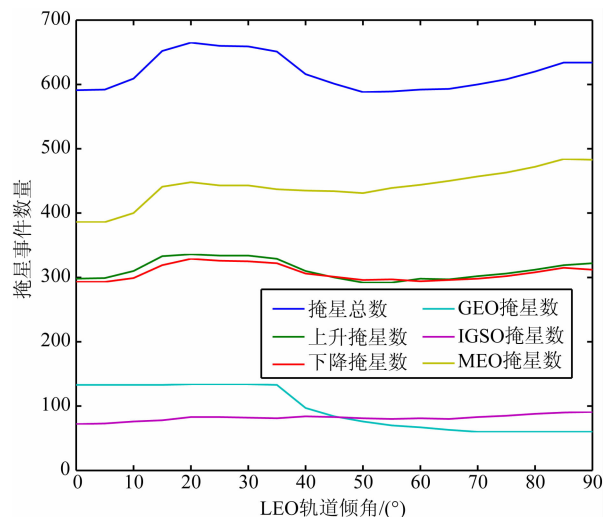


图5 LEO 轨道倾角对北斗掩星数量的影响

Fig. 5 Compass occultation number variation with LEO's orbit inclinations

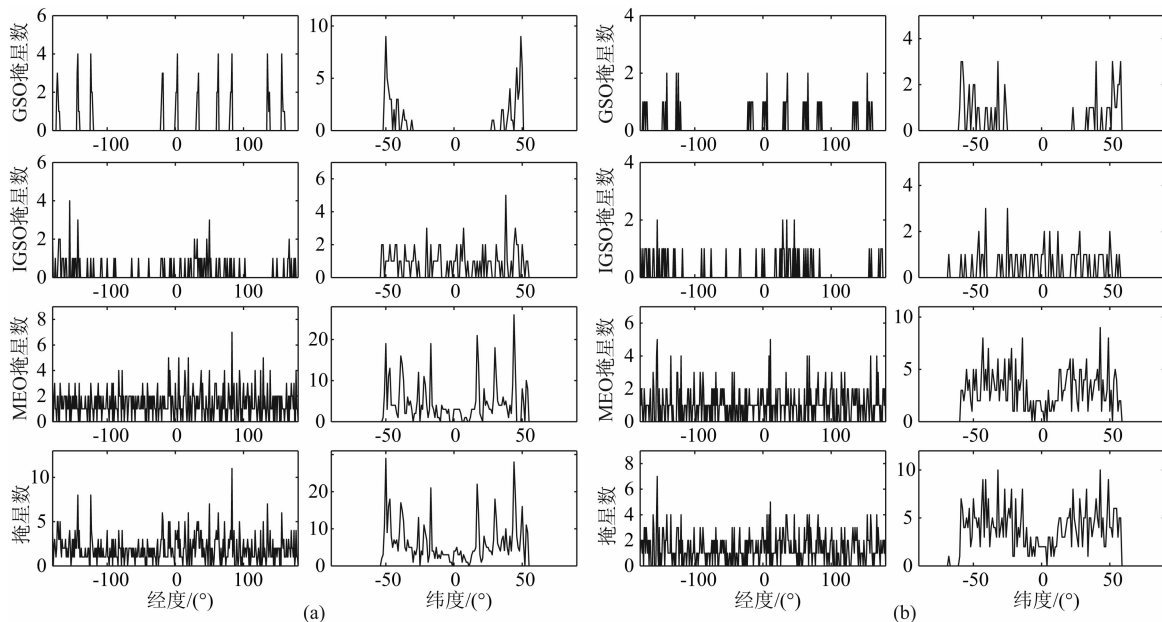


图4 不同 LEO 轨道高度条件下北斗掩星事件切点分布

(a) 300 km 轨道高度; (b) 1500 km 轨道高度.

Fig. 4 Compass occultation latitudinal and longitudinal distribution with various LEO orbit height

点分布. 从图中可以看出: 北斗 GEO 掩星切点分布的峰值位置与倾角选择关系密切, 一般切点分布集中在北纬  $I$  与南纬  $I$  ( $I$  为 LEO 轨道倾角) 附近; 在低倾角情况下掩星事件切点分布集中在几个固定经度点上, 随倾角增大, 经度分布变得分散. 北斗 IGSO 掩星切点较均匀地分布在北纬  $I$  到南纬  $I$  之间; 在低倾角情况下, 北斗 IGSO 掩星切点的经度分布集中在  $150^{\circ}\text{W}$  和  $45^{\circ}\text{E}$  附近, 在高倾角时, 其经度分布也变得较为均匀. 北斗 MEO 掩星切点的经度分布很均匀; 纬度分布则较均匀地分布在北纬  $I$  到

南纬  $I$  之间, 但在倾角较大的情况下, 赤道区域的掩星切点密度较低. 总的北斗掩星事件切点的经度和纬度分布与 MEO 类似, 但在 LEO 轨道倾角较低时, 由于 GEO 掩星事件分布较为集中, 会在固定的经度和纬度点造成尖峰.

## 4 结论

本文模拟并研究了北斗卫星在不同的 LEO 轨道参数条件下的掩星事件数量和分布, 从仿真结果



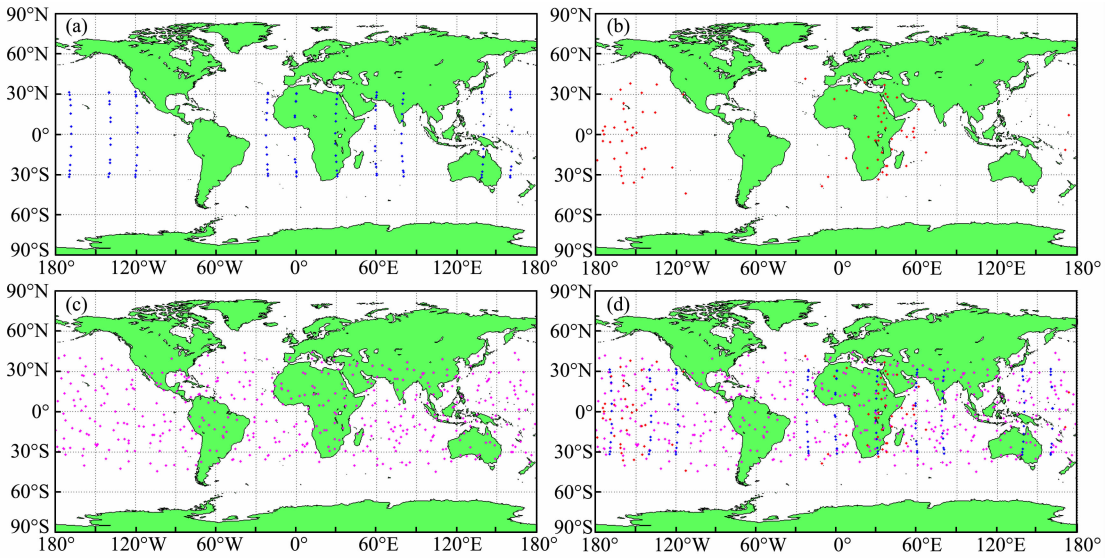


图 6 LEO 轨道倾角为 30°时北斗掩星切点分布

(a)GEO 掩星事件及切点分布; (b)IGSO 掩星事件及切点分布; (c)MEO 掩星事件及切点分布; (d)掩星事件及切点分布.

Fig. 6 Global distribution of Compass occultation (LEO orbit inclination is 30 degree)

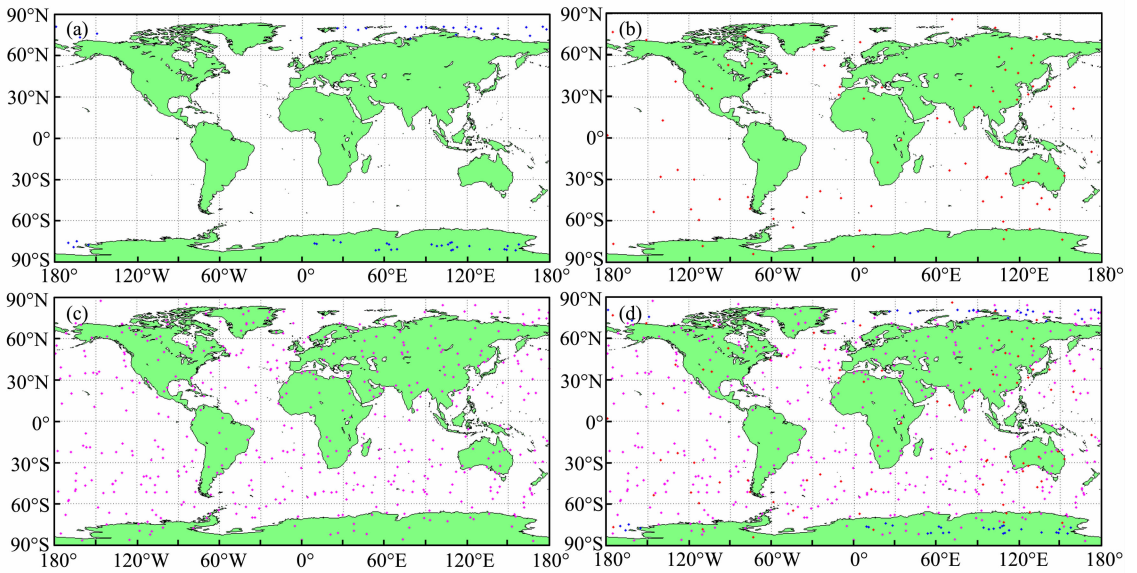


图 7 LEO 轨道倾角为 90°时北斗掩星切点分布

(a)GEO 掩星事件及切点分布; (b)IGSO 掩星事件及切点分布; (c)MEO 掩星事件及切点分布; (d)掩星事件及切点分布.

Fig. 7 Global distribution of Compass occultation (LEO orbit inclination is 90 degree)

中可以看出北斗掩星事件具有如下特点:

(1)GEO 掩星事件特点:在不同的 LEO 近地点角距和升交点赤经条件下,北斗 GEO 掩星事件数量变化不大;北斗 GEO 掩星事件数量随 LEO 轨道高度和 LEO 轨道倾角升高而下降.北斗 GEO 掩星事件切点的分布与 LEO 近地点角距和升交点赤经的关系不大;LEO 轨道高度越低,GEO 掩星事件切点的纬度分布越集中,轨道高度变高,GEO 掩星事件切点的纬度分布趋于发散;GEO 掩星事件切点分布与 LEO 轨道倾角关系密切,纬度分布的峰值在对

应的南纬  $I$  和北纬  $I$  附近( $I$  为 LEO 轨道倾角),经度分布在低倾角时很集中,在高倾角时有所发散.

(2)IGSO 掩星事件特点:在不同的 LEO 近地点角距和升交点赤经条件下,北斗 IGSO 掩星事件数量变化不大;北斗 IGSO 掩星数量随 LEO 轨道高度升高而降低;随 LEO 倾角升高而稍有增加.北斗 IGSO 掩星事件切点的分布与 LEO 近地点角距、升交点赤经和轨道高度的关系不大;IGSO 掩星事件切点较均匀地分布在南纬  $I$  到北纬  $I$  的纬度范围内,经度分布集中  $150^{\circ}W$  和  $45^{\circ}E$  附近,经纬度分布

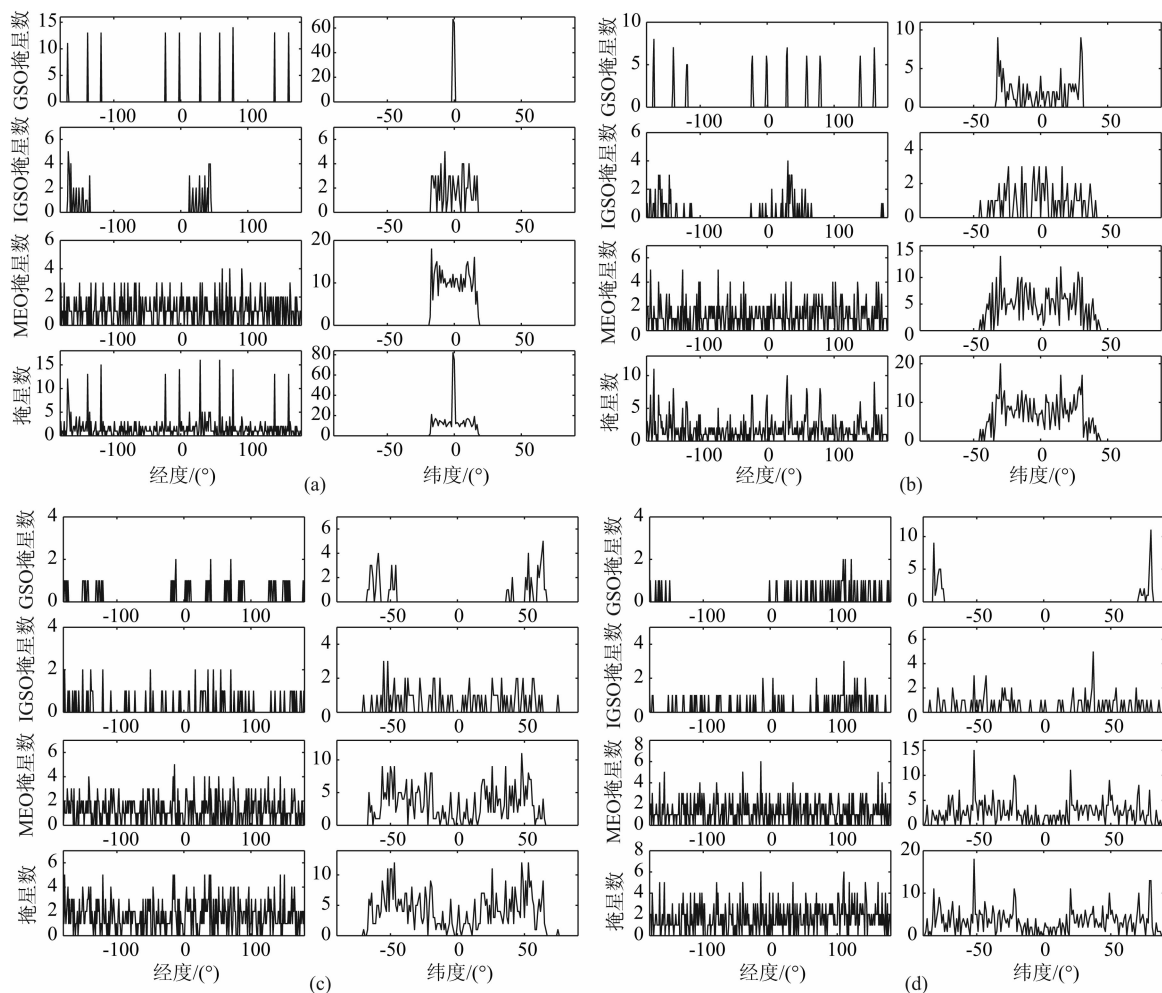


图8 不同LEO轨道倾角条件下北斗掩星的空间分布

(a) 轨道倾角  $0^\circ$ ; (b) 轨道倾角  $30^\circ$ ; (c) 轨道倾角  $60^\circ$ ; (d) 轨道倾角  $90^\circ$ .

Fig. 8 Compass occultation latitudinal and longitudinal distribution with various LEO orbit inclinations

都随LEO轨道倾角增加而变得分散。

(3) MEO掩星事件特点:在不同的LEO近地点角距条件下,北斗MEO掩星事件数量变化不大;在LEO轨道与MEO轨道的升交点赤经度数互补时,MEO掩星事件数量达到最低;MEO掩星数量随LEO轨道提高而大幅降低;随轨道倾角提高而增加,直到 $85^\circ$ 倾角附近开始小幅下降。北斗MEO掩星事件切点的经度分布在全球范围内较为均匀;纬度分布集中在南纬 $I$ 到北纬 $I$ 的范围内,较为均匀,但在LEO倾角较高时,低纬度区域掩星事件数量较少。

结合三种轨道北斗卫星的特点,可以看出北斗掩星事件的数量和分布主要取决于数量最多的MEO卫星。但可以利用GEO和IGSO掩星事件的特点增加特定区域的掩星事件密度。例如图7中,当LEO轨道倾角为 $90^\circ$ 时,北斗IGSO掩星事件切点在中国及周边地区上空较多,有利于提高此区域掩

星探测密度,且此倾角条件下北斗GEO掩星事件切点集中于高纬度地区,有助于探测极地气候。在实践中应该根据具体需求选择合适的LEO轨道以尽量发挥IGSO和GEO卫星的区域探测作用。

#### 参考文献(References)

- [1] 周炎炎, 吴云, 乔学军等. GPS掩星技术和电离层反演. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(2): 29-35.  
Zhou Y Y, Wu Y, Qiao X J, et al. GPS Occultation technique and ionospheric inversion. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2005, 25(2): 29-35.
- [2] 吴小成, 胡雄, 张训械等. 电离层GPS掩星观测改正TEC反演方法. 地球物理学报, 2006, 49(2): 328-334.  
Wu X C, Hu X, Zhang X X, et al. A calibrated TEC method for inversion of ionospheric GPS occultation data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(2): 328-334.
- [3] 曾桢, 胡雄, 张训械等. 电离层GPS掩星观测反演技术. 地球物理学报, 2004, 47(4): 578-583.  
Zeng Z, Hu X, Zhang X X, et al. Inversion of ionospheric

- GPS occultation data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(4): 578-583.
- [4] 宫晓艳, 胡雄, 吴小成等. GPS 测量误差对大气掩星反演精度影响分析. *地球物理学进展*, 2008, 23(6): 1764-1781.  
Gong X Y, Hu X, Wu X C, et al. Analysis of the influence of GPS measurements error on inversion precision of atmospheric radio occultation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, 23(6): 1764-1781.
- [5] 蒋虎, 黄斌, 张运刚. GPS 无线电掩星反演大气参数中的算法研究. *地球物理学进展*, 2002, 17(3): 451-455.  
Jiang H, Huang C, Zhang Y G. Study of algorithms employed in inverting terrestrial atmospheric parameters by GPS radio occultation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2002, 17(3): 451-455.
- [6] 胡雄, 曾桢, 张训械等. 大气 GPS 掩星观测反演方法. *地球物理学报*, 2005, 48(4): 768-774.  
Hu X, Zeng Z, Zhang X X, et al. Atmospheric inversion methods of GPS radio occultation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(4): 768-774.
- [7] 吴小成, 胡雄, 宫晓艳等. 山基 GPS 掩星折射率与探空折射率比较. *地球物理学进展*, 2008, 23(4): 1149-1155.  
Wu X C, Hu X, Gong X Y, et al. Comparison of refractivity obtained with mountain-based GPS radio occultation and radiosonde. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, 23(4): 1149-1155.
- [8] 郭鹏, 严豪健, 洪振杰等. 中性大气掩星标准反演技术. *天文学报*, 2005, 46(1): 96-107.  
Guo P, Yan H J, Hong Z J, et al. The standard retrieval algorithm of neutral atmosphere by GPS Occultation. *Acta Astronomica Sinica* (in Chinese), 2005, 46(1): 96-107.
- [9] 马再忠, 郭英华, 王斌. GPS 掩星观测的发展及其在气象业务中的应用现状. *气象学报*, 2011, 69(1): 208-218.  
Ma Z Z, Guo Y H, Wang B. The GPS occultation data and its current operational applications to the numerical weather prediction. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2011, 69(1): 208-218.
- [10] 虞南华, 朱文耀. GPS 大气掩星技术在全球气候变化研究中的应用. *地球物理学进展*, 2008, 23(3): 722-730.  
Yu N H, Zhu W Y. Application of GPS radio occultation data in global climate change Study. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, 23(3): 722-730.
- [11] 胡雄, 曾桢, 张训械等. 无线电掩星技术及其应用. *电波科学学报*, 2002, 17(5): 549-556.  
Hu X, Zeng Z, Zhang X X, et al. Radio occultation and its application. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 2002, 17(5): 549-556.
- [12] Yunck T P, Liu C H, Ware R. A history of GPS sounding. *Atmospheric and Oceanic Science*, 2000, 11(1): 1-20.
- [13] 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.
- [14] Kursinski E R, Hajj G A, Bertiger W I, et al. Initial results of radio occultation observations of earth's atmosphere using the global positioning system. *Science*, 1996, 271(5252): 1107-1110.
- [15] Rocken C, Anthes R, Exner M, et al. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(25): 29849-29866.
- [16] 王也英, 符养, 杜晓勇等. 全球 GNSS 掩星计划进展. *气象科技*, 2009, 37(1): 74-78.  
Wang Y Y, Fu Y, Du X Y, et al. Advances in global GNSS occultation projects. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2009, 37(1): 74-78.
- [17] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件. 2011, 12.  
China Satellite Navigation Office. Beidou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document (in Chinese), 2011, 12.
- [18] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战. *测绘学报*, 2010, 39(1): 1-6.  
Yang Y X. Progress, Contribution and challenges of Compass/Beidou satellite navigation system. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 2010, 39(1): 1-6.
- [19] 赵世军, 孙学金, 朱有成等. LEO 卫星轨道参数对 GPS 掩星数量和分布的影响. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2002, 3(2): 85-89.  
Zhao S J, Sun X J, Zhu Y C, et al. Effect of LEO satellite's orbit parameter on GPS occultation event's number and distribution. *Journal of PLA University of Science and Technology* (in Chinese), 2002, 3(2): 85-89.
- [20] 徐晓华, 李征航, 罗佳. 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. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 30(7): 609-612.  
Xu X H, Li Z H, Luo J. Simulation of the impacts of single LEO satellite orbit parameters on the distribution and number of occultation events. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 2005, 30(7): 609-612.
- [21] 徐晓华, 李征航, 罗佳. LEO 星座参数对 GPS 掩星数量和时空分布影响的模拟研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 34(4): 305-311.  
Xu X H, Li Z H, Luo J. Simulation research on the impact of LEO constellation's parameters on the number and space-time distribution of GPS occultation events. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 2005, 34(4): 305-311.
- [22] 杜晓勇, 符养, 薛震刚等. 卫星轨道参数对 LEO-LEO 掩星事件数量及分布影响的模拟研究. *地球物理学报*, 2007, 50(5): 1289-1297.  
Du X Y, Fu Y, Xue Z G, et al. Simulation of the impacts of satellite orbit parameters on the number and distribution of LEO-LEO occultation events. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(5): 1289-1297.
- [23] 崔先强, 杨元喜, 吴显兵等. 轨道面旋转角对 GEO 卫星广播



- 星历参数拟合的影响. 宇航学报, 2012, 33(5): 590-596.
- Cui X Q, Yang Y X, Wu X B, et al. Influence of the orbital plane rotation angle on GEO satellite broadcast ephemeris parameter fitting. *Journal of Astronautics* (in Chinese), 2012, 33(5): 590-596.
- [24] 郁聪冲, 边少锋. 现阶段北斗卫星导航系统可用性分析. 海洋测绘, 2012, 32(5): 74-76.
- Yu C C, Bian S F. Usability analysis of Beidou satellite navigation system at the present stage. *Hydrographic Surveying and Charting* (in Chinese), 2012, 32(5): 74-76.
- [25] 周兵, 陈向东, 赵齐乐. 北斗系统与 GPS 应用比较分析. 全球定位系统, 2012, 37(4): 6-8.
- Zhou B, Chen X D, Zhao Q L. Comparison and analysis of Beidou/Compass system and GPS application. *GNSS World of China* (in Chinese), 2012, 37(4): 6-8.
- [26] 杨元喜, 李金龙, 徐君毅等. 中国北斗卫星导航系统对全球 PNT 用户的贡献. 科学通报, 2011, 56(21): 1734-1740.
- Yang Y X, Li J L, Xu J Y, et al. Contribution of the compass satellite navigation system to global PNT users. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 2011, 56(26): 2813-2819.
- (本文编辑 汪海英)