

# 低轨卫星星载 GNSS 反射事件模拟分析

柳聪亮<sup>1,2</sup> 白伟华<sup>1,2</sup> 夏俊明<sup>1,2</sup> 孙越强<sup>1,2</sup> 孟祥广<sup>1,2</sup> 杜起飞<sup>1,2</sup>

1 中国科学院国家空间科学中心,天基空间环境探测北京市重点实验室,北京,100190  
2 掩星探测与大气气候应用国际联合实验室,北京,100190

**摘 要:**基于低轨(low earth orbit, LEO)卫星星载 GNSS 反射事件的数学判据,分别用 BDS、GPS、Galileo、GLONASS 和 4 系统耦合 GNSS 星座模拟信号源,仿真分析了 LEO 卫星轨道高度、轨道倾角、下视天线视场角等参量对反射事件数量和时空分布的影响;进而研究了用上述 4 大 GNSS 系统进行 GNSS 反射信号遥感技术(GNSS reflectometry,GNSS-R)探测对接收机通道数量的需求。统计结果表明:LEO 卫星轨道越高,天线视场越大,反射事件越多,镜面反射点分布越稠密;轨道倾角越小,反射事件镜面点越趋于赤道地区分布;GNSS-R 接收机所需通道数随 LEO 卫星轨道高度和下视天线视场范围增大而增加;而 LEO 卫星轨道倾角变化对通道数需求影响不明显。研究结果对 GNSS-R 低轨卫星系统设计具有一定的理论参考价值。

**关键词:**GNSS-R;反射事件;镜面反射点;轨道参数;天线视场;接收机通道

**中图分类号:**P228.4 **文献标志码:**A

随着 BDS、GPS、Galileo 和 GLONASS 等全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)的发展和广泛应用,GNSS 反射信号遥感技术(GNSS reflectometry,GNSS-R)以全球覆盖、全天候、实时、低成本等优势逐渐成为研究热点<sup>[1]</sup>,多 GNSS 系统耦合进行星载 GNSS-R 探测是其主要发展趋势。GNSS-R 通过接收处理 GNSS 直射和反射信号,实现海面风场反演<sup>[2]</sup>、海面高度<sup>[3]</sup>、海态和土壤湿度<sup>[4]</sup>等物理量的探测。人们在信号处理<sup>[5]</sup>、接收机研制<sup>[6]</sup>、反演算法研究<sup>[7]</sup>和低轨(low earth orbit,LEO)卫星轨道设计<sup>[8]</sup>等方面做了大量工作,并通过地基<sup>[9]</sup>、机载<sup>[10]</sup>和星载<sup>[11]</sup>试验进行验证,为星载 GNSS-R 业务化奠定了理论基础。GNSS 反射事件的数量和时空分布是星载 GNSS-R 探测能力的评估指标之一,是 GNSS-R 接收机和天线研制的重要依据。文献[8]设定 GNSS-R 接收机和天线性能,用变量分离法模拟分析了 LEO 卫星轨道参数对 GPS 反射事件数量和空间分布的影响;文献[12]研究了 BDS 反射事件数量及其空间分布的特点。结果表明:GNSS 反射事件的数量和分布受 LEO

卫星轨道高度、轨道倾角影响显著,而受升交点赤经、近地点角距等参数影响较小。实施多 GNSS 系统耦合反射信号探测,还须考虑 GNSS-R 接收机和天线性能对反射事件的影响。本文将采用变量分离法<sup>[8,12]</sup>模拟研究 LEO 卫星轨道高度、轨道倾角、反射信号天线视场和接收机通道等参数和 GNSS 反射事件的数量和时空分布关系。

## 1 GNSS 反射事件数学模拟

当 GNSS 上视天线(假设为全向天线)接收直接信号时,下视天线接收到地面反射信号,就发生一次 GNSS 反射事件(见图 1)。图 1 中, $\theta$  为地球阴影区临界角; $R_e$  为地球半径; $r_G$  为 GNSS 卫星位置矢量; $r_L$  为 LEO 卫星位置矢量; $\alpha$  为  $r_G$  和  $r_L$  的夹角; $\alpha_{c1}$  为 LEO 卫星在地球阴影区边界时  $r_G$  和  $r_L$  的夹角; $\beta$  为 GNSS 下视天线视场半角; $\varepsilon$  为镜面反射点在视场边界时 GNSS 卫星高度角; $\alpha_{c2}$  为镜面反射点在视场边界时  $r_G$  和  $r_L$  的夹角。其边角关系如下:

$$\alpha = \arccos(r_G \cdot r_L / (|r_G| \cdot |r_L|)) \quad (1)$$

收稿日期:2016-04-15  
项目资助:国家自然科学基金(41405039,41775034,41405040,41505030,41606206);中国科学院空间先导专项(XDA15007501)。  
第一作者:柳聪亮,博士,助理研究员,主要从事 GNSS 遥感应用研究。liucongliang66@126.com  
通讯作者:白伟华,博士,研究员。bjbwh@163.com

$$\alpha_{c1} = \pi - \arcsin(R_e / |r_G|) - \arcsin(R_e / |r_L|)$$

(2)

$$\epsilon = \arccos(\sin\beta \cdot |r_L| / R_e)$$

(3)

$$\alpha_{c2} = \pi - 2\epsilon - \beta - \arcsin(\cos\epsilon \cdot R_e / |r_G|)$$

(4)

GNSS-R 镜面反射点的时空分布与 GNSS 卫星、LEO 卫星轨道参数和 GNSS 下视天线的视场范围相关。发生 GNSS 反射事件的数学判据可归纳为:①GNSS 卫星在 LEO 卫星的可视范围内,即 LEO 卫星不在 GNSS 信号地球阴影里;②该 GNSS 卫星地面反射信号可被下视天线接收。

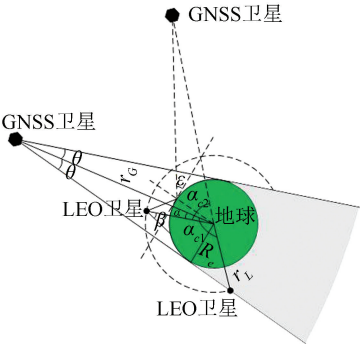


图 1 GNSS 反射事件数学判据示意图  
Fig.1 Illustration of Mathematical Criterion of GNSS-R Events

判据①和②的数学表达式分别为: $\alpha \leq \alpha_{c1}$ ,  
 $\alpha \leq \alpha_{c2}$ 。

## 2 GNSS 反射事件模拟及统计分析

GNSS 反射事件模拟分析过程主要包括:①判断GNSS 卫星对上视天线的可视性;②判断镜面反射点对下视天线的可视性;③估算镜面反射点发生时间和位置;④统计分析 GNSS 反射事件数量和时空分布。

### 2.1 GNSS 星座和 LEO 卫星参数

在模拟分析中,由于全球导航系统星座卫星数不断减少和补充,采用 4 大 GNSS 系统的标称全星座构型,分别用 BDS(35 颗)、GPS(24 颗)、Galileo(30 颗)、GLONASS(24 颗)和 4 系统耦合(113 颗)来模拟 GNSS 空间星座,作为 GNSS-R 的信号源。4 大 GNSS 系统均能实现全球覆盖,且其卫星运行周期在 11~13 h 之间,GNSS 反射事件数量和分布情况日差异很小,对单颗 LEO 卫星一天的 GNSS 反射事件进行分析便可得到具有统计规律性的结论。LEO 卫星轨道高度、轨

道倾角和 GNSS-R 接收机下视天线视场角(用 HPBW 表示)值见表 1。3 个 LEO 卫星参数的设定值可组合为  $3 \times 2 \times 4 = 24$  种单颗 LEO 卫星场景。

表 1 LEO 卫星主要参数

| Tab.1 Key Parameters of LEO Satellite |          |          |
|---------------------------------------|----------|----------|
| 轨道高度/km                               | 轨道倾角/(°) | HPBW/(°) |
| 500                                   | 30       | ±10      |
| 800                                   | 90       | ±20      |
| 1 500                                 |          | ±30      |
|                                       |          | ±40      |

### 2.2 GNSS-R 镜面反射点分布及其覆盖率

分别对 24 种单颗 LEO 卫星场景的 GNSS-R 镜面反射点进行了仿真分析。图 2 给出了 LEO 卫星轨道高度为 800 km,轨道倾角分别为 30°(图2(a))和 90°(图 2(b))时,LEO 卫星星下点轨迹(红)、BDS(蓝)、GPS(黄)、Galileo(黑)和 GLONASS(绿)及各自镜面反射点全球分布情况。

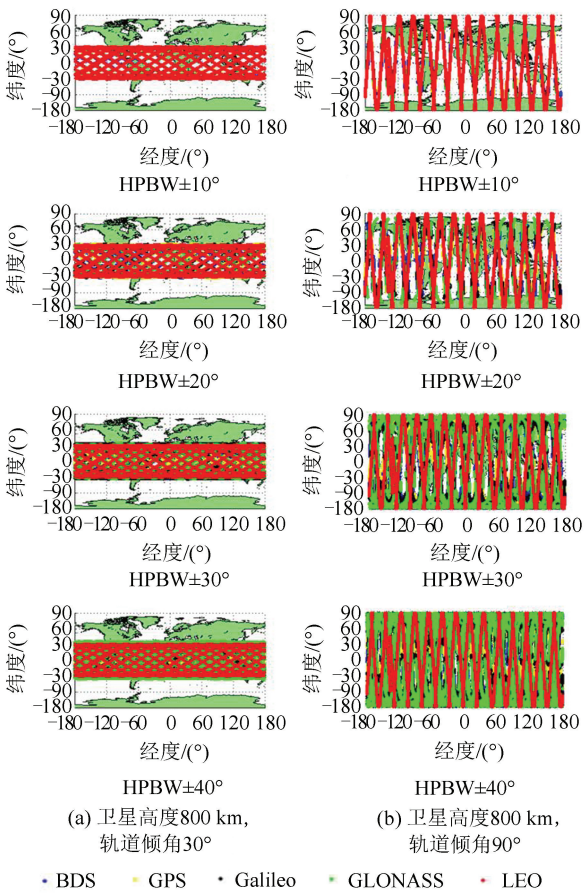


图 2 LEO 卫星星下点轨迹及 GNSS-R 镜面反射点分布  
Fig.2 Distributions of LEO Satellite Nadir Trajectories and GNSS-R Specular Refraction Points

图 3 和图 4 给出了 LEO 卫星轨道倾角分别为 30°和 90°时各 12 种 LEO 卫星场景、4 系统耦合的 GNSS-R 镜面反射点覆盖情况。以 1°×1°经纬度的网格对全球地表进行划分,褐色表示有镜面反射点的网格即覆盖区域,蓝色表示未覆盖区域。LEO 卫星轨道倾角为 30°时、±30°纬度带的覆盖率和轨道倾角为 90°时、全球覆盖率统计结

果见表 2。

从图 2~4 和表 2 可以看出,单颗 LEO 卫星单日 GNSS-R 镜面反射点数量及其地表覆盖率随 LEO 卫星轨道高度和下视天线视场范围增大而增加;随轨道倾角增大,GNSS-R 镜面反射点自赤道地区向两极地区铺开。

表 2 不同 LEO 卫星轨道高度、轨道倾角和下视天线视场角时,GNSS 反射事件覆盖率统计  
Tab.2 GNSS-R Event Coverage due to Different LEO Orbit Heights,Inclinations and HPBW

| HPBW | 轨道倾角 30°、±30°纬度带覆盖率/% |       |       | 轨道倾角 90°、全球覆盖率/% |       |       |
|------|-----------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
|      | 卫星高度/km               |       |       | 卫星高度/km          |       |       |
|      | 500                   | 800   | 1500  | 500              | 800   | 1500  |
| ±10° | 26.55                 | 29.39 | 33.60 | 8.39             | 9.34  | 10.73 |
| ±20° | 59.01                 | 65.32 | 76.67 | 22.88            | 28.28 | 37.77 |
| ±30° | 80.04                 | 89.02 | 95.67 | 46.73            | 62.44 | 76.92 |
| ±40° | 91.38                 | 97.47 | 99.61 | 66.91            | 86.16 | 95.06 |

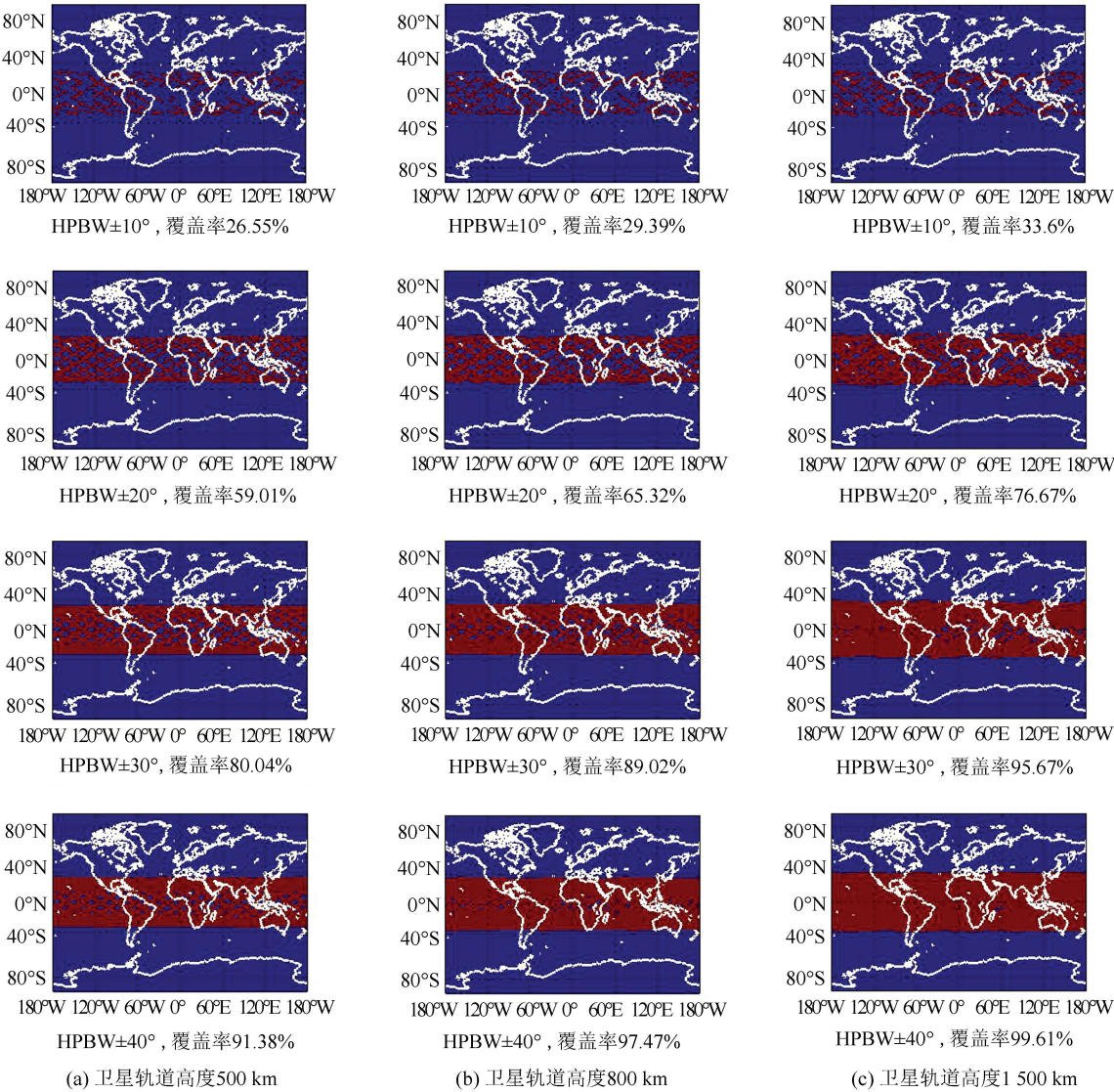


图 3 LEO 卫星轨道倾角为 30°时反射事件对±30°纬度带的覆盖率

Fig.3 GNSS-R Specular Refraction Point ±30° Latitude Coverage when LEO Orbit Inclination is 30°



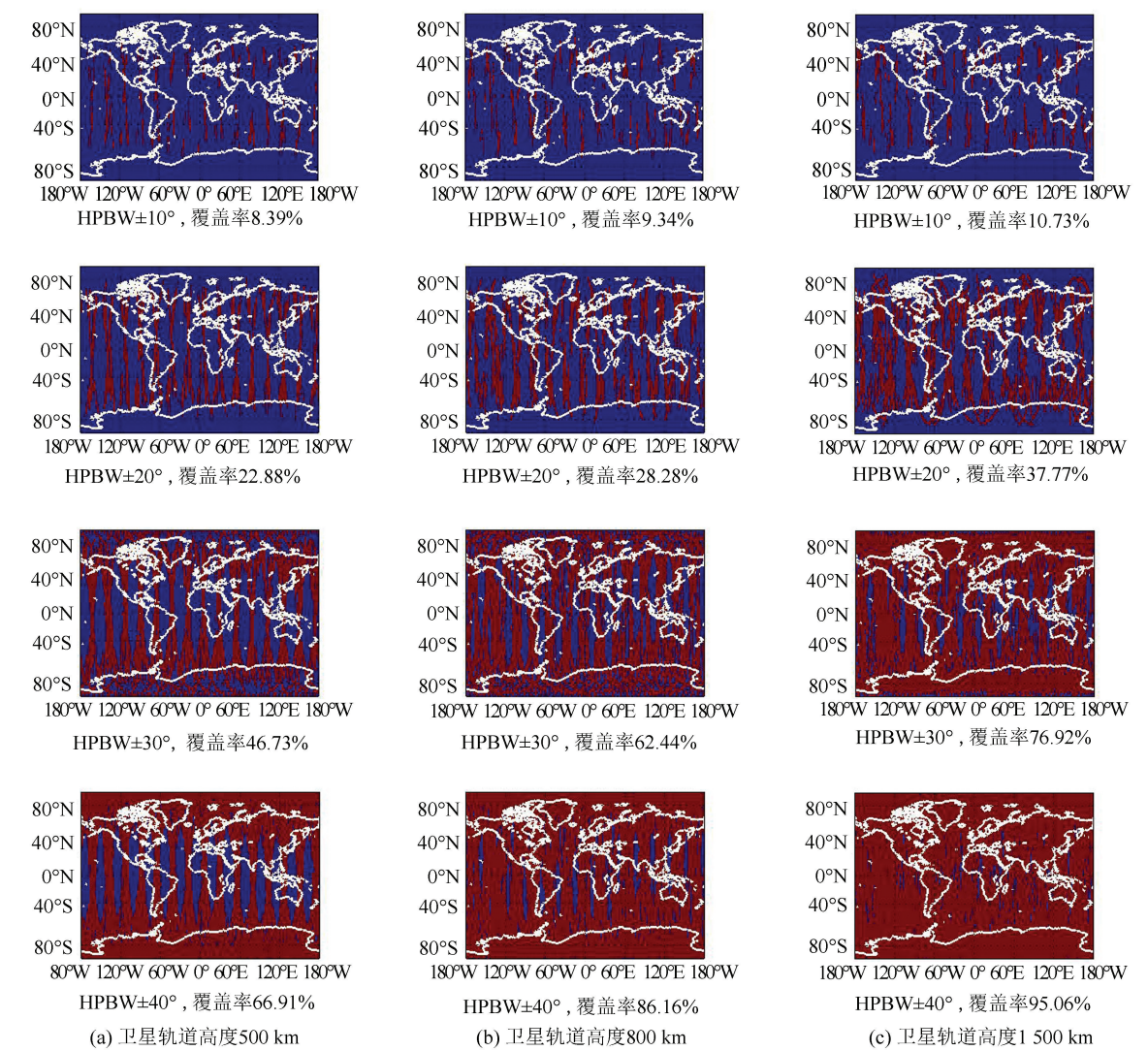


图 4 LEO 卫星轨道倾角为 90°时反射事件全球覆盖率

Fig.4 GNSS-R Specular Refraction Point Global Coverage when LEO Orbit Inclination is 90°

2.3 同时发生反射事件的 GNSS 卫星数统计

同时发生反射事件的 GNSS 卫星数由 LEO 卫星轨道参数和下视天线视场决定。每颗 GNSS 卫星的反射信号均需要一个 GNSS-R 接收机通道来接收。要实现 GNSS 反射事件数量最大化, GNSS-R 接收机通道数须不少于同时发生反射事件的 GNSS 卫星数。然而,GNSS-R 接收机通道数越多越难以实现,成本也越高。统计同时发生反射事件的 GNSS 卫星数的最大值和数学期望,对优化 GNSS-R 接收机通道数和 GNSS-R 的探测能力具有重大意义。

用不同的 LEO 卫星轨道高度、轨道倾角、下视天线视场范围,分别模拟分析了同时发生反射事件的 GNSS 卫星数。图 5 统计了 LEO 卫星轨道高度为 800 km,轨道倾角为 90°,下视天线视场角分别为 ±10°、±20°、±30°和 ±40°时,同时存在镜面反射点数。图 5 中,从上到下各直方图分别

描述了在同一时刻 BDS、GPS、Galileo、GLO-NASS 和 4 系统耦合各自同时发生反射事件的 GNSS 卫星数。

表 3 给出了不同模拟条件下,同时存在镜面反射点数的平均值和最大值,为 GNSS-R 接收机通道数和下视天线视场大小优化设计提供参考。

从图 5 和表 3 可以看出,单颗 LEO 卫星每秒内同时发生反射事件的 GNSS 卫星数(即 GNSS-R 接收机所需通道数)的平均值和最大值随 LEO 卫星轨道高度和下视天线视场范围增大而增加;轨道倾角变化对同时发生反射事件的 GNSS 卫星数影响不大。

3 结 语

基于星载 GNSS 反射事件数学判据,建立了 GNSS-R 镜面反射点模拟系统;分别用 BDS、



表 3 不同 LEO 卫星轨道高度、轨道倾角和下视天线视场角时,同时发生反射事件的 GNSS 卫星数统计  
Tab.3 Number of Simultaneous GNSS-R Events due to Different LEO Orbit Heights,Inclinations and HPBW's

| 卫星高度<br>/km | HPBW | 卫星数(平均值/最大值)/个 |         |         |         |         |          |         |         |         |         |
|-------------|------|----------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
|             |      | 轨道倾角 90°       |         |         |         |         | 轨道倾角 30° |         |         |         |         |
|             |      | BDS            | GPS     | Galileo | GLONASS | GNSS    | BDS      | GPS     | Galileo | GLONASS | GNSS    |
| 500         | ±10° | 0.18/4         | 0.17/3  | 0.17/1  | 0.13/1  | 0.65/5  | 0.22/4   | 0.18/2  | 0.18/1  | 0.12/1  | 0.69/4  |
|             | ±20° | 0.74/5         | 0.67/3  | 0.69/3  | 0.57/2  | 2.67/9  | 1.00/6   | 0.76/4  | 0.75/3  | 0.48/2  | 2.99/9  |
|             | ±30° | 1.79/9         | 1.61/5  | 1.66/4  | 1.40/4  | 6.46/15 | 2.64/9   | 1.81/6  | 1.95/4  | 1.13/3  | 7.54/17 |
|             | ±40° | 3.65/10        | 3.20/7  | 3.40/6  | 2.80/6  | 13.0/23 | 4.75/11  | 3.64/7  | 3.52/6  | 2.35/4  | 14.2/23 |
| 800         | ±10° | 0.21/4         | 0.21/2  | 0.20/1  | 0.16/1  | 0.78/6  | 0.27/4   | 0.23/2  | 0.21/2  | 0.13/3  | 0.86/4  |
|             | ±20° | 0.91/6         | 0.83/3  | 0.83/3  | 0.69/2  | 3.26/10 | 1.22/6   | 0.91/3  | 0.91/3  | 0.57/3  | 3.62/11 |
|             | ±30° | 2.21/9         | 2.00/5  | 2.04/4  | 1.81/4  | 8.05/17 | 3.29/10  | 2.31/6  | 2.394   | 1.40/4  | 9.41/20 |
|             | ±40° | 4.60/12        | 4.18/7  | 4.25/6  | 3.41/6  | 16.4/27 | 5.64/12  | 4.42/8  | 4.23/6  | 2.95/5  | 17.2/28 |
| 1 500       | ±10° | 0.29/4         | 0.28/3  | 0.28/2  | 0.23/2  | 1.08/7  | 0.40/4   | 0.30/3  | 0.30/2  | 0.19/2  | 1.21/5  |
|             | ±20° | 1.34/7         | 1.18/4  | 1.23/4  | 1.02/3  | 4.77/12 | 1.85/8   | 1.34/5  | 1.37/4  | 0.85/3  | 5.42/14 |
|             | ±30° | 3.50/10        | 3.16/6  | 3.28/6  | 2.74/6  | 12.6/22 | 4.70/10  | 3.60/7  | 3.45/6  | 2.30/4  | 14.0/23 |
|             | ±40° | 7.37/15        | 7.11/11 | 6.80/9  | 5.37/9  | 26.6/39 | 8.09/16  | 6.64/11 | 6.27/9  | 4.55/7  | 25.5/35 |

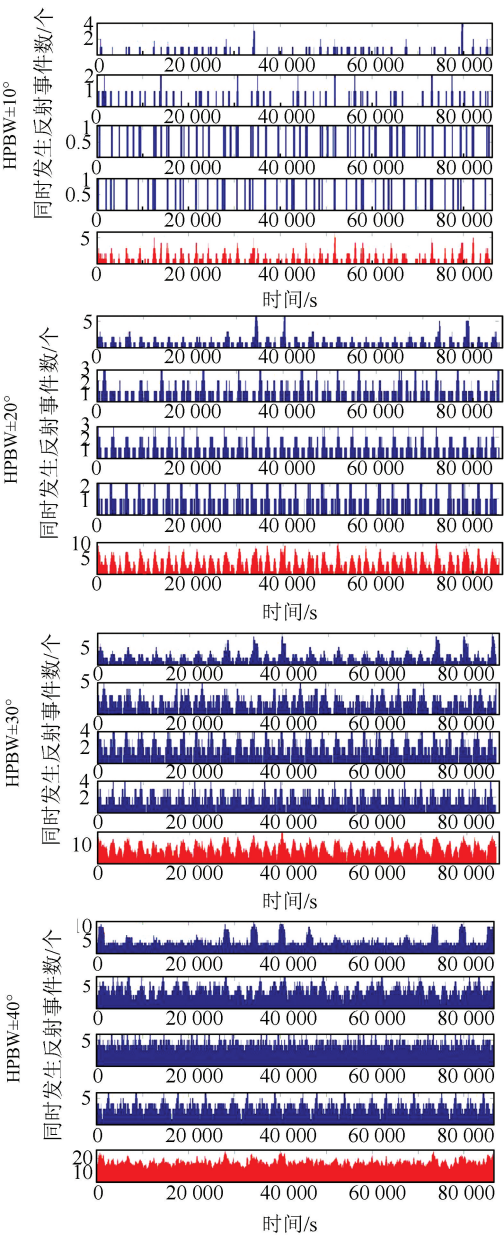


图 5 同时发生反射事件的 GNSS 卫星数统计

Fig.5 Number of Simultaneous GNSS-R Events Statistics

GPS、Galileo、GLONASS 和 4 系统星座作为 GNSS 信号源,统计分析了 LEO 卫星轨道高度、轨道倾角和天线视场等参量对 GNSS-R 镜面反射点的数量和时空分布的影响。得出如下结论:①LEO 卫星轨道越高,反射事件越多,镜面反射点分布越稠密;②LEO 卫星轨道倾角对 GNSS-R 镜面反射点的纬度分布影响显著,倾角越小,镜面反射点越趋于赤道地区分布;③下视天线视场越大,有效的反射事件越多。

通过统计同时发生反射事件的 GNSS 卫星数,分别估计了下视天线视场角为 ±10°、±20°、±30°和 ±40°时,BDS、GPS、Galileo、GLONASS 和 4 系统耦合进行 GNSS-R 探测时,GNSS-R 接收机所需要的通道数。同时发生反射事件的 GNSS 卫星数(GNSS-R 接收机所需通道数)随 LEO 卫星轨道高度和下视天线视场范围增大而增加;轨道倾角变化对同时发生反射事件的 GNSS 卫星数量影响较小。研究结果对 GNSS-R 低轨卫星系统设计具有一定的理论参考价值。

参 考 文 献

[1] Liu Jingnan, Shao Lianjun, Zhang Xunxie. Advances in GNSS-R Studies and Key Technologies [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007,32(11): 955-960(刘经南, 邵连军, 张训械. GNSS-R 研究进展及其关键技术[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007,32(11): 955-960)

[2] Valencia E, Zavorotny V U, Akos D M, et al. Using DDM Asymmetry Metrics for Wind Direction Retrieval from GPS Ocean-Scattered Signals in Airborne Experiments[J]. *IEEE Transactions on Geo-*

*science and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 3 924-3 936

[3] Martin-Neira M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to Ocean Altimetry[J]. *ESA Journal — European Space Agency*, 1993, 17(4): 331-355

[4] Rodriguez-Alvarez N, Bosch-Lluis X, Camps A, et al. Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results over a Bare Soil Field [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(11): 3 616-3 624

[5] Li Weiqiang, Yang Dongkai, Li Mingli, et al. Design and Experiments of GNSS-R Receiver System for Remote Sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36 (10): 1 204-1 208(李伟强, 杨东凯, 李明里, 等. 面向遥感的 GNSS 反射信号接收处理系统及实验[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2011, 36(10): 1 204-1 208)

[6] Tao Peng, Sun Yueqiang, Zhu Guangwu, et al. Design and Verified of a GPS-R Software Receiver for Ocean Altimetry[J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(10): 2 558-2 563(陶鹏, 孙越强, 朱光武, 等. 用于海洋测高的 GPS-R 软件接收机的设计与验证[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(10): 2 558-2 563)

[7] Fu Yang, Zhou Zhaoming. Investigation of Ocean Remote Sensing by Using GNSS-R Signal[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(2): 128-131(符养, 周兆明. GNSS-R 海洋遥感方法研究[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2006, 31(2): 128-131)

[8] Wang Yingqiang, Yan Wei, Fu Yang, et al. Simulation of Impacts of Single LEO Satellite Orbit Parameters on GNSS Reflection Event's Distribution and Number[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(12): 1 410-1 414(王迎强, 严卫, 符养, 等. 单颗 LEO 卫星轨道参数对 GNSS 反射事件分布和数量影响的模拟研究[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2009, 34(12): 1 410-1 414)

[9] Yan Songhua, Gong Jianya, Zhang Xunxie, et al. Ground Based GNSS-R Observations for Soil Moisture[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(11): 2 735-2 744(严颂华, 龚健雅, 张训械, 等. GNSS-R 测量地表土壤湿度的地基实验[J]. 地球物理学报, 2011, 54(11): 2 735-2 744)

[10] Bai W H, Xia J M, Wan W, et al. A First Comprehensive Evaluation of China's GNSS-R Airborne Campaign: Aart II-river Remote Sensing[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(17): 1 527-1 534

[11] Gleason S, Hodgart S, Sun Y P, et al. Detection and Processing of Bistatically Reflected GPS Signals from Low Earth Orbit for the Purpose of Ocean Remote Sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(6): 1 229-1 241

[12] Yang Dongkai, Wang Feng, Li Weiqiang, et al. Simulation Analysis of BeiDou Reflection Events Based on LEO Satellites[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015, 30(3): 409-416(杨东凯, 王峰, 李伟强, 等. 基于低轨卫星的北斗反射事件仿真分析[J]. 电波科学学报, 2015, 30(3): 409-416)

Simulation Study of Spaceborne GNSS-R Events

LIU Congliang<sup>1,2</sup>   BAI Weihua<sup>1,2</sup>   XIA Junming<sup>1,2</sup>   SUN Yueqiang<sup>1,2</sup>  
MENG Xiangguang<sup>1,2</sup>   DU Qifei<sup>1,2</sup>

1   National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China  
2   Joint Laboratory on Occultations for Atmosphere and Climate (JLOAC), Beijing 100190, China

**Abstract:** The effects of LEO (low earth orbit) satellite orbit altitude, inclination and look-down antenna field of view on the number and distribution of specular reflection points in GNSS-R events were analyzed, based on GNSS-R mathematical criterion. Using the BDS, GPS, Galileo, and GLONASS data, we combined these 4-system constellations. The number of channels of GNSS-R receiver required was estimated. The results show that the number of GNSS-R events increase with the increase (下转第 839 页)



To Evaluate Earth Gravitational Model Using Equigeopotential Character

DING Jian<sup>1,2,3,4</sup>  XU Houze<sup>2</sup>  ZHANG Chuanyin<sup>1</sup>

- 1  Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China
- 2  Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077, China
- 3  University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
- 4  Key Laboratory of Geo-Informatics of National Administration of NASG, Beijing 100830, China

**Abstract:** This paper proposes an evaluation approach for an earth gravitational model(EGM), which is based on the equigeopotential surface character of the geoid. We select a gravity geoid as reference surface, calculated the gravity potentials of different EGMs on the reference surface, to build an index of gravity potential standard deviation to evaluate EGMs. We evaluated the theoretical ability for compliance of different EGMs and the same EGM applied in different areas of the earth using the approach. The results show that the geoid precisions of EGM96 and OSU91A are respectively  $\pm 11.1$  cm and  $\pm 14.3$  cm, meaning that the precision of EGM96 is better than that of OSU91A, while the EGM2008, EIGEN-6C4 are similar in precision. These are consistent with the existing research conclusions. But, the result further suggests that the precision of EGM2008 is slightly better than that of EIGEN-6C4 at the cm level.

**Key words:** geoid; earth gravitational model(EGM); gravity potential standard deviation; accuracy evaluation

**First author:** DING Jian, PhD candidate, specializes in the theories of physical geodesy and methods of earth gravitational model estimation. E-mail: dingjian@casm.ac.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41304009, 41374081; the Open Research Fund Program of Key Laboratory of Geo-Informatics of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. 777142109.

(上接第 831 页)

in the LEO orbit altitude and look-down antenna field of view. With a decrease of LEO satellite orbit inclination, the specular reflection points tend to distribute in the equatorial region. Meanwhile, the requested number of GNSS-R receiver channels increase with the increase of LEO orbit altitude and look-down antenna field of view, but might be affected slightly by the variation of LEO orbit inclination. The study provides a theoretical reference for future GNSS-R mission design.

**Key words:** GNSS-R; refraction events; specular refraction points; orbit parameters; antenna field of view; receiver channels

**First author:** LIU Congliang, PhD, assistant professor, specializes in GNSS remote sensing and its application. E-mail: liucongliang66@126.com

**Corresponding author:** BAI Weihua, PhD, professor. E-mail: bjbwh@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41405039, 41775034, 41405040, 41505030, 41606206; the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No. XDA15007501.