0254-6124/2019/39(1)-036–10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YANG Guanglin, SUN Yueqiang, BAI Weihua, ZHANG Xiaoxin, YANG Zhongdong, ZHANG Peng, TAN Guangyuan. Beidou navigation satellite system sounding of the ionosphere from FY-3C GNOS: preliminary results (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(1): 36-45. DOI:10.11728/cjss2019.01.036

风云三号 C 星 GNOS 北斗掩星电离层探测初步结果*

杨光林[1,2,3,4] 孙越强[1,4,5] 白伟华[1,4,5] 张效信[2,3]
杨忠东[3] 张 鹏[3] 谭广远[1,5]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(国家空间天气监测预警中心 中国气象局空间天气重点开放实验室 北京 100081)

3(国家卫星气象中心 北京 100081)

4(中国科学院大学 北京 100049)

5(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

摘 要 利用风云三号卫星 C 星 GNOS 掩星探测仪电离层数据, 分析了 2013 年 10 月 FY-3C GNOS 探测的北斗掩星电离层廓线分布, 将 2013 年 10 月 1 日至 2015 年 10 月 10 日期间 FY-3C GNOS 观测的 F_2 层峰值电子密度 (N_mF_2) 与地面电离层测高仪观测结果进行对比, 验证了 FY-3C GNOS 北斗电离层掩星的探测精度. 结果表明,FY3-C GNOS 北斗电离层掩星与电离层测高仪探测的 N_mF_2 数据相关系数为 0.96, 平均偏差为 10.21%, 标准差为 19.61%. 在不同情况下其数据精度有如下特征: 白天精度高于夜晚; 夏季精度高于分季, 分季精度高于冬季; 中纬地区精度高于低纬地区, 低纬地区精度高于高纬地区; BDS 倾斜同步轨道 (IGSO) 卫星精度高于同步轨道 (GEO) 卫星和中轨道 (MEO) 卫星. FY-3C GNOS 北斗电离层掩星与国际上其他掩星电离层数据精度的一致性对 GNSS 掩星探测资料的综合利用具有重大意义.

关键词 掩星, 全球导航卫星掩星探测仪, 北斗卫星导航系统, 电离层

中图分类号 P 352

Beidou Navigation Satellite System Sounding of the Ionosphere from FY-3C GNOS: Preliminary Results

YANG Guanglin[1,2,3,4] SUN Yueqiang[1,4,5] BAI Weihua[1,4,5] ZHANG Xiaoxin[2,3]
YANG Zhongdong[3] ZHANG Peng[3] TAN Guangyuan[1,5]

* 国家自然科学基金项目 (41405039, 41405040, 41505030, 41606206, 41775034), 中国科学院空间先导专项 (XDA15007501), 中国科学院科研装备研制项目 (YZ201129), 国家重点研发计划重点专项项目 (2017YB0502800, 2017YFB0502802), 公益性行业 (气象) 科研专项基金 (GYHY201006048, GYHY201306063) 共同资助

2017-12-11 收到原稿, 2018-05-28 收到修定稿

E-mail: yglyang@cma.gov.cn. 通信作者 白伟华, E-mail: bjbwh@163.com

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Key Laboratory of Space Weather, National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing* 100081)

3(*National Satellite Meteorological Center, Beijing* 100081)

4(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

5(*Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing* 100190)

Abstract The world's first dual-system compatible Global Navigation Satellite System (GNSS) Occultation Sounder (GNOS) for Beidou Navigation Satellite System (BDS) and Global Positioning System (GPS) was successfully launched into orbit with FY-3C satellite on 23 September 2013, and a large number of ionospheric BDS Radio Occultation (BDSRO) data have been collected. The ionospheric BDSRO products observed by FY-3C GNOS are introduced firstly, then the distribution of ionospheric Electron Density Profiles (EDPs) in October 2013 is analyzed. Finally, the precision of ionospheric BDSRO data obtained by FY-3C GNOS is verified through F_2-layer peak electron density (N_mF_2) comparisons between BDSRO and ionosondes. The results show that the correlation coefficient of N_mF_2 data between BDSRO and ionosondes is 0.96, the bias is 10.21% and the standard deviation is 19.61%, which is comparable with other international ionospheric occultation products based on GPS. The N_mF_2 precision of BDSRO has the following characteristics. Its precision at daytime is higher than that at nighttime, and its precision in summer is higher than that in equinox seasons, while the precision in winter is lowest. Moreover, its precision at mid-latitude region is higher than that at low-latitude region, and the precision at high-latitude region is lowest. The precision of BDS satellites on Inclined Geosynchronous Satellite Orbit (IGSO) is higher than that on Geosynchronous Orbit (GEO) and Medium Earth Orbit (MEO). The precision consistency of the ionospheric occultation product between BDS-FY-3C GNOS and other internationl occultation projects is of great significance for comprehensively utilizing the GNSS occultation observation data. With the continued deployment of FY-3 satellites and Beidou navigation satellites, GNOS can provide more ionospheric occultation data in the future, which will be helpful to the ionospheric research and space weather forecasting based on GNSS occultation observations.

Key words Radio occultation, Global navigation satellite system occultation sounder, Beidou navigation satellite system, Ionosphere

0 引言

全球导航卫星系统 (GNSS) 掩星探测技术是 20 世纪 90 年代发展起来的新型地球无线电遥感探测技术, 其利用低轨卫星 (LEO) 接收在地球大气临边传播的发生折射效应的 GNSS 信号, 开展地球大气和电离层物理参数的反演分析. 根据临边射线切点高度的不同, 把掩星事件分为电离层掩星事件 (80 km 到 LEO 高度) 和大气层掩星事件 (地面到 80 km). GNSS 掩星探测技术具有全球覆盖、高垂直分辨率、高精度、全天候和长期稳定等优点, 可以获得电离层峰值以上的电离层数据 (电子总含量和电子密度剖面), 而常规的电离层测高仪和地基 GNSS 观测无法获取这些数据. 电离层掩星在电离层异常监测 [1−4]、电离层闪烁研究 [5]、电离层气候研究 [6,7]、电离层模型同化 [8,9] 等领域发挥了重大作用, 在通信、空间以及国防领域具有广泛的应用前景.

1995 年 4 月, 美国 Microlab-1 低轨卫星 (GPS/

MET) 发射成功, 首次从理论和技术上证实了 GPS 无线电掩星技术用于探测地球大气和电离层的可行性 [10−12]. 2001 年德国 CHAMP[13] 卫星搭载的 GPS 掩星接收机首次成功开展了 GPS 电离层无线电掩星探测. 此后, 多个掩星探测计划相继实施. 同时开展大气和电离层掩星探测的有美德合作的 GRACE[14] 以及中国台湾与美国合作的 COSMIC 掩星星座探测计划. COSMIC 计划的成功实施进一步推动了无线电掩星探测技术的发展, 标志着 GNSS 掩星探测技术实现业务化应用 [15,16] .

目前全球已建成或部分建成的有四大导航卫星系统, 即美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧洲 GALILEO 和中国 BDS(北斗). 全球导航卫星掩星探测仪 (GNOS) 是风云三号 C 星 (FY-3C) 的新增载荷, 在国际上首次实现了 BDS 与 GPS 双系统兼容, 可同时开展双系统的电离层和大气掩星探测 [17]. GNOS 主要科学任务之一是为地磁学、无线电通信及空间科学研究提供电离层电子密度剖面 (Electron Density Profile, EDP) 和电子总含量等电离层参数信息, 为空间天气预报提供全球分布的电离层观测数据. FY-3C 为太阳同步极轨卫星, 其轨道为近圆轨道, 轨道倾角约为 98.7°, 轨道高度约为 830 km, 轨道周期为 101.5 min, 于 2013 年 9 月发射成功, 其上搭载的 GNOS 载荷由中国科学院国家空间科学中心研发, FY-3 系列后续卫星 D, E, F, G, R 均计划搭载该 GNOS 载荷. 该载荷自 2013 年 9 月 29 日开机运行以来, 观测到大量北斗电离层掩星事件, 获得了相应的电离层数据. 对北斗掩星 (BDS Radio Occultation, BDSRO) 电离层数据进行精度评估, 有利于 BDSRO 数据与其他卫星导航系统掩星数据的综合利用, 也有助于降低中国掩星观测对单一导航卫星系统的依赖. 随着北斗导航系统的完善以及 FY 系列卫星的持续部署, BDSRO 探测数量也会逐渐增加, 可为国际上提供更多的掩星数据.

利用 FY-3C GNOS 北斗掩星电离层数据, 分析了北斗掩星探测到的电离层廓线分布情况, 通过将 $N_{\mathrm{m}}F_2$ 观测数据与地面电离层测高仪观测数据进行对比, 验证了北斗掩星的电离层探测精度.

1 FY-3C GNOS 北斗掩星电离层数据

GNOS 电离层数据反演采用双频 TEC 电离层反演方法 [18]. 该方法同时利用 L1 和 L2 相位观测资料, 可以有效去除 GNSS 钟差、LEO 接收机钟差和其他仪器偏差的影响, 具有较高的反演精度. 此外, 反演中用到的 Abel 变换基于电离层电子密度局部球对称假设. 此假设在电离层电子密度水平方向变化剧烈的地区可能带来较大的反演误差. 此外, 太阳活动剧烈时电离层变化较大, 此假设下的反演结果也会有较大的误差.

通过对电离层掩星数据的处理, 可以得到 L1 和 L2 两级电离层相关数据.

L1 级是电离层附加相位数据, 其提供了单次掩星事件的电离层附加相位及辅助数据. 数据内容包括时间, 掩星 GNSS 卫星号、卫星位置和速度, FY-3C 卫星位置和速度、信号信噪比、掩星标识符. 每个电离层附加相位文件对应一次电离层掩星事件.

L2 级是电子密度廓线数据, 其提供了单次掩星事件的电子密度廓线及辅助数据. 内容包括时间、掩星 GNSS 卫星号、切点位置、折射率及电子密度. L2 由 FY-3C 数据生成系统对 L1 数据中的电离层附加相位数据进行反演处理后生成. 每个电子密度廓线文件对应一次电离层掩星事件.

2 北斗掩星电离层廓线分布

目前 GNOS 平均每天可反演获得北斗掩星电离层廓线约 150 条. 图 1 给出了 2013 年 10 月 25 日全天 FY-3C GNOS 反演获得的 BDS 掩星 (BDSRO) 电离层廓线分布情况, 图 2 给出了 2013 年 10 月 1 日至 31 日全月 BDSRO 电离层廓线分布情况. 由图 1 可见, 2013 年 10 月 25 日全天共观测到 BDSRO 电离层廓线 185 条, 其中 GEO 掩星电离层廓线 45 条, IGSO 掩星电离层廓线 89 条, MEO 掩星电离层廓线 51 条. 由图 2 可见, 2013 年 10 月共观测到 BDSRO 电离层廓线 4361 条, 其中 GEO 掩星电离层廓线 1250 条, IGSO 掩星电离层廓线 1952 条, MEO 掩星电离层廓线 1159 条.

从电离层掩星数量上看, FY-3C GNOS 每天可观测 BDSRO 电离层廓线约 150 条, 同时期每天观测到的 GPS 掩星 (GPSRO) 电离层廓线约 250 条, 即 BDSRO 数量少于 GPSRO 数量. 这是因为在该观测时段 GPS 星座已经部署完成, 在轨运行的卫星数量达到 31 颗, 因此发生掩星的数量较多; 而 BDS 星

座组网并提供服务的只有 14 颗卫星 (包括 5 颗 GEO 卫星、5 颗 IGSO 卫星、4 颗 MEO 卫星), 因此发生掩星的数量相对较少. 此外, 观测结果还受 GNOS 掩星观测通道数量的限制. FY-3C GNOS 北斗掩星观测通道共 4 个, 为大气层掩星和电离层掩星共用, 且设计为大气层掩星优先原则, 即在同时有大气层和电离层掩星发生且通道占满的情况下, 将优先观测大气层掩星而中断电离层掩星或不观测电离层掩星, 这也是 BDSRO 数量相对较少的原因之一.

从电离层掩星地点分布来看, BDSRO 电离层掩星廓线在中高纬地区分布比较多, 在低纬地区分布相对较少, 这一特点在图 2 中表现得尤为明显. 这是由

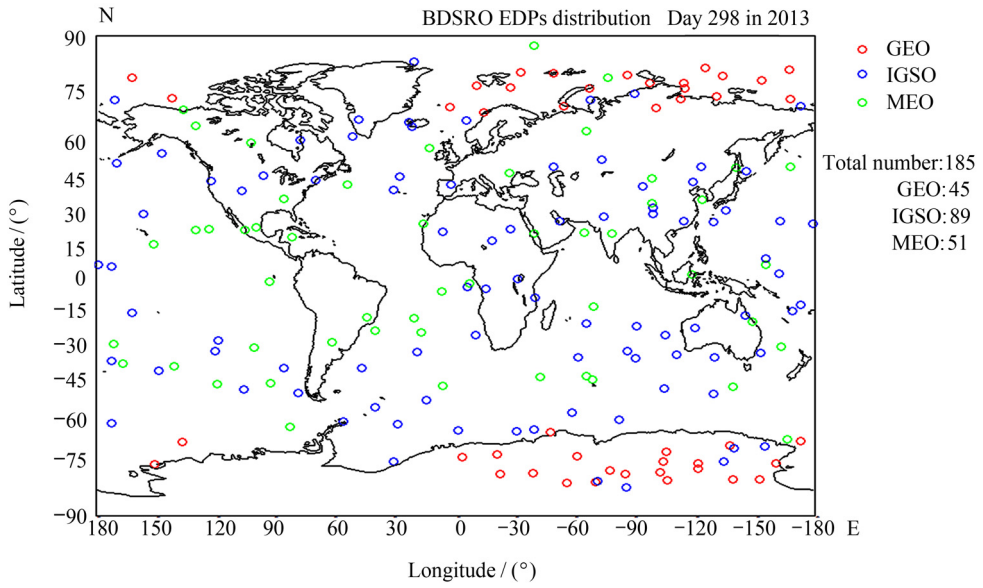


图 1 2013 年 10 月 25 日 FY-3C GNOS 观测的 BDSRO 电离层廓线分布

Fig. 1 Distribution of the ionospheric BDSRO EDPs observed by FY-3C GNOS on 25 October 2013

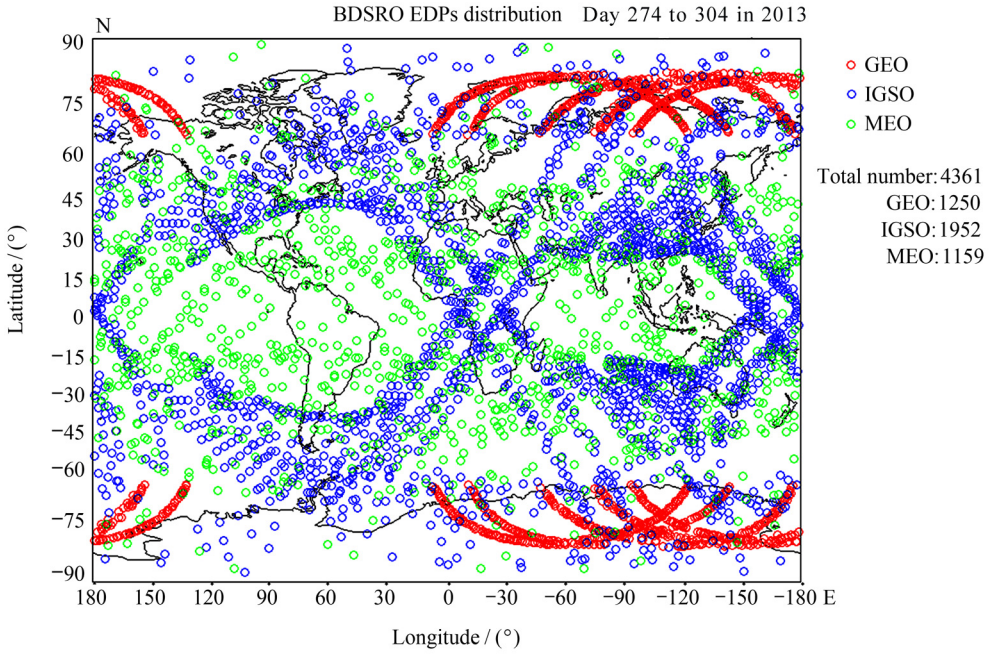


图 2 2013 年 10 月 FY-3C GNOS 观测的 BDSRO 电离层廓线分布

Fig. 2 Distribution of the ionospheric BDSRO EDPs observed by FY-3C GNOS in October 2013

北斗系统的卫星分布特点所决定的. 在北斗系统卫星星座中, GEO 和 IGSO 设计为中国区域服务, MEO 设计为全球服务. 5 颗 GEO 卫星的轨道高度约为 35 807 km, 分别定点于东经 58.7°, 80.2°, 110.6°, 140.0° 和 160.0°; 5 颗 IGSO 卫星倾角约为 55.0°, 高度约为 35 893 km; MEO 卫星与 GPS 卫星轨道相似, 倾角约为 55.2°, 高度约为 21 600 km. 按照北斗导航卫星与 FY-3C 卫星发生掩星时的几何关系, GEO 掩星的切点分布在高纬地区, IGSO 掩星的切点大多数分布在中纬地区, 而 MEO 掩星的切点则在全球均匀分布. 其中, GEO 掩星切点分布位置较为固定, 掩星事件在时间和空间上具有一定的重复性, 对高纬电离层具有定时巡视的效果, 可以为高纬电离层气候研究提供长期有效的基础数据.

3 北斗掩星电离层数据质量

3.1 资料获取与处理

已有很多利用模式及其他独立数据源对 COSMIC 电离层数据进行比较验证的研究 [19−27]. 由于电离层测高仪是地面上探测电离层的主要常规设备, 一般认为电离层测高仪的 N_mF_2 探测精度优于掩星电离层探测精度, 因此电离层测高仪的探测数据更多地被用于检验和评估电离层掩星数据质量.

为了验证 GNOS 北斗掩星电离层数据质量, 统计了 2013 年 10 月 1 日 (第 274 天) 至 2015 年 10 月 10 日 (第 283 天) 共 740 天的 BDSRO 电离层探测数据, 与美国麻省大学卢维尔分校 (University of Massachusetts Lowell, UML) 全球电离层观测台网 [28] (Global Ionospheric Radio Observatory, GIRO) 同时段 54 个台站的电离层测高仪数据进行比对, GIRO 测高仪参数为自动度量结果. 在比对前, 根据 GIRO 所给出的说明, 需要剔除的是自动度量置信度为 −1 的数据. 这里比对的电离层参数为 F_2 层峰值电子密度 N_mF_2, (定义数学符号 N_m), 电离层测高仪的直接观测量 f_0F_2 (定义数学符号 N_f) 通过下式可以进行转换, 即

$$N_m = \frac{N_f^2}{80.6}. \tag{1}$$

两者时空匹配原则是掩星射线切点的地面垂直投影位置与测高仪站点之间的球面距离小于 200 km, 探测时间差小于 30 min.

在 2013 年第 274 天到 2015 年第 283 天时间段内, GNOS 共获得 BDSRO 电离层掩星廓线 82 681 条. 通过时空匹配, 共得到 BDSRO 与电离层测高仪匹配样本 570 对. 由于 N_mF_2 参量变化较大, 特别是昼夜变化可以达到 1 个数量级以上, 因此以 N_mF_2 相对误差来进行计算, 在此基础上统计平均偏差和标准差, 并拟合两者之间的相关系数.

3.2 BDS 掩星 N_mF_2 误差评估

图 3 为 BDSRO 与电离层测高仪 (图 3 中简写为 IONO) 的 N_mF_2 参数对比情况. 由图 3(a) 可以

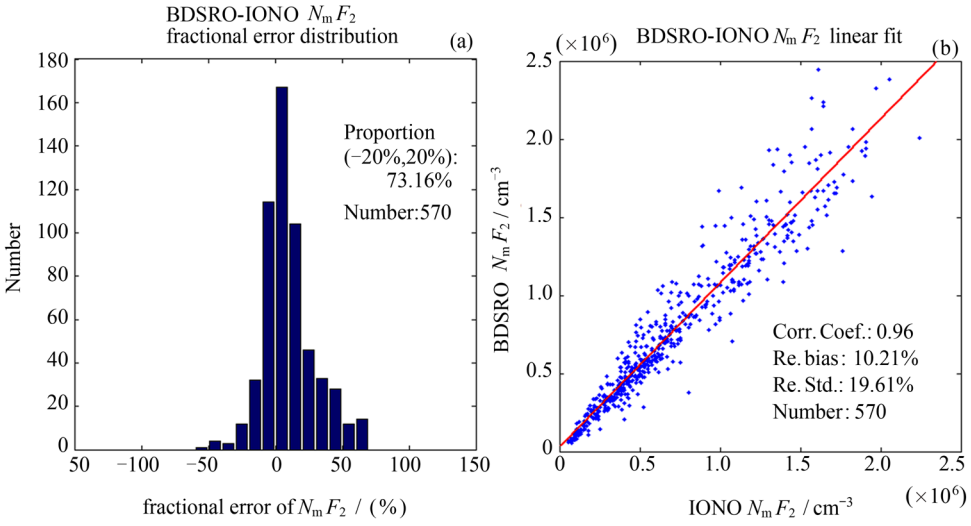


图 3 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 对比. (a) 相对误差分布, (b) 线性拟合

Fig. 3 Comparison of N_mF_2 by BDSRO and ionosondes. (a) Fractional error distribution, (b) linear fit

看出, 总样本数为 570 对时, 大部分 (73.16%) 相对误差在 −20%~20% 的范围内. 由图 3(b) 可以看出, 总样本数为 570 对时, 拟合的相关系数为 0.96, 统计平均偏差为 10.21%, 标准差为 19.61%. 国际同类掩星数据与电离层测高仪对比情况为: CHAMP 电离层掩星 N_mF_2 平均偏差为 −1.7%, 标准差为 17.8%[29]; COSMIC 电离层掩星 N_mF_2 标准差为 22%~30%[30]. 此外, 2013 年 10 月 1 日至 2014 年 9 月 30 日 FY-3C GNOS 的 GPS 掩星与测高仪 N_mF_2 对比结果如下: 相关系数为 0.96, 平均偏差为 6.71%, 标准差为 18.03%[31]. 因此, FY-3C GNOS 的 BDS 掩星电离层数据的 N_mF_2 精度与其他掩星电离层数据精度相当, 与其 GPS 掩星数据精度也具有一致性.

图 4 为不同地方时的 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 的对比和线性拟合情况. 这里取 06:00 LT−18:00 LT 为白天,18:00 LT−06:00 LT 为夜晚. 由图 4 可以看出: 白天 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 匹配样本数为 391 对时, 相关系数为 0.95, 平均偏差为 11.84%, 标准差为 18.96%; 夜晚 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 匹配样本数为 179 对时, 相关系数为 0.94, 平均偏差为 6.65%, 标准差为 20.55%.

图 5 为不同季节 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 的对比和线性拟合情况. 这里取北半球的 12−2 月和南半球的 6−8 月为冬季, 北半球的 6−8 月和南半球的 12−2 月为夏季, 全球的 3−5 月和 9−11 月为分季. 由图 5 可以清晰看出: 冬季 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 相关系数为 0.96, 平均偏差为 8.11%, 标准差为 22.06%, 样本数为 126 对; 分季 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 相关系数为 0.95, 平均偏差为 12.80%, 标准差为 20.66%, 样本数为 299 对; 夏季 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 相关系数为 0.94, 平均偏差为 6.69%, 标准差为 13.53%, 样本数为 145 对.

图 6 为不同纬度 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 的对比及线性拟合情况. 这里取地理纬度 (−30°, 30°) 为低纬地区, (−30°, −60°) 和 (30°, 60°) 为中纬地区, (−60°, −90°) 和 (60°, 90°) 为高纬地区. 由图 6 可以看出: 低纬地区 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 匹配样本数为 28 对, 相关系数为 0.89, 平均偏差为 4.75%, 标准差为 21.35%; 中纬地区匹配样本数为 368 对, 相关系数为 0.96, 平均偏差为 9.18%, 标准差为 17.81%; 高纬地区匹配样本数为 174 对, 相关系数为 0.90, 平均偏差为 13.28%, 标准差为 22.45%.

图 7 为不同轨道 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 的对比和线性拟合情况. 由图 7 可以看出: GEO 卫星掩星与测高仪 N_mF_2 匹配样本数为 107 对, 相关系数为 0.94, 平均偏差为 15.17%, 标准差为 20.27%; IGSO 卫星掩星与测高仪 N_mF_2 匹配样本数为 279 对, 相关系数为 0.96, 平均偏差为 11.42%, 标准差为 18.27%; MEO 卫星掩星与测高仪 N_mF_2 匹配样本数为 184 对, 相关系数为 0.96, 平均偏差为 5.49%, 标准差为 20.27%.

表 1 统计了不同情况下 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 观测量之间的相关系数、平均偏差、标准差和匹配的样本数量. 从相关系数来看, 除低纬地区

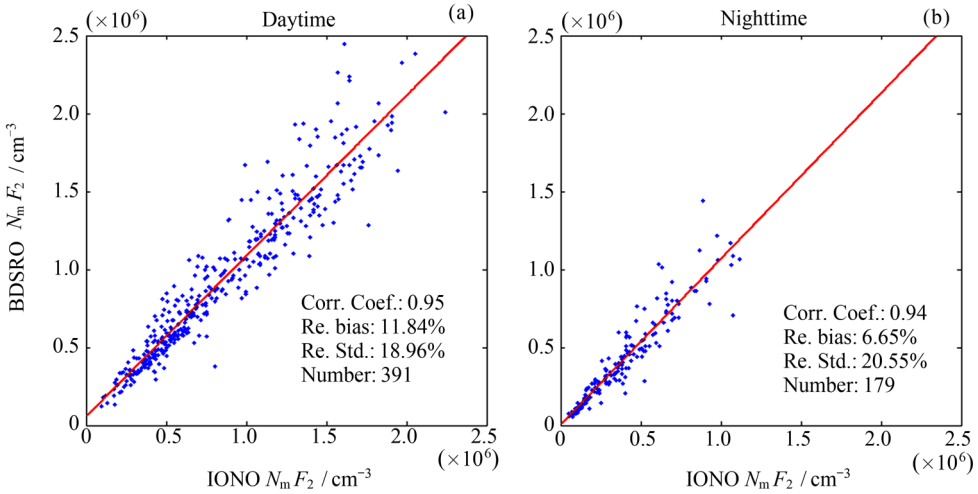


图 4 不同地方时 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 对比

Fig. 4 Comparison of N_mF_2 by BDSRO and ionosondes at different local time

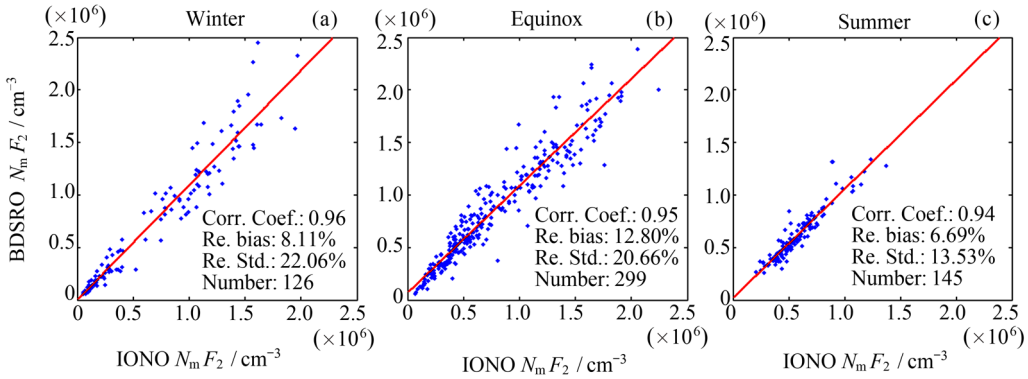


图 5 不同季节 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 的对比

Fig. 5 Comparison of N_mF_2 by BDSRO and ionosondes in different seasons

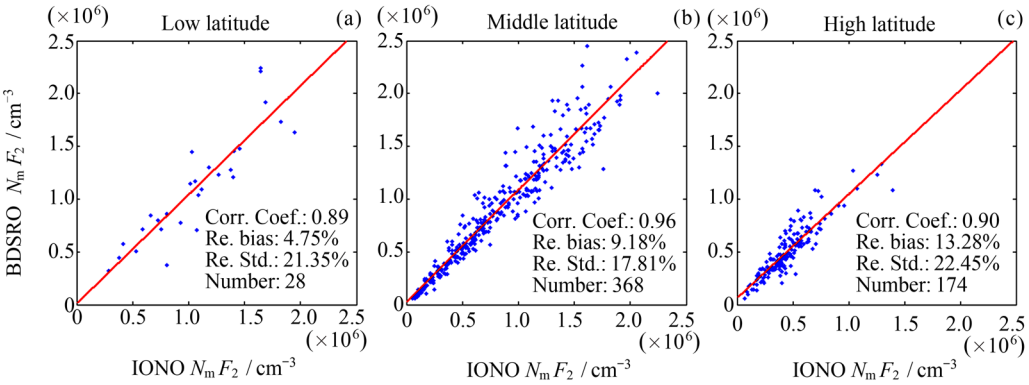


图 6 不同纬度 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 对比

Fig. 6 Comparison of N_mF_2 by BDSRO and ionosondes in different latitudes

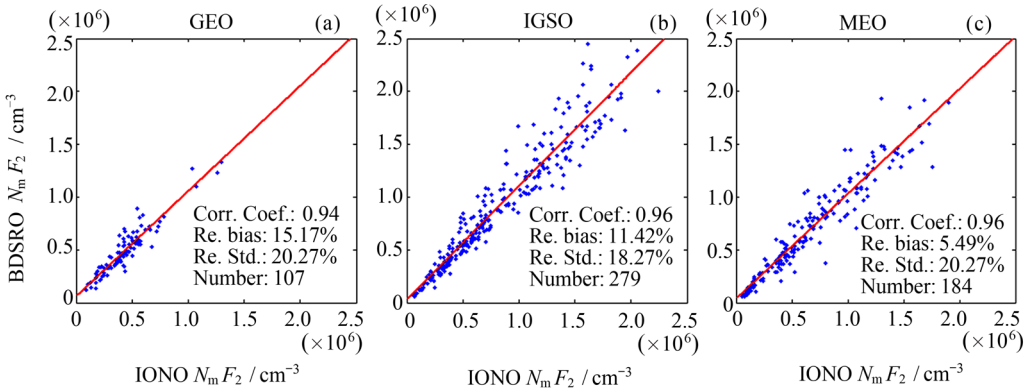


图 7 不同轨道 BDS 掩星与测高仪 N_mF_2 对比

Fig. 7 Comparison of N_mF_2 by BDSRO and ionosondes as BDS satellites in different orbits

为 0.89 外, 其他情况下都达到 0.9 以上, 这说明 BDS 掩星探测的 N_mF_2 与地面测高仪探测结果符合较好. 从标准差来看, 总体为 19.61%, 其他各种情况下也都在 13%~23% 之间, 这说明 BDS 掩星探测的 N_mF_2 具有较好的精度. 以标准差作为评价精度的指标, 不同情况下 FY-3C GNOS 北斗掩星 N_mF_2 的精度具有如下特征.

从地方时来看, 白天精度高于夜晚. 形成这一现

表 1 BDSRO 与测高仪 N_mF_2 参数对比统计

Table 1 Comparative statistics of N_mF_2 by BDSRO and ionosondes

对比参数	相关系数	平均偏差/(%)	标准差/(%)	样本对
总体	0.96	10.21	19.61	570
白天	0.95	11.84	18.96	391
夜晚	0.94	6.65	20.55	179
冬季	0.96	8.11	22.06	126
分季	0.95	12.80	20.66	299
夏季	0.94	6.69	13.53	145
低纬	0.89	4.75	21.35	28
中纬	0.96	9.18	17.81	368
高纬	0.90	13.28	22.45	174
GEO	0.94	15.17	20.27	107
IGSO	0.96	11.42	18.27	279
MEO	0.96	5.49	20.27	184

象的原因可能是 N_mF_2 夜晚比白天低一个数量级以上, 因此反演时绝对误差较小, 但也会放大成较大的相对误差, 从而造成夜晚的精度低于白天.

从季节来看, 夏季精度高于分季, 分季精度高于冬季. 这可能与电离层的冬季异常和半年度异常有关. 相对夏季而言, 在冬季和分季, F_2 层中的电子密度随时间的变化更大也更快, 基于一定时间内电子密度呈现局部球对称假设的 Abel 反演也会出现较大的误差.

从纬度来看, 中纬地区精度高于低纬地区, 低纬地区精度高于高纬地区, 这符合 Abel 反演误差的一般规律 [7]. 在低纬和高纬地区, 电离层的电子密度水平不均匀性表现得更为明显, 而 Abel 反演正是基于电子密度局部球对称的假设, 因此在这一区域的误差会更大. 其中, 高纬度地区的电离层由于受到粒子沉降等事件影响, 其在时间和空间尺度的变化上都非常快, 在水平方向上更难以符合球对称假设, 所以高纬度地区 GNOS 掩星的探测精度比其他纬度地区都要差.

从卫星轨道来看, BDS 处于 IGSO 轨道时 GNOS 探测的 N_mF_2 精度高于其处于 GEO 和 MEO 轨道时. 这也符合中纬地区精度高于低纬和高纬地区的规律. 这是因为 IGSO 的掩星点多分布在中纬地区, GEO 掩星点分布在高纬地区, MEO 掩星点在各纬度带均匀分布.

4 结论

FY-3C GNOS 首次实现了 BDS 电离层掩星观测, 对于拓展北斗导航卫星系统在气象及空间领域的应用具有重要价值. 本文利用 FY-3C GNOS 北斗掩星电离层数据, 分析了北斗电离层掩星的数量和分布规律, 评估了其电离层数据质量, 具体结论如下.

FY-3C GNOS 北斗掩星每天可获得约 150 条电离层廓线, 北斗 GEO 掩星点分布在高纬地区, IGSO 掩星点主要分布在中纬地区, MEO 掩星点在全球均匀分布. 北斗 GEO 掩星观测具有高纬电离层定时巡视的特点, 可用于高纬地区的电离层气候研究.

2013 年 10 月 1 日至 2015 年 10 月 10 日, FY-3C GNOS 北斗掩星与电离层测高仪探测的 N_mF_2 数据的相关系数为 0.96, 平均偏差为 10.21%, 标准差为 19.61%. 2013 年 10 月 1 日至 2014 年 9 月 30 日, FY-3C GNOS 的 GPS 掩星与测高仪 N_mF_2 数据的相关系数为 0.96, 平均偏差为 6.71%, 标准差为 18.03%. 这证明 FY-3C GNOS 北斗电离层掩星数据与其他掩星电离层数据精度相当, 且与该载荷的 GPS 掩星电离层数据精度一致.

FY-3C GNOS 北斗掩星 N_mF_2 的精度在不同情况下具有如下特征: 白天精度高于夜晚; 夏季精度高于分季, 分季精度高于冬季; 中纬地区精度高于低纬地区, 低纬地区精度高于高纬地区; BDS 卫星位

于 IGSO 轨道时的精度高于其在 GEO 轨道和 MEO 轨道时的精度.

不同 GNSS 系统掩星电离层数据精度的一致性对基于 GNSS 掩星探测资料的电离层研究和空间天气预报具有重要意义. 一方面, 未来北斗系统的完善和 FY 系列卫星的持续部署将提高北斗电离层掩星的数量, 通过与其他 GNSS 电离层掩星数据综合分析使用, 可提高掩星的覆盖范围和时空分辨率, 有利于开展电离层天气的实时监测业务和电离层气候模型的研究开发; 另一方面, 在其他 GNSS 系统不提供导航信号的特殊情况下, 利用北斗电离层掩星可独立进行电离层的监测和研究, 降低中国电离层掩星观测对于单一 GNSS 系统的依赖性. 随着未来 FY-3 系列卫星的不断发射以及北斗导航卫星在轨数量的不断增加, GNOS 可提供更多的掩星数据.

致谢 GIRO 电离层测高仪观测数据由美国 UML 大学提供, FY-3C GNOS 掩星数据由中国气象局国家卫星气象中心提供 *.

参考文献

[1] LIU J Y, TSAI Y B, MA K F, *et al.* Ionospheric GPS Total Electron Content (TEC) disturbances triggered by the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2006, **111**(A5): 698-704

[2] LIU J Y, CHEN C H, LIN C H, *et al.* Ionospheric disturbances triggered by the 11 March 2011 M 9.0 Tohoku earthquake [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2011, **116**(A6): 97-108

[3] WAN W X, LIU L, YUAN H, *et al.* The GPS measured SITEC caused by the very intense solar flare on July 14, 2000 [J]. *Adv. Space Res.*, 2005, **36**(12): 2465-2469

[4] DING F, WAN W, LIU L, *et al.* A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during major magnetic storms over the years 2003—2005 [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2008, **113** (A3): A00A01. DOI: 10.1029/2008JA013037

[5] PAVELYEV A G, LIOU Y A, WICKERT J, *et al.* Effects of the ionosphere and solar activity on radio occultation signals: Application to CHAllenging Minisatellite Payload satellite observations [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2007, **112**(A6): 49-60

[6] LIU L, ZHAO B Q, WAN W X, *et al.* Seasonal variations of the ionospheric electron densities retrieved from Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate mission radio occultation measurements [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2009, **114**(A2). DOI: 10.1029/2008ja013819

[7] YUE X, SCHREINER W S, LEI J, *et al.* Climatology of ionospheric upper transition height derived from COSMIC satellites during the solar minimum of 2008 [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2010, **72**(17): 1270-1274

[8] YUE X, SCHREINER W S, KUO Y, *et al.* Global 3D ionospheric electron density reanalysis based on multisource data assimilation [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2012, **117**(A9): 667-672

[9] YUE X A, SCHREINER W S, KUO Y H. A feasibility study of the radio occultation electron density retrieval aided by a global ionospheric data assimilation model [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2012, **117**(A8): 648-659

[10] KURSINSKI E R, HAJJ G A, SCHOFIELD J T, *et al.* Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1997, **102**(D19): 23 429-23 465

[11] ROCKEN C, ANTHES R, EXNER M, *et al.* Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1997, **102**(D25): 29 849-29 866

[12] WARE R, ROCKEN C, SOLHEIM F, *et al.* GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: preliminary results [J]. *Bull. Ame. Meteor. Soc.*, 1996, **77**(1): 19-40

[13] WICKERT J, SCHMIDT T, BEYERLE G, *et al.* The radio occultation experiment aboard CHAMP: Operational data analysis and validation of vertical atmospheric profiles [J]. *J. Meteor. Soc. Japan. Ser.* II, 2004, **82**(1B): 381-395

[14] WICKERT J, BEYERLE G, KÖNIG R, *et al.* GPS radio occultation with CHAMP and GRACE: A first look at a new and promising satellite configuration for global atmospheric sounding [J]. *Ann. Geophys.*, 2005, **23**(3): 653-658

[15] ANTHES R A, ROCKEN C, KUO Y H. Applications of COSMIC to Meteorology and Climate [J]. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2000, **11**(1): 115-156

[16] ANTHES R A, BERNHARDT P A, CHEN Y, *et al.* The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early Results [J]. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 2008, **89**(3): 313-333

[17] BAI W H, SUN Y Q, DU Q F, *et al.* An introduction to the FY3 GNOS instrument and mountain-top tests [J]. *Atmos. Meas. Techn.*, 2014, **7**(6): 1817-1823

[18] HAJJ G A, ROMANS L J. Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment [J]. *Radio Sci.*, 1998, **33**(1): 175-190

[19] LEI J, SYNDERGAARD S, BURNS A G, *et al.* Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: Preliminary results [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**(A7): 601-623

[20] KELLEY M C, WONG V K, APONTE N, *et al.* Compari-

*http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SK.0749.001.html

son of COSMIC occultation-based electron density profiles and TIP observations with Arecibo incoherent scatter radar data [J]. *Radio Sci.*, 2009, **44**(4): 1-13

[21] LIU J Y, LEE C C, YANG J Y, *et al.* Electron density profiles in the equatorial ionosphere observed by the FORMOSAT-3/COSMIC and a digisonde at Jicamarca [J]. *GPS Solut.*, 2010, **14**(1): 75-81

[22] KRANKOWSKI A, ZAKHARENKOVA I, KRYPIAK-GREGORCZYK A, *et al.* Ionospheric electron density observed by FORMOSAT-3/COSMIC over the European region and validated by ionosonde data [J]. *J. Geod.*, 2011, **85**(12): 949-964

[23] CHUO Y J, LEE C C, CHEN W S, *et al.* Comparison between bottomside ionospheric profile parameters retrieved from FORMOSAT3 measurements and ground-based observations collected at Jicamarca [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2011, **73**(13): 1665-1673

[24] ELY C V, BATISTA I S, ABDU M A. Radio occultation electron density profiles from the FORMOSAT-3/COSMIC satellites over the Brazilian region: a comparison with Digisonde data [J]. *Adv. Space Res.*, 2012, **49**(11): 1553-1562

[25] SAHAI Y, JESUS R D, FAGUNDES P R, *et al.* Effects observed in the equatorial and low latitude ionospheric F-region in the Brazilian sector during low solar activity geomagnetic storms and comparison with the COSMIC measurements [J]. *Adv. Space Res.*, 2012, **50**(10): 1344-1351

[26] SUN Lingfeng, ZHAO Biqiang, YUE Xin'an, *et al.* Comparison between ionospheric character parameters retrieved from FORMOSAT3 measurement and ionosonde observation over China [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2014, **57**(11): 3625-3632 (孙凌峰, 赵必强, 乐新安, 等. 中国区域电离层垂测仪探测参量与 COSMIC 掩星反演结果比较研究 [J]. 地球物理学报, **57**(11): 3625-3632)

[27] HU L H, NING B Q, LIU L B, *et al.* Comparison between ionospheric peak parameters retrieved from COSMIC measurement and ionosonde observation over Sanya [J]. *Adv. Space Res.*, 2014, **54**(6): 929-938

[28] REINISCH B W, GALKIN I A. Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) [J]. *Earth Planets Space*, 2011, **63**(4): 377-381

[29] JAKOWSKI N, WEHRENPFENNIG A, HEISE S, *et al.* GPS radio occultation measurements of the ionosphere from CHAMP: Early results [J]. *Geophys. Res. Lett.,* 2002, **29**(10). DOI: 10.1029/2001gl014364

[30] LIMBERGER M, HERNÁNDEZ-PAJARES M, ARAGÓN-ÁNGEL A, *et al.* Long-term comparison of the ionospheric F2 layer electron density peak derived from ionosonde data and Formosat-3/COSMIC occultations [J]. *J. Space Weather Space Climate*, 2015, **5**: A21. DOI: 10.1051/swsc/2015023

[31] YANG G L, SUN Y Q, BAI W H, *et al.* Validation results of $N_{\mathrm{m}}F_2$ and $h_{\mathrm{m}}F_2$ derived from ionospheric density profiles of GNOS on FY-3C Satellite [J]. *Sci. China: Technol. Sci.*, 2017, **61**(9): 1372-1383