



COSMIC 与 FY-3C 掩星电离层反演的比较

摘要

利用基于 TEC 的电子密度廓线反演方法,对 2014 年 12 月 31 日的 COSMIC 和 FY-3C 掩星任务的电离层掩星相位数据进行处理,将反演的电子密度廓线及电离层峰值参数分别与两个掩星任务的官方产品进行比较,发现两个掩星任务的反演结果与官方产品均具有较好的一致性.其中 COSMIC 反演结果与 CDAAC 官方产品的一致性略好于 FY-3C 反演结果与 NSMC 官方产品的一致性,且两个任务的 NmF2 的反演质量均优于 hmF2 的反演质量.但与 COSMIC 不同,FY-3C 掩星电离层相位数据进行反演处理之前有必要进行滤波平滑预处理,且由于 FY-3C 非掩星时段的相位数据量太少,反演过程中不建议对 TEC 进行改正.

关键词

掩星; COSMIC; FY-3C; 电子密度廓线; 电离层峰值参数; 反演

中图分类号 P352.7; P228

文献标志码 A

收稿日期 2021-02-03

资助项目 国家自然科学基金(42074027,41774032);国家重点研发计划(2018YFC1503502)

作者简介

王涵,硕士生,主要从事 GNSS 掩星电离层研究.wonder_hwang@163.com

徐晓华(通信作者),博士,教授,主要从事 GNSS 大气及电离层研究.xhxu@sgg.whu.edu.cn

0 引言

全球导航卫星系统(GNSS, Global Navigation Satellite System)无线电掩星(RO, Radio Occultation)技术是近年来广受关注的一种星基电离层监测技术.其基本原理是由 GNSS 卫星发射的无线电信号被低轨道(LEO, Low Earth Orbit)卫星接收,当信号路径扫过电离层时发生掩星事件.利用掩星事件过程中电离层引起的信号附加相位延迟,并结合卫星几何关系,反演电离层总电子含量(TEC, Total Electron Content)和电子密度廓线(EDP, Electron Density Profile)等电离层参数.与垂测仪和雷达等传统地基手段相比,掩星观测具有全球分布、全天候和高垂直分辨率的特点^[1],对电离层建模、空间天气与气候研究具有重要价值.

气象、电离层和气候星座观测系统(COSMIC, Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate)是由美国和中国台湾联合实施的掩星任务,由 6 颗轨道高度 800 km、倾角 72° 的 LEO 卫星构成,每颗卫星均对 GPS 卫星进行掩星观测.自 2006 年发射以来,COSMIC 在正常运行期内每日提供的掩星事件次数达到 2 000 多次^[2].但 2013 年以后随着卫星的老化,COSMIC 掩星事件数量急剧下降.COSMIC 数据产品由 COSMIC 数据分析与存档中心(CDAAC, COSMIC Data Analysis and Archive Center)处理发布.风云 3C(FY-3C, Fengyun-3C)是中国独立研制发射的首颗具有 GNSS 掩星观测能力的 LEO 卫星,于 2013 年 9 月发射,轨道高度为 836 km,倾角为 98.75°,可对 GPS 和北斗进行掩星观测^[3].与 COSMIC 掩星任务相似,FY-3C 的轨道高度较高,可实现电离层完整剖面的探测.FY-3C 数据产品由中国国家卫星气象中心(NSMC, National Satellite Meteorological Center)提供,目前仅发布了对 GPS 掩星观测的相关产品.这两个掩星任务的掩星观测设备和数据处理平台不同,电离层产品反演在细节上各有差异.虽然国内外关于 COSMIC 电离层数据反演的研究相对较丰富^[4-6],但关于 FY-3C 掩星电离层反演的论文相对较少.本文基于 TEC 的电子密度廓线反演方法,在相同流程下对两个掩星任务的电离层掩星数据进行处理,并将反演结果与官方数据产品分别进行比较,对反演质量进行评估.相关成果可为两个掩星任务电离层数据的联合处理和应用提供参考.

1 武汉大学 测绘学院,武汉,430079

2 武汉大学 地球空间信息技术协同创新中心,武汉,430079

3 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,武汉,430079

1 数据与方法

1.1 掩星数据

本文使用了 COSMIC 与 FY-3C 两个掩星任务于 2014 年 12 月 31 日全天的电离层一级相位产品与二级廓线产品.其中相位产品内容为各电离层掩星事件以 1 s 为采样间隔的各采样时刻对应的 GNSS 卫星和 LEO 卫星的坐标与速度序列,以及对应的双频信号的附加相位延迟序列等信息.廓线产品内容为由相位产品反演得到的电子密度廓线及电离层峰值参数.CDAAC 提供的 COSMIC 相位和廓线数据文件名标识分别为“ionPhs”和“ionPrf”(http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu);NSMC 提供的 FY-3C 相位和廓线数据文件名标识分别为“IE”和“EDP”(http://satellite.nsmc.org.cn).通过对两个掩星任务的电离层一级相位数据进行处理,反演得到电子密度廓线和峰值参数,并将反演结果分别与这两个机构提供的二级电子密度廓线产品进行比较,对反演结果进行评估.

图 1 展示了 2014 年 12 月 31 日两个掩星任务的掩星事件在全球的分布.可以发现,两个掩星任务一天内的掩星事件在空间上基本呈现全球均匀分布特征,并且 COSMIC 掩星事件数量显著大于 FY-3C 的掩星事件数量.

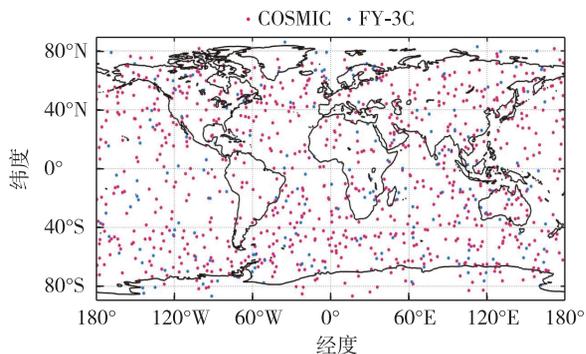


图 1 2014 年 12 月 31 日 FY-3C 与 COSMIC 电离层掩星事件全球分布

Fig. 1 Global distribution of ionospheric RO events of FY-3C and COSMIC missions during Dec. 31, 2014

1.2 反演方法

由双频附加相位延迟出发反演电子密度廓线有两种方法:一种是基于附加多普勒的反演方法,通过将附加相位延迟对时间求导得到附加多普勒频移,进而进行电子密度的反演;另一种是基于 TEC 的反演方法.基于附加多普勒的反演方法对卫星速度精

度要求较高,在反演中易带来较大误差^[7-8].本文使用基于 TEC 的反演方法:由双频附加相位延迟计算信号路径的总电子含量 TEC,并在信号直线传播假设下得到各采样对应的碰撞系数和近地点位置,将 TEC 序列对碰撞系数求导得到 TEC 微分序列,进而对其进行 Abel 积分反演得到电子密度随近地点高度变化的廓线.图 2 为基于 TEC 的掩星电子密度反演算法流程.

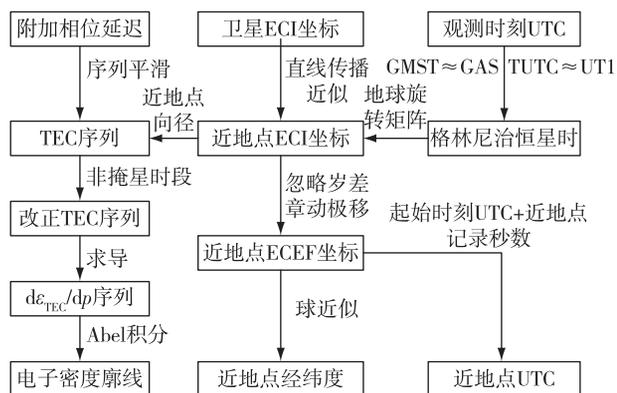


图 2 基于 TEC 的掩星电子密度反演算法流程

Fig. 2 Flowchart for EDP inversion based on GNSS RO-measured TEC

如图 2 所示,对于每个掩星事件,首先利用各采样 GNSS 和 LEO 卫星的坐标计算掩星路径近地点的地心向径及其坐标.需要注意的是 CDAAC 和 NSMC 相位产品中的卫星位置和速度均属于地心惯性系 (ECI, Earth Centered Inertial),但掩星路径近地点经纬度和高度属于地心地固系 (ECEF, Earth Centered Earth Fixed),因此在解算出近地点的 ECI 坐标后需将其转换为 ECEF 坐标,进而得到近地点的经纬度和高度.由于电离层掩星反演对卫星位置的精度要求不高,由 ECI 到 ECEF 的转换矩阵可忽略岁差、章动和极移等因素的影响,直接利用由采样时刻的 UTC 时间计算的春分点的格林尼治恒星时角得到^[9].

考虑到原始附加相位延迟观测序列中可能存在的高频噪声会对反演结果带来干扰^[10-11],在反演前采用 9 点滑动平均法对双频附加相位延迟序列进行滤波平滑预处理.

由于在电离层掩星中,信号传播路径的弯曲角普遍小于 0.03° ,可将传播路径近似为直线,两个频率信号传播路径相同^[12].基于这一假设,对每一次采样,利用式(1)由双频附加相位延迟观测值提取信号传播路径上的 TEC 含量(量值记为 ε_{TEC})^[13]:

$$\varepsilon_{\text{TEC}} = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)}(\phi_1 - \phi_2), \quad (1)$$

式中: f_1 与 f_2 分别为 L1 和 L2 波段的载波频率; ϕ_1 与 ϕ_2 分别为两个频率的附加相位延迟. 该采样信号传播路径对应的近地点坐标由 GNSS 卫星和 LEO 卫星的位置得到. 相应的碰撞系数 p 由式(2)得到:

$$p = \frac{r_L r_G \sin \theta}{\sqrt{r_L^2 + r_G^2 - 2r_L r_G \cos \theta}}, \quad (2)$$

式中: θ 为 GNSS 卫星与 LEO 卫星关于地心连线向量的夹角; r_G 和 r_L 分别为 GNSS 卫星和 LEO 卫星的地心向径. 进一步由式(3)所示的 Abel 积分即可得到电子密度随碰撞系数变化的廓线 $N_e(p)$:

$$N_e(p) = -\frac{1}{\pi} \int_p^{+\infty} \frac{d\varepsilon_{\text{TEC}}(x)}{\sqrt{x^2 - p^2}} dx, \quad (3)$$

式中: $d\varepsilon_{\text{TEC}}(x)$ 为 TEC 对碰撞系数 p 的微分序列. 考虑到 COSMIC 和 FY-3C 卫星轨道高度以上的电子密度可忽略, 将积分上限修改为 LEO 卫星的地心距离 r_L , 以消除式(3)积分上限的奇点问题^[11,14]. 对于式(3)中积分下线的奇点问题则通过采用“洋葱法”, 近似认为 $d\text{TEC}(x)$ 在极小区间内近似于直线变化, 将积分进行分层处理和积分转换解决^[4,15].

此外, 由式(1)计算的 TEC 是从 GNSS 卫星到 LEO 卫星整个路径的总电子含量. 但由于碰撞参数的最大值只能达到 LEO 轨道高度 r_L , 导致积分上限也只能取到 r_L , 因此真正需要的 TEC 是从反演高度到 r_L 这一段路径的总电子含量. 上述两个 TEC 的差异本质上是 LEO 卫星轨道高度以上直至 GNSS 卫星这一段路径的总电子含量. 由于掩星事件观测资料中一般会同时存在掩星时段和非掩星时段的观测数据, 可利用非掩星时段的观测数据计算得到的 TEC 序列对掩星时段计算得到的 TEC 序列进行改正^[7,11]. 但掩星时段和非掩星时段的碰撞高度序列并不完全一致. 对于掩星时段采样的碰撞系数而言, 需通过插值得到非掩星时段相同碰撞系数对应的 TEC 值. 当非掩星时段数据量很少或只有部分高度区间的的数据时, 插值可能引入较大误差. 本文在反演过程中对进行和不进行 TEC 改正的反演结果进行了比较, 发现需根据两个掩星任务相位数据的特点采用不同方案.

2 结果与分析

2.1 相位平滑效果比较

图 3 给出了两个掩星任务的代表性掩星事件的

附加相位延迟观测序列的平滑效果示例. 图 3a 和 3b 分别为 COSMIC 和 FY-3C 的示例, 子图名分别为相应掩星事件的标识, 并分别给出了该掩星事件 L1 和 L2 波段附加相位前 100 s 的处理结果. 可以看到, 平滑处理对于 FY-3C 掩星任务“IE”相位数据效果明显, 高频噪声得到抑制; 而对于 COSMIC 掩星任务的“ionPhs”相位数据并无显著效果, 这是因为 COSMIC 相位数据产品已经滤波处理. 因此在实际反演过程中, 对于 COSMIC 数据的反演可不进行相位平滑, 直接处理.

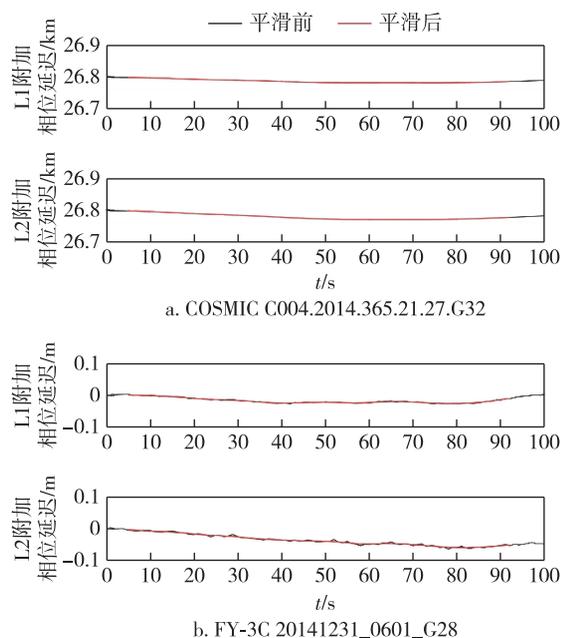


图 3 COSMIC 与 FY-3C 掩星附加相位延迟序列平滑效果对比

Fig. 3 Comparison of the excess phase delay filtering effect between COSMIC (a) and FY-3C (b)

2.2 TEC 改正效果比较

为了认识进行 TEC 改正对于反演结果的影响, 对两个掩星任务分别采取进行 TEC 改正和不进行 TEC 改正的反演方案, 将反演结果与官方产品进行比较. 图 4 给出了图 3 所示的两个掩星任务的代表性掩星事件在这两种不同方案下的 TEC 和 EDP 廓线反演结果, 以及该掩星事件的官方廓线产品. 其中 TEC 廓线给出了各近地点高度对应的信号传播路径上的总电子含量.

图 4a 表明对于该 COSMIC 掩星事件, TEC 改正对于 600~800 km 高度区间的 EDP 反演结果有一定程度改善, 采用进行 TEC 改正的反演方案得到的 EDP 反演结果在这一高度区间与官方产品更接近,

而 TEC 改正与否对于其他高度区间 EDP 反演结果影响不大.图 4b 表明进行 TEC 改正对电离层 TEC 廓线的精度提升有显著效果,改正之后的 TEC 廓线与官方产品之间完全一致(蓝色实线与黑色虚线重合),而未经改正的 TEC 廓线与官方产品之间存在显著差异,该差异是由 LEO 卫星轨道高度以上的电子含量导致的.这表明 CDAAC 在 COSMIC 产品反演过程中进行了 TEC 改正.由图 4c 和 4d 可知,对于该 FY-3C 掩星事件,TEC 改正同样对 TEC 廓线反演结果的影响比对 EDP 反演结果的影响更显著.但与 COSMIC 掩星任务不同的是,FY-3C 官方 TEC 廓线产品与未经改正的 TEC 廓线反演结果完全一致(蓝色实线与红色虚线重合),却与经过改正的 TEC 廓线存在显著差异.这表明 FY-3C 官方在反演过程中并未进行 TEC 改正.其原因是 FY-3C 各掩星事件相位数据中非掩星时段的数据太少.

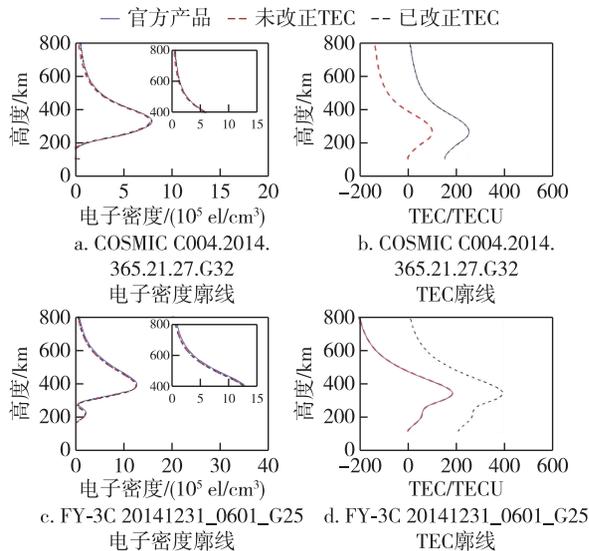


图4 COSMIC 与 FY-3C 掩星电离层反演 TEC 改正效果对比
Fig. 4 Comparison of TEC correction effect on TEC and EDP inversions for COSMIC (a,b) and FY-3C (c,d)

表 1 给出了这两个掩星事件的掩星时段与非掩星时段相位数据的高度区间.可以看到,COSMIC 相位数据的掩星时段与非掩星时段在高度区间上基本重合,因而掩星时段的任一碰撞系数对应的 TEC 均可用非掩星时段该碰撞系数对应的 TEC 插值进行改正.而 FY-3C 的非掩星时段数据集中在 800 km 以上,因此通过插值进行 TEC 改正存在较大误差.故在实际数据处理中,我们对 COSMIC 数据和 FY-3C 数据分别采用了进行 TEC 改正和不进行 TEC 改正的反演方案.

表 1 COSMIC 与 FY-3C 代表性掩星事件
掩星时段与非掩星时段的高度区间

Table 1 Height intervals of occultation and non-occultation period during representative RO events of COSMIC and FY-3C

掩星事件	高度区间 / km	
	掩星时段高度区间	非掩星时段高度区间
COSMIC C004.2014.365.21.27.G32	102.4~833.4	113.3~836.3
FY-3C 20141231_0601_G28	114.0~830.6	805.9~831.7

2.3 EDP 廓线反演个例

图 5 与图 6 分别给出了从 COSMIC 和 FY-3C 掩星数据中随机选择的四个掩星事件的 EDP 反演结果示例.各子图右上方标注了反演结果给出的峰值密度 NmF2 和峰值高度 hmF2 这两个重要的电离层特征参数相对于官方产品的偏差.图 5 和图 6 各子图 EDP 反演结果与官方产品在形态、位置和变化趋势等方面均具有很高相似性.表明对于两个掩星任务,采用本文的算法反演得到的 EDP 与官方 EDP 产品基本符合.由图 5 可见,COSMIC 任务四个掩星事件反演的峰值密度相对于 CDAAC 官方产品的偏差 NmF2 的最小和最大绝对值分别为 $0.054 \times 10^5 \text{ el/cm}^3$ 和 $0.130 \times 10^5 \text{ el/cm}^3$;峰值高度反演结果与 CDAAC 官方产品的偏差 ΔhmF2 的最小和最大绝对值分别为 0.081 km 和 3.705 km.由图 6 可见,FY-3C 任务四个掩星事件反演的峰值密度相对于 NSMC 官方产品的偏差 NmF2 的最小和最大绝对值分别为 $0.075 \times 10^5 \text{ el/cm}^3$ 和 $0.219 \times 10^5 \text{ el/cm}^3$;峰值高度反演结果相对于 NSMC 官方产品的偏差 ΔhmF2 的最小和最大绝对值分别为 1.945 km 和 5.076 km.上述差异均很小,而 COSMIC 反演结果与官方产品的一致性略好于 FY-3C 反演结果与官方产品的一致性.

2.4 峰值参数统计分析

对 COSMIC 和 FY-3C 两个掩星任务在 2014 年 12 月 31 日全天的电离层掩星一级相位数据进行处理,反演得到相应的电离层电子密度廓线,进而获取各电子密度廓线对应的峰值密度 NmF2 和峰值高度 hmF2 这两个电离层特征参数.需说明的是,由于掩星反演过程受到数据质量以及反演算法所需条件的影响,因此并非所有掩星事件都能成功反演.由于本文使用的反演算法与掩星任务官方的反演流程在具体细节上并不完全相同,因此两者反演成功并符合要求的廓线数量也存在细微差异.对本文使用的数据而言,COSMIC 的原始掩星事件共 841 次,其官方

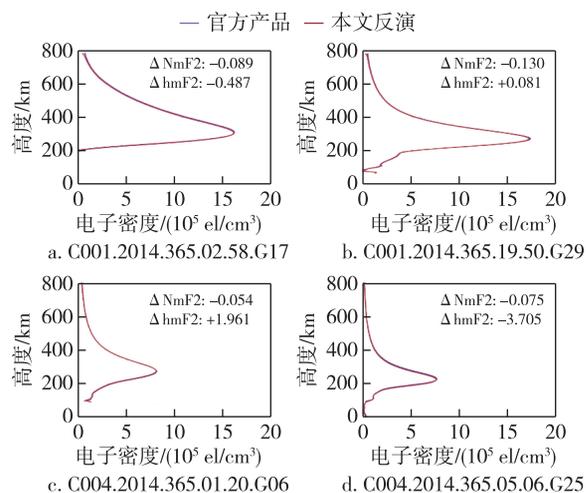


图5 COSMIC 掩星 EDP 廓线反演个别

Fig. 5 Examples of inverted COSMIC RO EDPs

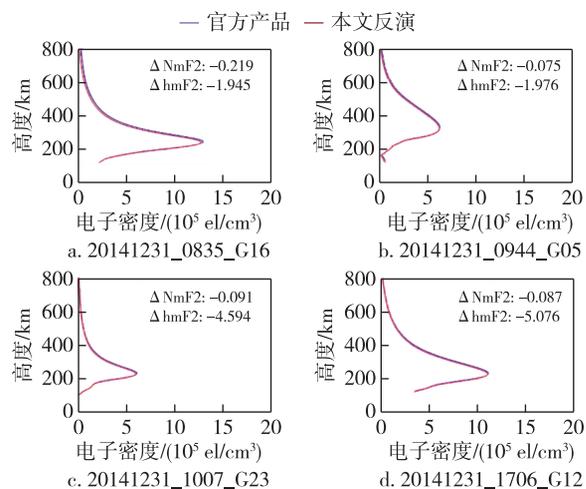


图6 FY-3C 掩星 EDP 廓线反演个别

Fig. 6 Examples of inverted FY-3C RO EDPs

提供的 EDP 反演产品共 728 条,本文成功反演的 EDP 共 648 条;FY-3C 的原始掩星事件共 184 次,其官方提供的 EDP 反演产品共 95 条,本文成功反演的 EDP 共 81 条.对所有成功反演的 EDP 的电离层峰值参数与官方产品提供的电离层峰值参数进行相关性分析,结果如图 7 所示.

由图 7 可见,本文反演的电离层峰值参数与官方产品几乎所有的匹配数据组均集中在 $y=x$ 参考线附近.图 7a 和 7b 表明,对于 COSMIC 掩星任务,在 648 组反演结果中,NmF2 和 hmF2 反演值与官方产品的相关系数分别达到 0.999 和 0.991,各自对应的回归直线斜率分别为 0.994 和 1.017.由图 7c 和 7d 可见,对于 FY-3C 掩星任务,在 81 组反演结果中,NmF2 和 hmF2 反演值与官方产品的相关系数分别

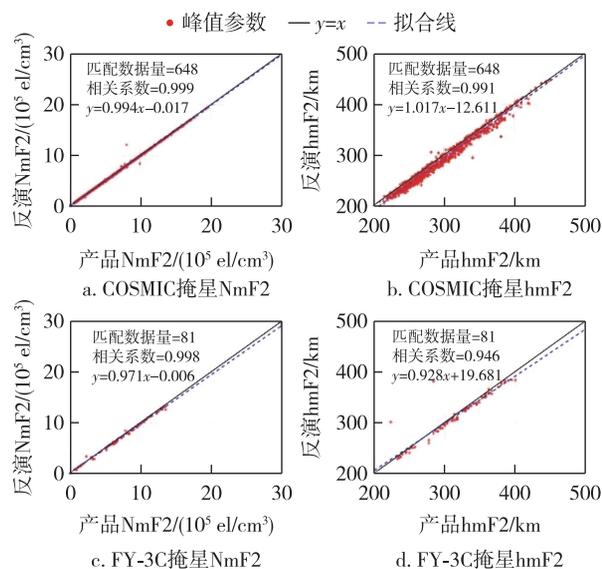


图7 2014 年 12 月 31 日 COSMIC 与 FY-3C 掩星电离层峰值参数反演结果与官方产品的相关性统计

Fig. 7 Correlation between inverted ionospheric peak parameters and official products for COSMIC (a,b) and FY-3C (c,d) RO missions during Dec. 31, 2014

达到 0.998 和 0.946,各自对应的回归直线斜率分别为 0.971 和 0.928.上述统计结果表明本文反演的电离层峰值参数与两个掩星任务官方产品提供的电离层峰值参数之间具有很高一致性,但 COSMIC 掩星数据反演结果与官方产品的相关性整体上优于 FY-3C.且对于两个掩星任务而言,NmF2 反演结果的相关性均优于 hmF2.进一步对峰值参数反演结果与官方产品之间的偏差进行统计分析,得到两个掩星任务峰值密度 NmF2 和峰值高度 hmF2 反演结果相对于官方产品的绝对偏差均值、相对偏差均值以及相关中误差,结果如表 2 所示.

表 2 中各统计参数绝对值越小,表明本文反演结果与官方产品之间的一致性越好.由表 2 可见,对于两个掩星任务而言,NmF2 与 hmF2 反演结果的偏差均值基本都在 0 附近.对于 COSMIC 任务,NmF2 反演结果的绝对偏差中误差和相对偏差中误差分别为 $0.182 \times 10^5 \text{ el/cm}^3$ 和 3.162%,hmF2 的绝对偏差中误差和相对偏差中误差分别为 6.984 km 和 3.162%;对于 FY-3C 任务,NmF2 反演结果的绝对偏差中误差和相对偏差中误差分别为 $0.243 \times 10^5 \text{ el/cm}^3$ 和 6.325%,hmF2 的绝对偏差中误差和相对偏差中误差分别为 14.830 km 和 5.477%.两个掩星任务的偏差中误差均较小,但 COSMIC 峰值参数反演结果的偏差中误差低于 FY-3C.

表 2 2014 年 12 月 31 日 COSMIC 与 FY-3C 峰值参数
反演结果与官方产品的偏差统计

Table 2 Bias statistics between inverted ionospheric peak
parameters and official products for COSMIC and
FY-3C RO missions during Dec. 31, 2014

统计量	COSMIC	FY-3C
匹配数据量	648	81
NmF2 绝对偏差均值/(10^5 el/cm ³)	-0.058	-0.215
NmF2 相对偏差均值/%	-1.000	-2.900
NmF2 绝对偏差中误差/(10^5 el/cm ³)	0.182	0.243
NmF2 相对偏差中误差/%	3.162	6.325
hmF2 绝对偏差均值/km	-7.500	-3.050
hmF2 相对偏差均值/%	-2.600	-0.800
hmF2 绝对偏差中误差/km	6.984	14.830
hmF2 相对偏差中误差/%	3.162	5.477

3 结论

本文利用基于 TEC 的掩星电离层反演方法,在实现整个反演流程的基础上,对 2014 年 12 月 31 日的 COSMIC 和 FY-3C 电离层掩星数据进行处理.由两个掩星任务的电离层相位产品出发反演电子密度廓线,并进而得到 NmF2 和 hmF2 连个电离层峰值参数.利用 CDAAC 与 NSMC 分别提供的官方产品对反演结果进行验证,同时对两个掩星任务的数据处理细节进行比较.所得结论如下:

1) 采用基于 TEC 的反演算法对 FY-3C 和 COSMIC 掩星数据进行反演,所得结果与官方产品一致性均较好.其中 COSMIC 反演结果与 CDAAC 官方产品的一致性略好于 FY-3C 反演结果与 NSMC 官方产品的一致性,且 NmF2 的反演质量普遍好于 hmF2 的反演质量.

2) CDAAC 提供的 COSMIC 电离层相位数据产品本身已经过滤波处理,因此在反演过程中,对 COSMIC 数据的反演可不进行相位平滑;但对 NSMC 提供的 FY-3C 电离层相位数据产品进行反演处理之前有必要进行滤波平滑预处理.

3) 对于 COSMIC 掩星数据,基于非掩星时段的 TEC 对掩星时段 TEC 进行改正后所反演的电子密度廓线与 CDAAC 官方产品符合程度更高;而对于 FY-3C 掩星数据,由于各掩星事件非掩星时段的相位数据量太少,TEC 改正会引入较大误差,因此反演过程中不建议对 TEC 进行改正.

致谢:感谢 CDAAC 和 NSMC 分别提供的 COSMIC 和 FY-3C 掩星数据.

参考文献

References

- [1] 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]. *Annales Geophysicae*, 2005, 23(3): 653-658
- [2] Anthes R A, Bernhardt P A, Chen Y, et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: early results [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(3): 313-334
- [3] Mao T, Sun L F, Yang G L, et al. First ionospheric radio-occultation measurements from GNSS occultation sounder on the Chinese Feng-Yun 3C satellite [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(9): 5044-5053
- [4] 郭鹏, 严豪健, 洪振杰, 等. GPS/LEO 掩星技术中 Abel 积分变换的奇点问题 [J]. *天文学报*, 2004, 45(3): 330-337
GUO Peng, YAN Haojian, HONG Zhenjie, et al. On the singular point of Abel integral transformation in GPS/LEO occultation technique [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2004, 45(3): 330-337
- [5] Yue X, Schreiner W S, Lei J, et al. Error analysis of Abel retrieved electron density profiles from radio occultation measurements [J]. *Annales Geophysicae*, 2010, 28(1): 217-222
- [6] 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]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(6): 929-938
- [7] 吴小成. 电离层无线电掩星技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2008
WU Xiaocheng. Radio occultation technique for ionosphere detection [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2008
- [8] 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]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2015, 5: A21
- [9] 徐晓华. 利用 GNSS 无线电掩星技术探测地球大气的研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2003
XU Xiaohua. Research on observing the earth's atmosphere with the GNSS radio occultation technique [D]. Wuhan: Wuhan University, 2003
- [10] 宫晓艳. 大气无线电 GNSS 掩星探测技术研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009
GONG Xiaoyan. Research on GNSS atmospheric radio occultation technique [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2009
- [11] 赵莹. GNSS 电离层掩星反演技术及应用研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2011
ZHAO Ying. GNSS ionospheric occultation inversion and its application [D]. Wuhan: Wuhan University, 2011
- [12] Schreiner W S, Sokolovskiy S V, Rocken C, et al. Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data in the

- ionosphere[J].Radio Science,1999,34(4):949-966
- [13] Yang G L,Sun Y Q,Bai W H,et al.Validation results of NmF2 and hmF2 derived from ionospheric density profiles of GNOS on FY-3C satellite[J].Science China Technological Sciences,2018,61(9):1372-1383
- [14] 曾桢,胡雄,张训械,等.电离层 GPS 掩星观测反演技术[J].地球物理学报,2004,47(4):578-583
ZENG Zhen,HU Xiong,ZHANG Xunxie, et al.Inversion of ionospheric GPS occultation data[J].Chinese Journal of Geophysics,2004,47(4):578-583
- [15] 王涵.FY-3C 掩星电离层产品的反演、验证及其在偶发 E 层研究中的应用[D].武汉:武汉大学,2020
WANG Han.The inversion,quality verification of FY-3C radio occultation ionospheric product and its application in sporadic E layer study [D]. Wuhan: Wuhan University,2020

Comparison of ionospheric inversions between COSMIC and FY-3C radio occultation missions

WANG Han¹ XU Xiaohua^{1,2} LUO Jia^{1,3}

1 School of Geodesy and Geomatics,Wuhan University,Wuhan 430079

2 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology,Wuhan University,Wuhan 430079

3 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy,Ministry of Education,Wuhan University,Wuhan 430079

Abstract With the Total Electron Content (TEC)-based Electron Density Profile (EDP) inversion method, the phase data of Radio Occultation (RO) events of Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate (COSMIC) and Fengyun-3C (FY-3C) missions are processed. The inverted EDPs and ionospheric peak parameters are compared with the official products of the two RO missions, respectively. It is found that although good consistencies exist between the inverted results and the official products for both of the two missions, the consistency is more significant for COSMIC mission. Besides, for both of the two RO missions, the consistence between the inverted NmF2 values and the official products is better than that between the inverted hmF2 values and the official products. There are some differences in detailed inversion processes between the two RO missions. First, it is necessary to smooth the phase data before the EDP inversion process for FY-3C mission, which is not the case for COSMIC mission. Second, although TEC correction is effective for COSMIC RO EDP inversions, it is not a recommended practice in FY-3C EDP inversion process due to the non-availability of enough non-RO period phase data in FY-3C RO mission.

Key words radio occultation; COSMIC; FY-3C; Electron Density Profiles (EDP); ionospheric peak parameters; inversion