

COSMIC 电离层掩星反演模拟及星座优化*

许波波¹ 王 成² 张雨露³
文援兰¹ 何丽娜¹ 李 桢²

1(河海大学地球科学与工程学院 南京 211100)

2(北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院 北京 100191)

3(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘 要 基于卫星导航系统精密星历和 NeQuick 模型模拟 COSMIC 星座电离层掩星事件的几何过程和物理数据, 并采用改正 TEC 法和“洋葱分层”算法反演电离层三维电子密度. 模拟反演得到的电子密度廓线与模型变化趋势一致, 偏差较小. 电离层 $h_m F_2$, $N_m F_2$ 的绝对误差分别为 4.2 km 和 $0.26 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, 相对误差分别为 1.66% 和 4.95%, 反演值与模型值的线性回归决定系数 R^2 分别为 0.956 和 0.950, 表明掩星反演模拟完整可靠、正确有效. 在几何模拟正确的基础上, 分析了 COSMIC-2 完全组网时的掩星观测性能及多系统 GNSS 对掩星数量及空间分布特征的影响. 为提高未来掩星事件的时效性及时空分布的均匀性, 提出了一种掩星分布均匀性指数, 并且通过非支配排序遗传算法实现掩星星座卫星总数、轨道面数、轨道倾角的最优确定.

关键词 COSMIC, 电离层, 掩星反演, 模拟, 电子密度

中图分类号 P352.7

COSMIC Ionospheric Occultation Inversion Simulation and Constellation Optimization Research

XU Bobo¹ WANG Cheng² ZHANG Yulu³
WEN Yuanlan¹ HE Lina¹ LI Zhen²

1(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100)

2(Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191)

3(Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract Using precise GNSS ephemeris and the NeQuick model, we simulated the geometric process and physical data of COSMIC ionospheric Radio Occultation (RO), and inverted the three-dimensional electron density of the ionosphere using the calibrated TEC method and “onion layering” algorithm. The obtained electron density profile was found to be consistent with the model trend with small deviations.

* 国家重点研发计划项目 (2022YFB3904402) 和国家自然科学基金重点项目 (41931075) 共同资助

2022-11-25 收到原稿, 2023-02-23 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

The absolute errors of ionospheric $h_m F_2$ and $N_m F_2$ were 4.2 km and $0.26 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, respectively, with relative errors of 1.66% and 4.95%, respectively. The linear regression coefficient of determination R^2 for the ionospheric $h_m F_2$ and $N_m F_2$ inversion results and model values were 0.956 and 0.950, respectively, indicating the completeness, correctness, and effectiveness of the occultation inversion simulation. Building on the correct geometric simulation, we analyzed the occultation observation performance of COSMIC-2 and the influence of multi-GNSS on the number and spatial distribution characteristics of occultation. It is found that the number of navigation satellites participating in the occultation observation is proportional to the occultation event, and the uniformity of the occultation distribution significantly improves with the increase in navigation satellites. To enhance the timeliness of future occultation events and the uniformity of their spatial and temporal distribution, the uniformity index of occultation distribution is proposed and improved the COSMIC-2B using a fast non-dominated sorting genetic algorithm to determine the optimal total number of occultation satellites, number of orbital planes, and orbital inclination. The optimal configuration of 38/19/1:800 km, 75.21° was found, achieving the design goals of $N \leq 40$, $F=1$, $h=800$ km, $72^\circ \leq i < 90^\circ$. With 106 satellites including GPS, Galileo, GLONASS, and BDS-3 in one hour, this configuration can observe 2675 occultation events with uniform spatial and temporal distribution.

Key words COSMIC, Ionosphere, Occultation inversion, Simulation, Electron density

0 引言

20 世纪 90 年代以来, 随着 GPS(Global Positioning System) 组网完成, 大量廉价的 GPS 信号源促进无线电掩星技术迅速发展, 使之成为重要的大气监测手段^[1,2]. GNSS(Global Navigation Satellite System) 电离层掩星探测技术具有全天候观测、全球覆盖、成本低廉、长期稳定、垂直分辨率高和电子密度反演精度较高等优势, 能够弥补海洋、极地等特殊区域电离层观测资料的不足, 因此对电离层建模、空间天气气候等研究具有重要价值^[3-9]. 随着 GPS/MET 试验顺利实施, 多个国家或地区相继开展了自己的掩星计划, CHAMP(Challenging Minisatellite Payload)、GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)、COSMIC(Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate)、风云 3C、风云 3D 等卫星相继发射, 极大丰富了掩星观测资料^[10]. 其中 COSMIC 具有重要的意义, 其由中国台湾和美国合作研制并于 2006 年发射, 平均每天提供约 2500 次掩星事件^[11]. 随着各国对外层空间的探索加快和航天事业的高速发展, 可以预见未来掩星技术将具备更显著的应用价值.

有关电离层掩星模拟研究不断深入, 定量估算了电离层掩星反演算法的精度和各种误差来源的影响,

分析了影响掩星数量和分布的轨道因素. Wu 等^[12] 基于仿真确定球对称近似是反演误差的主要来源, 相位测量误差和卫星轨道误差对反演的影响很小, 且季节、地磁纬度和本地时间与反演相对误差存在关联. Yue 等^[13,14] 通过模拟获得电子密度廓线 (Electron Density Profile, EDP) 的误差分布, 验证了电离层 $h_m F_2$ 和 $N_m F_2$ 的反演准确性, 且发现在低纬度地区 and 低海拔地区反演可靠性降低, 太阳活动和卫星轨道高度变化不会影响成功反演的比例及相对误差, 轨道电子密度不会对 Abel 反演结果产生本质影响. Sun^[15] 通过仿真软件验证了 Abel 反演和“洋葱分层”反演精度近似, 并分析了太阳活动对反演误差的影响. Zhao 等^[16] 通过模拟讨论了 LEO(Low Earth Orbit) 卫星的轨道倾角和高度对 GPS 掩星数量和分布的影响情况. Xu 等^[17,18] 研究了单颗 LEO 卫星轨道升交角距、升交点赤经、轨道高度和倾角以及玫瑰星座参数对掩星数量和分布的影响. Wang 等^[19] 通过仿真计算, 确定了不同 LEO 轨道参数下不同北斗卫星的掩星特点.

随着多 GNSS 的发展和现代化, 100 多颗 GNSS 卫星带来更丰富的观测数据, 有望大幅提升电离层掩星探测的时空分辨率, 推动掩星技术的发展. 本文基于 NeQuick 模型模拟掩星观测, 基于“洋葱分层”算法进行反演, 提出一种掩星分布的均匀性评价指数,

分析多 GNSS 观测对掩星数量和分布的影响规律,在此基础上利用遗传算法改进 COSMIC-2 星座满足未来电离层研究的时效性需求。

1 掩星事件仿真

1.1 仿真过程

电离层掩星模拟过程如下: (1) 首先模拟掩星观测的几何过程,从而判别掩星是否发生; (2) 其次模拟掩星观测的物理数据,基于 NeQuick 模型积分得到信号路径上的 TEC(Total Electron Content); (3) 最后进行掩星反演,采用改正 TEC 方法和“洋葱分层”算法反演出 EDP,并计算 $h_m F_2$ 和 $N_m F_2$. 其流程如图 1 所示。

1.1.1 设置仿真参数

仿真参数包括 GNSS 和 LEO 精密星历、开始时刻、持续时长、采样率、天线视场中心方向和天线极限功率波束宽(半角)。

1.1.2 判别掩星事件

由于电离层折射造成的信号路径弯曲极小,可假设信号路径为直线。当满足以下条件时,认为两星处于掩星状态: (1) 掩星切点在两星连线之间; (2) 掩星切点高度大于 60 km 且低于 LEO 轨道高度 1 km;

(3) GNSS 信号在 LEO 卫星天线接收范围之内。

假设 $AB = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$ 为信号路径,根据垂直关系和共线关系,掩星切点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 的坐标可由下式计算:

$$\frac{x_p - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y_p - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z_p - z_1}{z_2 - z_1} = \frac{-x_1(x_2 - x_1) - y_1(y_2 - y_1) - z_1(z_2 - z_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}. \quad (1)$$

当 P 点介于 A 与 B 两点之间,且 P 点高度满足条件,而 GNSS 卫星相对于 LEO 卫星的方位角和仰角均在天线视场内时,则判定两星正处于掩星状态。

1.1.3 模拟掩星数据

直接获取掩星观测的 TEC,有

$$T(p) = \left[\int_p^{r_{\text{GNSS}}} + \int_p^{r_{\text{LEO}}} \right] \frac{r N_e(r)}{\sqrt{r^2 - p^2}} dr \cong 2 \int_p^{r_{\text{LEO}}} \frac{r N_e(r)}{\sqrt{r^2 - p^2}} dr. \quad (2)$$

其中, T 为路径上的 TEC, p 为碰撞参数, N_e 为 NeQuick 模型计算的电子密度值。 T 由龙贝格求积算法加速计算,控制理论误差在 0.001 TECU 以内。

1.1.4 反演 EDP

采用 Schreiner 等^[20]提出的改正 TEC 方法消除 LEO 轨道高度以上的 TEC,并采用 Lei 等^[21]提出的

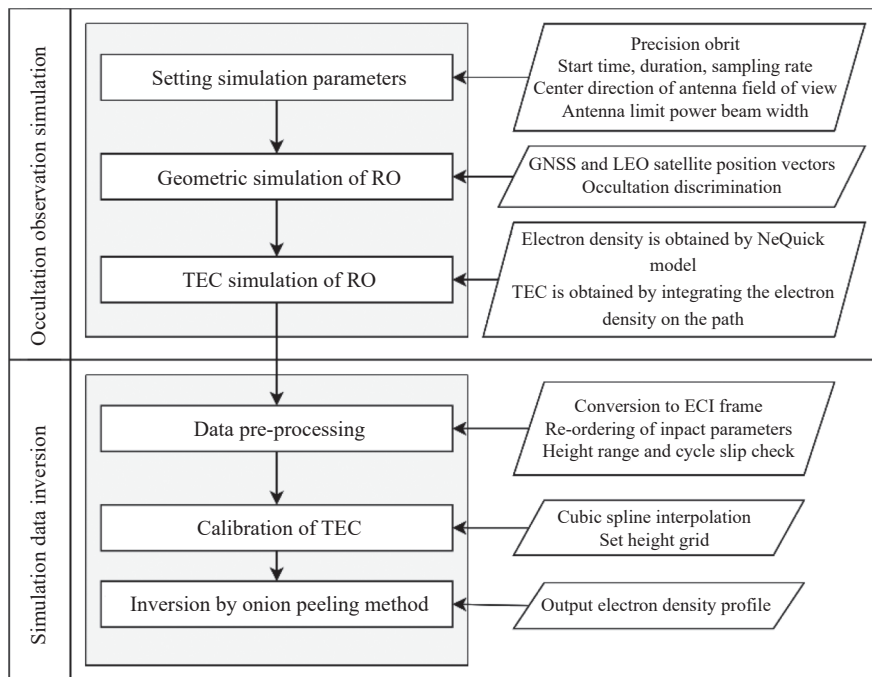


图 1 掩星电离层探测模拟流程

Fig. 1 Simulation flow chart of ionospheric occultation detection

“洋葱分层”算法进行反演. “洋葱分层”算法将信号路径划分为 m 个球层, 第 i 个球层电子密度反演如下:

$$N_e(p_i) = c_{i,0}^{-1} \left[\frac{T(p_i)}{p_i} - \sum_{k=1}^m c_{i,k} N_e(p_{i+k}) \right]. \quad (3)$$

其中, $c_{i,k}$ ($k=0,1,\dots,m$) 为无量纲系数, 可由下式计算得到:

$$\varepsilon_k = (p_{i+k} - p_i) / p_i, \quad (4)$$

$$\delta_k = \sqrt{\varepsilon_k(2 + \varepsilon_k)}, \quad (5)$$

$$c_{i,0} = \varepsilon_1^{-1} [(1 + \varepsilon_1)\delta_1 - \ln(1 + \varepsilon_1 + \delta_1)], \quad (6)$$

$$c_{i,k} = (\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k)^{-1} \left[(1 + \varepsilon_{k+1})(\delta_{k+1} - \delta_k) - \ln \left(\frac{1 + \varepsilon_{k+1} + \delta_{k+1}}{1 + \varepsilon_k + \delta_k} \right) \right] - (\varepsilon_k - \varepsilon_{k-1})^{-1} \left[(1 + \varepsilon_{k-1})(\delta_k - \delta_{k-1}) - \ln \left(\frac{1 + \varepsilon_k + \delta_k}{1 + \varepsilon_{k-1} + \delta_{k-1}} \right) \right], \quad (7)$$

$$c_{i,m} = -(\varepsilon_m - \varepsilon_{m-1})^{-1} \left[(1 - \varepsilon_m + 2\varepsilon_{m-1})\delta_m - (1 + \varepsilon_{m-1})\delta_{m-1} - \ln \left(\frac{1 + \varepsilon_m + \delta_m}{1 + \varepsilon_{m-1} + \delta_{m-1}} \right) \right]. \quad (8)$$

其中, ε 和 δ 均为中间变量. 顶部 p_{top} 球层电子密度初值为

$$T(p_i) \approx 2N_e(p_{\text{top}}) \sqrt{2p_{\text{top}}(p_{\text{top}} - p_i)}. \quad (9)$$

1.2 仿真结果

在 1 Hz 采样率下模拟了 2022 年 7 月 1 日 COSMIC-1 的 GPS 掩星观测, 其中天线视场中心方向为沿轨道方向, 天线极限功率波束宽为 65° . 模拟获得全天 3092 次掩星事件, 其分布如图 2 所示 (本文掩星分布均以 350 km 的掩星切点表示). COSMIC-1 由于星上载荷间断性工作、天线信噪比低、卫星姿态控制不稳定等多重技术障碍, 在未进行数据质量控制时每日提供约 2500 次掩星事件, 仅为期望值的 $5/6$ ^[22], 由于模拟过程未考虑多重技术障碍的影响, 因此仿真所得的 3092 次掩星事件符合 COSMIC-1 的设计期望, 掩星数量相当准确.

图 3 给出的是其中一次掩星事件的反演结果. 从图 3(a) 可以看到, TEC 随着高度下降逐渐增长, 至 250 km 附近达到峰值, 而后减少到一个较大的数值,

与实际观测数据的变化相符, 表明掩星数据模拟准确; 而 TEC 改正值也随着高度下降逐渐减小, 且改正后的 TEC 在卫星轨道高度处几乎为 0, 这表明改正 TEC 准确. 从图 3(b) 可以看到, EDP 反演结果与 NeQuick 模型值的变化趋势一致、偏差较小, 这表明

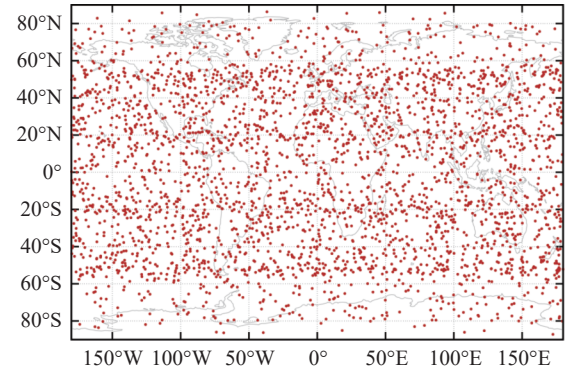


图 2 2022 年 7 月 1 日 COSMIC-1 与 GPS 掩星全球分布模拟结果

Fig. 2 Global distribution of COSMIC-1 and GPS occultation simulation results on 1 July 2022

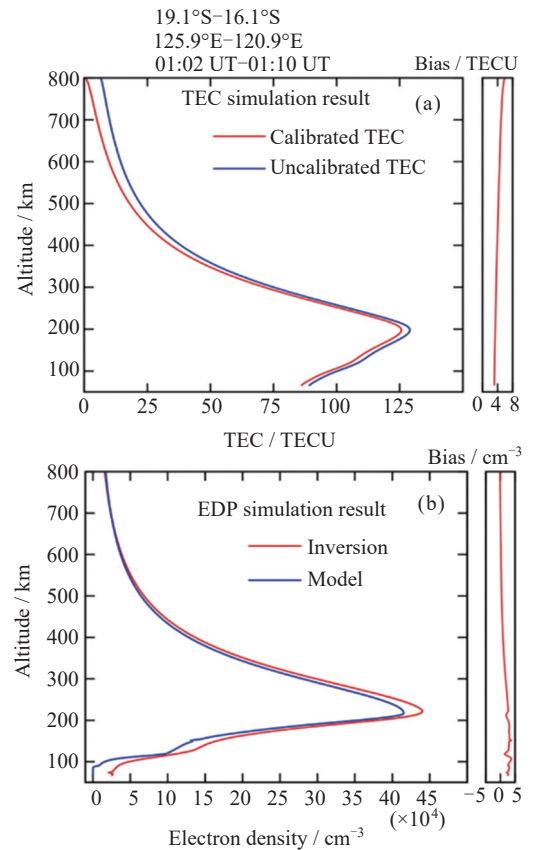


图 3 掩星电离层反演结果

Fig. 3 Results of occultation ionosphere inversion

单次掩星事件的 EDP 反演结果准确可靠.

图 4 为电离层峰值参数的相关性分析. 从图 4(a) 可以看出, $h_m F_2$ 散点的决定系数为 0.95632, 回归直线斜率为 0.96558, 从图 4(b) 可以看到, $N_m F_2$ 散点的决定系数为 0.95042, 回归直线斜率为 1.03183, 这表明电离层峰值参数的反演值和模型值具有极高的相关性. 并且 $h_m F_2$ 散点大多分布在直线 $y=x$ 以下, 可以认为“洋葱分层”反演算法高估了 $h_m F_2$, 测试表明该现象和 TEC 积分精度、模式的分辨率无关, 可能是由算法本身导致. 表 1 为电离层峰值参数的误差统计, 从表中可以看到 $h_m F_2$ 和 $N_m F_2$ 的绝对误差分别为 4.214 km 和 $0.258 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, 相对误差分别为 1.658% 和 4.95%, 绝对误差和相对误差都较小. 仿真结果充分展现了掩星仿真试验的完整性, 不仅表明反演过程准确可靠, 同时也在侧面检验了几何过程模拟和掩星观测数据模拟的正确性, 充分说明该仿真试验正确有效.

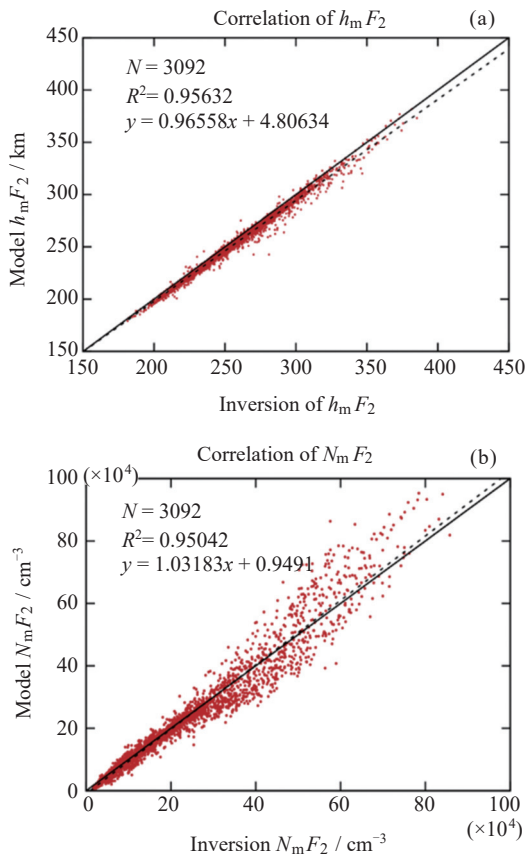


图 4 电离层峰值参数反演值与模型值的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of ionospheric peak parameters between inversion value and model value

2 掩星星座优化

为促进电离层研究的进一步发展, 需要提高数据的时效性, 因此未来需要在较短时间内获得全球分布比较均匀且相对密集的数据, 由于地基电离层监测的局限性, 必须提升掩星星座的性能. 目前掩星星座设计往往以增加掩星数量为目标, 轻视其分布均匀性, 降低了掩星数据的可用性.

假如仅使用掩星数据建立时间分辨率更高的 GIM(Global Ionospheric Maps) 模型, 如时间分辨率为 1 h, 相比于海量的地基 GNSS 观测数据, COSMIC-1 平均每小时提供 100 多条 EDP, 显然远远不够. 为满足日益丰富的数据需要, COSMIC-2 增添了 Galileo 和 GLONASS 观测, 然而其只实现了 2A 子星座的发射组网, 而 2B 子星座因故取消. 为探究 COSMIC-2 完全组网时的掩星观测性能, 采用表 2 复合 Walker- δ 星座设计仿真, 其星下点轨迹和 1 h 内掩星分布如图 5 所示. 通过该图可知相应的掩星数据比较欠缺, 且均匀性很差. 因此, 即使 COSMIC-2 完全组网, 仍不能满足未来需要.

在不改变已经运行的 2A 星座的基础上, 本文通过改进 2B 星座设计, 使得 COSMIC-2 满足未来需要. 由于 Walker- δ 星座可以描述为 $N/P/F : h, i$. 其

表 1 电离层峰值参数反演结果与 NeQuick 模型的对比
Table 1 Comparison of ionospheric peak parameter inversion results with NeQuick model

	$h_m F_2$	$N_m F_2$
绝对误差均值	4.214 km	$0.258 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$
绝对误差标准差	7.501 km	$3.805 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$
相对误差均值	1.658%	4.950%
相对误差标准差	2.408%	17.968%

表 2 COSMIC-2 星座设计
Table 2 COSMIC-2 constellation design

	COSMIC-2 A	COSMIC-2 B
卫星总数	6	6 (+1备用)
轨道面数	6	6
相邻轨道相位因子	1	1
轨道倾角	24°	72°
轨道高度	550 km	800 km
视场范围	沿轨方向 45° 半角锥 天底方向 65° 半角锥	

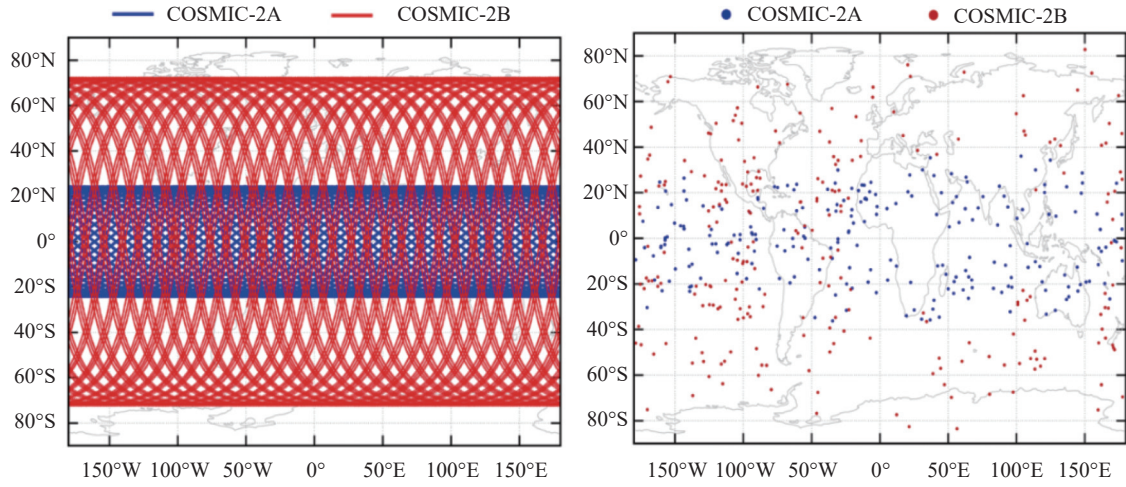


图5 完整 COSMIC-2 的星下点轨迹和 1 h 内掩星分布

Fig. 5 Sub-satellite point trajectory and occultation distribution within 1 h of the complete COSMIC-2

中, N 为星座中卫星总数; P 为轨道面数; F 为相邻轨道相位因子, 其是 $0 \sim P-1$ 之间的一个整数; h 为轨道高度; i 为轨道倾角. 因此设计目标为 $N \leq 40$, $F=1$, $h=800$ km, $72^\circ \leq i < 90^\circ$ 的 2B 星座, 与 2A 星座组合实现 COSMIC-2 在 1 h 内获得最优的掩星数量和空间分布. 其中, i 角范围与全纬度覆盖有关, 球面三角计算表明, 当轨道高度为 800 km 时轨道倾角至少为 72° 才能实现全纬度覆盖.

现有的掩星分布均匀性指标主要有纬度带指标^[17]、栅格指标^[18,19,23]、双栅指标^[24,25]. 上述指标在一定程度上反映了掩星分布的均匀性, 但纬度带指标忽略了经度方向的分布特性, 栅格指标忽略了掩星分布在大尺度范围内的疏离度, 双栅指标综合了这二者提高了敏感度, 但无法辨识在较小尺度上的聚集分布. 为进一步提高在较小尺度上的均匀性辨识能力, 本文提出 K 阶均匀性指数 (K -order Occultation Uniformity Index, OUIK), 其定义如下:

$$K(k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i^k - \bar{M}^k)^2}{n-1}}. \quad (10)$$

其中, $K(k)$ 为 OUIK, M^k 为掩星切点与同一高度最邻近的 k 个点的几何距离平均值, 设 k 的取值范围为 $1 \sim 50$. 如果 K 值更小, 则其掩星覆盖均匀性更优, 因此可以考虑使用一定范围内 K 的平均值评估掩星星座的覆盖均匀性.

相比于增加卫星数量, 充分利用在轨 GNSS 卫星显然能提升掩星数量并且成本较低, 但尚未有研究明

确指出多系统 GNSS 对掩星数量和分布的影响规律. 设掩星星座为 COSMIC-2, 其与多 GNSS 在 1 h 内观测的掩星数量和 K 值如图 6 所示. 从图 6(a) 可以看到, 掩星数量与 GNSS 卫星数成正比关系, 从图 6(b) 可以看出, 仅观测 GPS 时 K 值最大, 而观测 GPS、Galileo 双系统时 K 值显著下降, 观测 GPS、Galileo、GLONASS、BDS-3 四系统时 K 值进一步减小, 这表明多 GNSS 有效改善了掩星分布的均匀性.

星座优化设计是典型的多目标优化问题. 本文在多 GNSS 基础上, 利用非支配排序遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 实现星座参数寻优. 其基本步骤如下: (1) 设计星座染色体并产生初始种群; (2) 计算目标函数值, 从而识别非劣解, 通过选择、交叉和变异产生子代; (3) 混合父代和子代, 不断重复步骤 (2) 直至满足条件.

采用二进制编码构造染色体, 以星座中卫星总数、轨道面数、轨道倾角三参数生成个体, 设置种群规模为 100, 并以式

$$f = \sum_{k=1}^{50} K(k)/50 \quad (11)$$

为目标函数进化 20 代, 获得的优化构型及其 K 值如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 卫星总数更多和轨道面数更多的个体有利于生存, 这表明增加掩星卫星数量和轨道面数对改善掩星分布的均匀性有着积极意义, 并且为了在 1 h 内覆盖全球, 每个轨道至少需要存在 2 颗卫星. 同时可以看到, 部分构型能以更小的成本

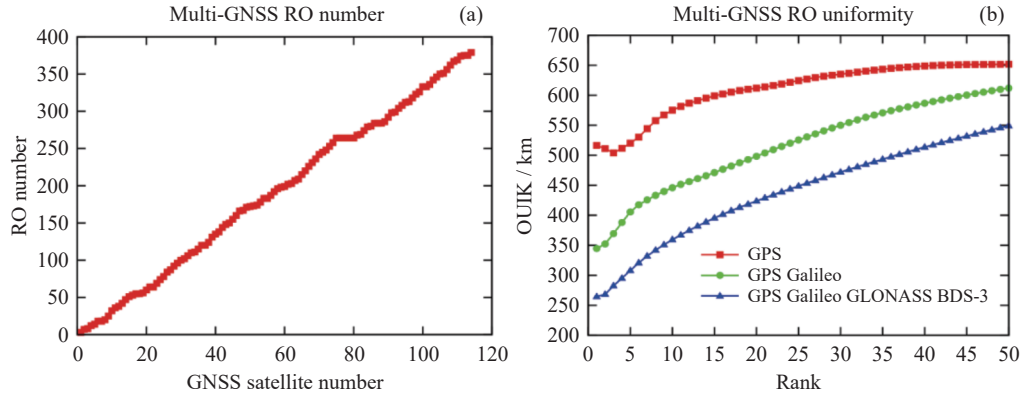


图 6 多 GNSS 掩星数量和分布分析

Fig. 6 Analysis of multi-GNSS occultation number and distribution

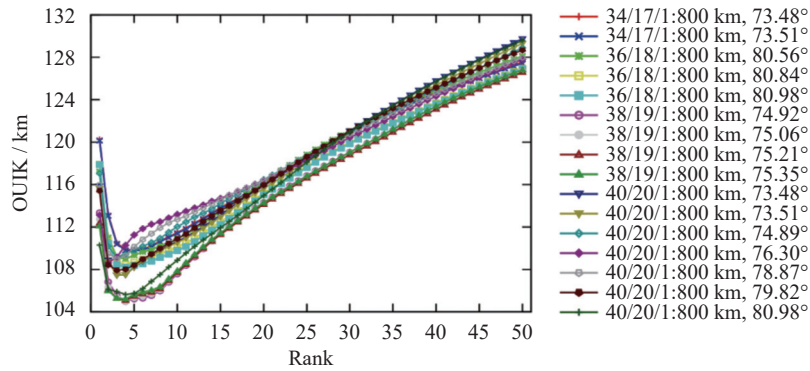


图 7 优化构型均匀性比较

Fig. 7 Comparison of optimized configuration uniformity

取得更好的掩星性能, 这说明星座优化设计意义重大. 最后根据其目标函数值判断, 构型为 38/19/1:800 km, 75.21° 的星座为满足目标的最优构型, 该构型使得 COSMIC-2 在 1 h 内与 GPS, Galileo, GLONASS, BDS-3 共 106 颗卫星观测到 2675 次掩星事件, 分布如图 8 所示.

3 结语

基于 NeQuick 模型数值模拟了掩星电离层探测过程, 利用“洋葱分层”算法实现了对电离层掩星的反演, 并用 COSMIC-1 的模拟数据验证了仿真的可靠性. 为满足未来的电离层研究需要, 探究了多 GNSS 对掩星数量和分布的影响, 提出一种掩星分布均匀性指数, 并在 COSMIC-2 基础上, 利用 NSGA-II 算法确定一种掩星事件在 1 h 内全球均匀分布的 Walker- δ 星座. 所得结论如下.

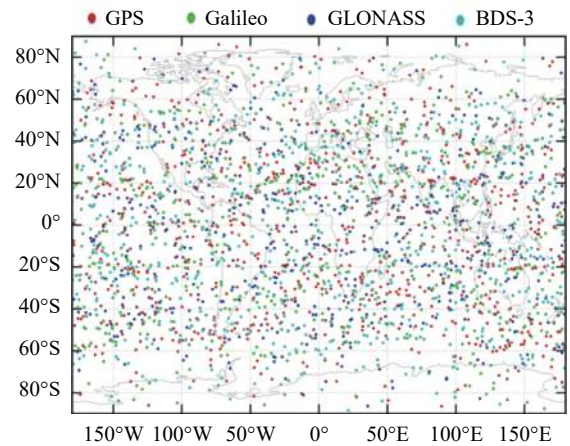


图 8 最优构型掩星分布

Fig. 8 Optimal configuration occultation distribution

(1) 模拟反演结果与 NeQuick 模型的偏差较小, 3092 次掩星事件反演的 $h_m F_2$ 和 $N_m F_2$ 反演值与模型值的决定系数 R^2 分别为 0.95632 和 0.95042, 表明模

拟算法正确有效.

(2) 多导航系统对掩星观测的提升显著. 结果表明, 掩星事件与参与掩星观测的导航卫星数量成正比关系, 并且随着导航卫星的增多, 掩星分布的均匀性得到了显著的改善.

(3) 探究了 COSMIC-2 完全组网时的掩星观测性能, 确定其无法满足在较短时间内获得全球分布比较均匀且相对密集的电离层数据的未来需要. 利用 NSGA-II 算法改进 COSMIC-2B 星座设计, 在 $N \leq 40$, $F=1$, $h=800$ km, $72^\circ \leq i < 90^\circ$ 的设计目标下, 最优构型为 38/19/1:800 km, 75.21° , 可在 1 h 内与 GPS, Galileo, GLONASS, BDS-3 共 106 颗卫星观测到 2675 次时空均匀分布的掩星事件, 更能满足未来电离层探测的时效性.

参考文献

- [1] HAJJ G A, ROMANS L J. Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment[J]. *Radio Science*, 1998, **33**(1): 175-190
- [2] HUANG Dong, HUANG Cheng, LI Jinling, *et al.* Monitoring the Earth's atmosphere with GPS radio occultation[J]. *Advances in Earth Science*, 1997, **12**(3): 217-223 (黄栋, 黄城, 李金岭, 等. GPS 无线电掩星技术监测地球大气 [J]. *地球科学进展*, 1997, **12**(3): 217-223)
- [3] ZENG Zhen, HU Xiong, ZHANG Xunjie, *et al.* Inversion of ionospheric GPS occultation data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, **47**(4): 578-583 (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)
- [4] ZHOU Yiyun, WU Yun, QIAO Xuejun, *et al.* GPS occultation technique and ionospheric inversion[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, **25**(2): 29-35 (周义炎, 吴云, 乔学军, 等. GPS 掩星技术和电离层反演 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, **25**(2): 29-35)
- [5] WU Xiaocheng. Radio Occultation Technique for Ionosphere Detection[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008 (吴小成. 电离层无线电掩星技术研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008)
- [6] LIU Jingnan, ZHAO Ying, ZHANG Xiaohong. Current situation and expectation of inversion of ionospheric GNSS occultation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, **35**(6): 631-635 (刘经南, 赵莹, 张小红. GNSS 无线电掩星电离层反演技术现状与展望 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, **35**(6): 631-635)
- [7] 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]. *Journal of Geodesy*, 2011, **85**(12): 949-964
- [8] YUE X A, SCHREINER W S, KUO Y H, *et al.* Global 3-D ionospheric electron density reanalysis based on multi-source data assimilation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A9): A09325
- [9] LIN C H, LIU J Y, CHENG C Z, *et al.* Three-dimensional ionospheric electron density structure of the Weddell Sea Anomaly[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A2): A02312
- [10] WANG Yeying, FU Yang, DU Xiaoyong, *et al.* Advances in global GNSS occultation projects[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2009, **37**(1): 74-78 (王也英, 符养, 杜晓勇, 等. 全球 GNSS 掩星计划进展 [J]. *气象科技*, 2009, **37**(1): 74-78)
- [11] WU Xiaocheng, HU Xiong, GONG Xiaoyan, *et al.* Three dimensional model constrained inversion method for ionospheric occultation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, **51**(3): 618-625 (吴小成, 胡雄, 宫晓艳, 等. 三维模式约束的电离层掩星反演方法 [J]. *地球物理学报*, 2008, **51**(3): 618-625)
- [12] WU X C, HU X, GONG X Y, *et al.* Analysis of inversion errors of ionospheric radio occultation[J]. *GPS Solutions*, 2009, **13**(3): 231-239
- [13] YUE X A, SCHREINER W S, LEI J H, *et al.* Error analysis of Abel retrieved electron density profiles from radio occultation measurements[J]. *Annales Geophysicae*, 2010, **28**(1): 217-222
- [14] YUE X A, SCHREINER W S, ROCKEN C, *et al.* Evaluation of the orbit altitude electron density estimation and its effect on the Abel inversion from radio occultation measurements[J]. *Radio science*, 2011, **46**(1): RS1013
- [15] SUN Fangfang. The Retrieval and Comparative Validation of COSMIC Radio Occultation Electron Density Profiles[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018 (孙方方. COSMIC 掩星电子密度廓线反演及比较验证 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018)
- [16] ZHAO Shijun, SUN Xuejin, ZHU Youcheng, *et al.* Effect of LEO satellite's orbit parameter on GPS occultation event's number and distribution[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2002, **3**(2): 85-89 (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 [J]. *解放军理工大学学报 (自然科学版)*, 2002, **3**(2): 85-89)
- [17] XU Xiaohua, LI Zhenghang, LUO Jia. Simulation of the impacts of single LEO satellite orbit parameters on the distribution and number of occultation events[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, **30**(7): 609-612 (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 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2005, **30**(7): 609-612)
- [18] XU Xiaohua, LI Zhenghang, LUO Jia. Simulation research

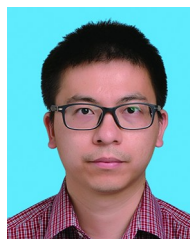
- on the impact of LEO constellation's parameters on the number and space-time distribution of GPS occultation events[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, **34**(4): 305-311 (徐晓华, 李征航, 罗佳. LEO 星座参数对 GPS 掩星数量和时空分布影响的模拟研究 [J]. *测绘学报*, 2005, **34**(4): 305-311)
- [19] WANG Xianyi, SUN Yueqiang, BAI Weihua, *et al.* Simulation of number and distribution of Compass occultation events[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, **56**(8): 2522-2530 (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 [J]. *地球物理学报*, 2013, **56**(8): 2522-2530)
- [20] 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
- [21] LEI J H, SYNDERGAARD S, BURNS A G, *et al.* Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: preliminary results[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 2007, **112**(A7): A07308
- [22] LIANG Bin, LI Cheng, WEI Shilong. Research on GNSS occultation atmospheric detection constellation design and configuration control method[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2018: 5-8 (梁斌, 李成, 魏世隆. GNSS 掩星大气探测星座设计与构型控制方法研究 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2018: 5-8)
- [23] POLI P, HEALY S B, RABIER F, *et al.* Preliminary assessment of the scalability of GPS radio occultations impact in numerical weather prediction[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(23): L23811
- [24] LIANG Bin, WANG Jueyao, LI Cheng, *et al.* Design of multi-GNSS occultation sounding satellite constellation[J]. *Journal of Astronautics*, 2016, **37**(3): 334-340 (梁斌, 王珏瑶, 李成, 等. 多 GNSS 掩星大气探测卫星星座设计 [J]. *宇航学报*, 2016, **37**(3): 334-340)
- [25] WANG J Y, LIANG B. 4-GNSS radio occultation satellite constellation design based on Dual-gate uniformity evaluation index[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2017, **231**(1): 3-16

作者简介



许波波 男, 1999 年 10 月出生于湖南省衡阳市. 现为河海大学测绘科学与技术系硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS 电离层监测.

E-mail: 211309020019@hhu.edu.cn



王 成 (通信作者) 男, 1985 年 10 月出生于湖北省荆门市. 现为北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院副研究员、博士生导师. 主要研究方向为电离层模型、空间天气和卫星导航定位.

E-mail: acheng@buaa.edu.cn