

doi: 10.19306/j.cnki.2095-8110.2016.03.010

GNSS 无线电掩星大气探测混合星座设计

梁 斌, 王珏瑶

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对目前 GNSS 无线电掩星大气探测卫星星座参数依赖大量仿真计算进行统计选取的研究现状, 通过将探测卫星星下点与大气测点间地心角距作为观测半径提出了一种虚拟“星—地”遥感假设, 给出了一种崭新的掩星测点预估方法, 具有计算速度快的特点。基于该方法推导了探测星座参数与大气探测覆盖性之间的极值相关特性, 建立了 GNSS 无线电掩星大气探测卫星星座设计准则, 并以 GPS 和 BD 为兼容性观测信源完成了 GNSS 掩星大气探测混合卫星星座设计。通过仿真试验, 验证了设计方法的快速性和可行性, GPS+BD 掩星大气探测混合星座每日可实现掩星探测量为 COSMIC 星座的 3 倍以上, 12h 内掩星测点全球分布均匀度提升 12%。

关键词: 全球导航定位系统; 大气探测; 无线电掩星; 低轨道卫星; 卫星星座

中图分类号: V474

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2016)03-0058-07

Research on the Multi-Constellation Design for GNSS RO Atmosphere Sounding

LIANG Bin, WANG Jue-yao

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The radio occultation (RO) atmospheric sounding with global navigation satellite system (GNSS) has extended a new area on LEO satellite constellation application in the last decade, while the constellation designs so far are majorly dependent on a mass of simulations and statistical results. With the assumption of the "satellite-to-earth" remote sensing which takes the geocentric angle between sub-satellite point and the sounding point as the sensing radius, a novel estimates method for GNSS RO soundings to accelerate the constellation design. Based on this method, the related features between constellation parameter and sounding coverage are derived; the design criteria of GNSS RO constellation for atmospheric sounding are established, and a GPS+BD RO constellation is designed with Sun-synchronous orbit and low-inclination orbit. The simulation results shows that the constellation design method proposed in this paper is feasible and effective, the amount of soundings by the multi-constellation designed in this paper is tripled of COSMIC, and the uniformity of the sounding coverage in 12h is improve by 12%.

Key words: GNSS; Atmosphere sounding; Radio occultation; LEO satellite; Orbit design

0 引言

随着科技的发展和人类活动向高层大气的拓展, 气象预测和控制研究是目前大气科学研究的重要前沿, 是航天工业发展和各国国家安全、公

共安全及人类与自然和谐可持续发展的保障。

GNSS 无线电掩星大气探测技术是 GNSS 气象学的重要分支^[1]。受在轨资源限制, 早期研究主要围绕 GPS 掩星大气探测开展, 通过将 GNSS 掩星观测仪作为副载荷搭载在多功能探测卫星上进行

收稿日期: 2015 - 02 - 01; 修订日期: 2015 - 05 - 01。

基金项目: 国家自然科学基金 (61175098)

作者简介: 梁斌 (1968 -), 男, 博士, 教授, 主要从事航天控制领域的研究工作。

E-mail: bliangcuhk@gmail.com

GNSS 无线电掩星大气探测相关技术实施的在轨验证, 研究重点以星载 GNSS 掩星接收仪的研制和 GNSS 无线电掩星大气探测数据应用为主, 探测卫星轨道依主载荷任务需求设计^[2]。近年来, 随着 GNSS 掩星接收仪技术的日益成熟, 探测卫星轨道设计作为 GNSS 无线电掩星大气探测技术发展应用的关键性技术问题逐渐得到了重视。目前, GNSS 无线电掩星大气探测卫星轨道研究依赖仿真计算展开, 通过建立 GNSS 星座模拟系统和 LEO 卫星轨道模拟系统, 枚举运行在不同轨道上的探测卫星对 GNSS 无线电掩星信号的观测工况, 统计得出掩星事件的数量和分布随探测卫星轨道参数变化的规律^[3-5], 并未涉及采用分析法推导轨道参数对探测性能影响特性, 这对处理 GNSS 掩星大气探测卫星轨道及星座设计问题而言显然是不完整的。

本文针对 GNSS 掩星大气探测卫星星座参数对探测性能影响特性问题, 在虚拟“星一地”观测假设下, 较完善地提供探测卫星星座设计准则, 简化了 GNSS 掩星大气探测星座设计方法, 并以我国现有 GNSS 掩星大气探测气象卫星为基础, 以 GPS 和我国北斗 (BD) 为观测信源, 提出了特别适用于我国大气探测需求的 GNSS 掩星大气探测混合星座设计方案, 为我国未来 GNSS 掩星大气探测系统研制提供参考。

1 GNSS 掩星大气探测基本原理

依探测仪置放点的不同, GNSS 气象学主要拥有地基 GNSS 探测、山基/空基 GNSS 大气探测和天基 GNSS 探测三种探测方式。天基 GNSS 大气探测技术研究始于 20 世纪 90 年代初, 它将 GNSS 接收机搭载在 LEO 卫星上, 当 GNSS 卫星相对 LEO 卫星从地球边缘升起 (或降下) 时, GNSS 无线电传播路径受大气电离层和中性层折射影响而发生弯曲, 信号相位出现延迟, 称为发生 GNSS 上升 (或下沉) 掩星事件。通过追踪记录 GNSS 无线电掩星 (Radio Occultation, RO) 信号可突破性地对地球大气进行“扫描”式探测, 如图 1 所示。

在高频“扫描”下, 天基 GNSS 大气探测可获取其他大气探测手段无法企及的大范围、高垂直分辨率大气折射率廓线信息。GNSS 掩星大气探测即是利用地球大气折射率与部分地球大气参数间

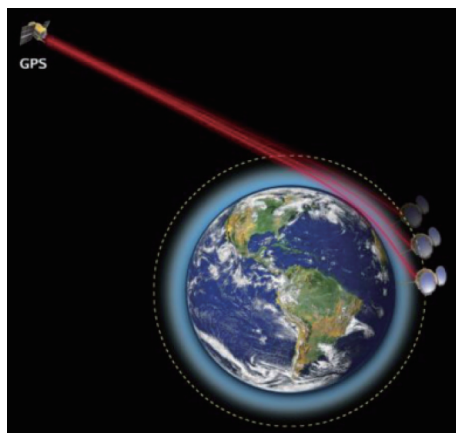


图 1 GNSS RO 掩星大气探测示意图^[6]

Fig. 1 Diagram of GNSS RO sounding^[6]

存在的函数关系, 以天基 GNSS 大气探测形式完成大气参数的高垂直分辨率间接探测。虽然当对流层湿度较大时, GNSS 掩星大气探测对流层温湿度存在含糊性, 需借助其他大气探测手段才能获得较为精准的大气探测信息, 但这种大气探测方式所具有的探测仪器无需校正、可全天时/全天候探测、长期稳定性好、探测数据垂直分辨率高、探测数据自标定、探测大气高度区间大、可全球覆盖等优点充分彰显了它在弥补其他大气探测手段, 尤其是在电离层大气探测及气候变化等长期性大气探测领域的应用价值。当在轨探测仪足够多时, GNSS 掩星大气探测技术更可实现近实时乃至实时大气探测。

在 GNSS 掩星大气探测数据处理过程中, 原始掩星数据由 GNSS 掩星大气探测 LEO 卫星及其地面站采集, 包括 LEO 卫星定轨及双频 GNSS 伪距及载波相位信息; GNSS 地面监测站网提供用于生成 LEO 卫星精密轨道信息的 GNSS 星历和用于双差掩星观测数据处理的 GNSS 伪距及载波相位信息; 通过对原始掩星信号相位信息的校正处理, 生成掩星信号相位延迟数据, 最终利用 Abel 积分几何光学算法或滑动频谱、全谱反演等物理光学反演算法, 融合 GNSS 星历、LEO 卫星精密轨道信息和掩星信号相位延迟及振幅等信息, 得到大气折射率分布廓线, 进而利用式 (1) 推算中性大气温度、大气压力和电离层大气电子密度等地球大气参数^[7]。

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} - 3.03 \times 10^7 \frac{n_e}{f^2} \quad (1)$$

式中： N 为大气折射率； T 为大气温度； e 为水气压； n_e 为电子密度； f 为GNSS载波信号频率。

2 GNSS 掩星测点预估方法

2.1 问题提出

GNSS 掩星大气探测星座基于“星—地—星”几何关系实现临边探测，是一种崭新的卫星星座应用模式。由于GNSS在轨运行状态的不可控和地球大气的动态变化，掩星事件的发生具有伪随机性，难以直接利用星座内卫星运行状态来表述星座探测覆盖性。

在理想假设下，将地球大气近似为均匀球对称洋葱型大气指数模型，考虑GNSS RO观测约束

$$\begin{cases} \theta_{\text{GOLmin}} \leq \theta_{\text{GOL}}(t) \leq \theta_{\text{GOLmax}} \\ \delta_{\text{R}}(t) \leq \delta_{\text{Ant}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： θ_{GOL} 为GNSS卫星与LEO卫星间地心角距， θ_{GOLmin} 和 θ_{GOLmax} 为掩星切点高度为观测范围极值时所对应GNSS-LEO地心角距极值； δ_{R} 为RO信号传播至LEO卫星的入射角； δ_{Ant} 为LEO星载掩星接收天线视场角。显然，在每次中性大气掩星探测前/后，必定伴随一次电离层掩星探测。

为预估GNSS RO测点，需仿真获取每一对GNSS-LEO卫星瞬时相对位置和姿态，通过对上述几何关系的一一对比来判定掩星事件是否发生，从而统计该LEO卫星星座GNSS RO大气探测性能，进而与探测星座设计任务指标相比较，迭代完成GNSS RO掩星大气探测星座设计，星座设计过程繁复且计算量巨大。

2.2 虚拟“星—地”遥感方法

当掩星事件发生时，掩星测点随机分布于以LEO卫星星下点为顶心的球带内。假设理想条件下，地球为标准球，掩星事件出现在LEO卫星掩星接收机视场内几率为100%。在此假设下，可将掩星接收机探测场近似作为具有锥形视场的星载对地观测仪，如图2所示。

图2中，红色弧线标注出了虚拟“星—地”掩星观测仪观测视场。设该观测仪内外半锥角分

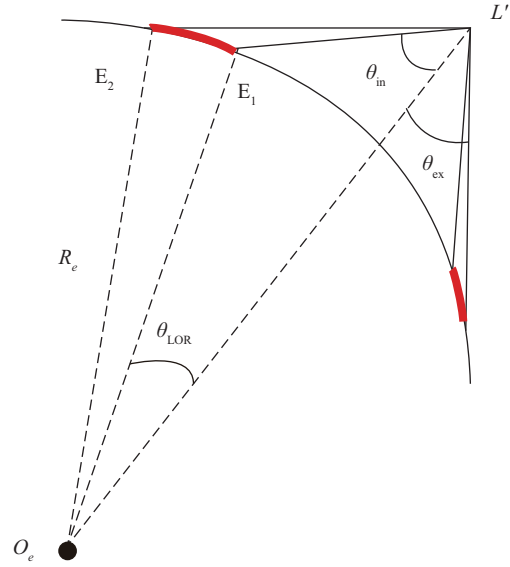


图2 GNSS RO 掩星虚拟观测仪

Fig. 2 Diagram of virtual GNSS RO sounding sensor

别为 θ_{in} 和 θ_{ex} ，由正弦定理有

$$\begin{cases} \frac{\sin \theta_{\text{in}}}{R_e} = \frac{\sin(\theta_{\text{in}} + \min(\theta_{\text{LOP}}) |_{a_{\text{LEO}}})}{a_{\text{LEO}}} \\ \frac{\sin \theta_{\text{ex}}}{R_e} = \frac{\sin(\theta_{\text{ex}} + \max(\theta_{\text{LOP}}) |_{a_{\text{LEO}}})}{a_{\text{LEO}}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： R_e 为地球半径； a_{LEO} 为探测卫星轨道半长轴； θ_{LOP} 为掩星切点与LEO卫星间地心夹角数组。

已知中性层大气折射先验计算式为

$$\begin{cases} N = 347 \exp(-0.137h) & 0 < h < 9 \text{ km} \\ N = 101.1 \exp(-0.137(h-9)) & 9 \text{ km} \leq h \leq 86 \text{ km} \end{cases} \quad (4)$$

式中： N 为大气折射率， h 为大气距地面高度。由于电离层对中性大气掩星的主要影响来自于 F_2 层和E层，因而未考虑层 F_1 和D层，利用双Chapman模型计算电离层E层和 F_2 层的电子浓度分布^[4,8]

$$n_e = N_e(h_0) \exp \left[\frac{1 - (h - h_0)/H - \exp(-(h - h_0)/H)}{2} \right] \quad (5)$$

式中： n_e 为电子密度， $N_e(h_0)$ 为最大电子浓度； h 为距地面的高度； h_0 为最大电子浓度距地面的高度； H 为尺度高度。在太阳活动剧烈的白天典

型情况下,各参数取值如表1所示。

表1 电离层电子浓度计算参数

Tab.1 Parameter for Ionospheric electron density calculation

电离层	$N_e(h_0)/m^{-3}$	h_0/km	H/km
E	2×10^{11}	105	5
F	3×10^{12}	300	60

电离层中,大气折射率与电子浓度和电磁波频率 f 的关系为

$$N = -4.028 \times 10^7 n_e / f^2 \quad (6)$$

假设地球大气球形对称,即折射率仅与到地心距离有关。由此,可将大气自地表向上按等高 dh 分层,认为每层内大气折射率为常值,计算与高度对应的大气折射梯度所生成的数组。其中大气折射指数计算式为

$$\mu = 10 - 6N + 1 = \frac{\sin AI}{\sin AO} \quad (7)$$

式中: μ 为大气折射指数; AI 和 AO 分别为无线电信号穿越层级时的入射角和折射角。

当RO事件发生时,设掩星切点 P 处于第 j 层。则RO信号自掩星切点至LEO卫星传播路径在大气模型中第 i 层内传播的地心偏转角度 dA 算式为^[9]

$$\begin{cases} AO(i, j) = AO_i \\ AI(i, j) = AI_i \\ dA(i, j) = AO(i, j) - AI(i, j) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $i = j, j + 1, \dots, \text{ceil}(H_{LEO}/dh), j = \text{ceil}(H_{RO}/dh), H_{LEO}$ 为LEO卫星轨道高度, H_{RO} 为掩星切点高度。

则对于中性掩星大气探测有

$$\begin{cases} \min(\theta_{LOP}) = \int_{j_{NeAt}}^k dA_{(j_{NeAt}, j)} dj \\ \max(\theta_{LOP}) = \int_0^k dA_{(j_{NeAt}, j)} dj \end{cases}, \quad (9)$$

$$k = \min(1 + j_{Iono}, j_{LEO})$$

式中, $j_{NeAt} = \text{ceil}(H_{NeAt}/dh), j_{Iono} = \text{ceil}(H_{Iono}/dh), j_{LEO} = \text{ceil}(H_{LEO}/dh), H_{NeAt}, H_{Iono}$ 和 H_{LEO} 分别为中性大气层顶高、电离层顶高和LEO卫星轨道高度。基于上述假设,瞬时掩星事件形成预估算法可通过式(9)从无线电三维路径追踪模拟及其距地表高度求解问题转化为求解

GNSS卫星与LEO探测卫星接收天线间方位角及其与预置角度阈值对比的问题,显著地降低了计算复杂度,提高了掩星事件判定运算效率。

参考COSMIC成功经验,设定GNSS掩星大气探测卫星运行在圆形轨道上,大气探测高度范围为0~800km,则探测卫星星座内卫星轨道高度应不低于800km。将式(9)代入式(3),计算可得轨道高度在800~1200km内变化的LEO星载对地观测仪半锥角在 62.7° 左右,内外锥角差不足 0.1° ,再一次体现了GNSS掩星大气探测卫星星座与常规对地观测星座应用的不同。考虑地球扁率,内外锥角差扩大至 0.4° 。任取某颗运行在800km高圆形轨道卫星绕地一周星下点轨迹如图3所示。深红圆周标示出了LEO卫星瞬时观测掩星事件可能出现的位置,掩星测点距星下点地心角距 26° 左右,即掩星探测覆盖带宽度约为 52° 。显然,每轨道周期内掩星测点随LEO星下点轨迹近似呈现带状覆盖特性。

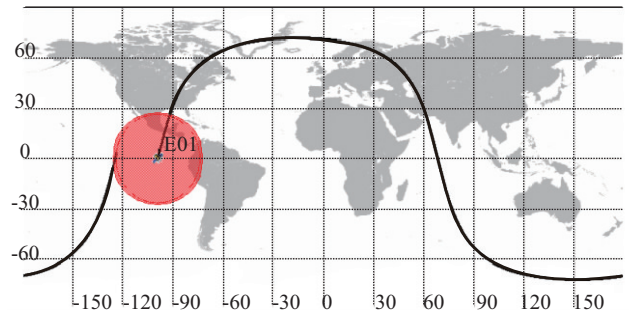


图3 瞬时GNSS RO掩星测点分布域

Fig.3 Instantaneous range of GNSS RO soundings

3 GNSS掩星大气探测星座设计准则

3.1 星座类型设计准则

为了保证掩星测点事件的空间分布均匀性和有效观测率,要求星座内的卫星星下点轨迹的空间分布是均匀的。要维持星座内卫星星下点轨迹分布均匀性,主要是要保证卫星空间运动的均匀性和星座构型的稳定性。

已知圆轨道卫星理想情况下在空间做匀速圆周运动,卫星的星下点为全球均匀分布的,所以探测星座内卫星轨道类型选择为圆轨道,即轨道的偏心率 $e=0$ 。而卫星在平面内的运动速度由轨道

半长轴决定, 若在保证共面或异面卫星之间的相位关系稳定, 则要求所有卫星的半长轴相同。卫星轨道平面的方向由轨道倾角和升交点赤经描述, 若要满足轨道平面关系稳定, 则要求轨道倾角和升交点赤经相对关系稳定。主要摄动力对升交点赤经的长期影响比倾角大得多, 若在保证升交点赤经的变化率相同, 则要求所有轨道倾角相等。升交点赤经变化速率公式为

$$\dot{\Omega} = -\frac{3}{2}J_2\sqrt{\frac{\mu}{a}}\left(\frac{R_e}{a}\right)^2\frac{\cos I}{(1-e^2)^2} \quad (10)$$

式中, R_e 为地球半径; a 为轨道半长轴; J_2 为地球非球形引力摄动常数; μ 为地球引力常数; I 为轨道倾角; e 为轨道偏心率。

上述分析可以得出各 GNSS 掩星大气探测星座内卫星轨道偏心率 $e=0$, 且各位星轨道半长轴、轨道倾角应尽量保持一致。满足这些条件的典型星座类型为 Walker 星座, 星座构型码为 $N/P/F; I, H$ 。

3.2 星座参数设计准则

理论上, 星座内卫星轨道高度越低, 轨道周期越短, 观测掩星几率越多, 因此轨道高度应以满足探测大气高度范围需求为基准选取最小值。

由于 GNSS 卫星都运行在顺行轨道上, 就每次掩星事件持续时间而言, 顺行轨道上的 LEO 卫星与 GNSS 卫星发生掩星事件时, 若两个卫星同向运动, 相对运动速度慢, 在一次掩星事件中可获取更多大气数据, 反演后得到的大气参数垂直分辨率较高; 相反, 逆行轨道上的 LEO 卫星与 GNSS 反向运动, 相对运动速度快, 反演后得到的大气参数垂直分辨率较低。因此探测星座内轨道应选为顺行轨道。

LEO 卫星星下点轨迹随轨道倾角的增大向南北极扩展, 掩星事件纬度覆盖性随之存在差异。轨道倾角越高, 纬度覆盖范围相对越大。假设星载 GNSS 掩星接收天线为全视场, 由图 3 可知, 地理坐标系下 LEO 卫星掩星覆盖纬度极值 λ_{\max} 与轨道倾角 I 对应关系为

$$\lambda_{\max} = I + \min(\theta_{\text{LOP}}) \quad (11)$$

设星载掩星接收天线水平视场为 δ_{AntH} , 安装偏置角为 δ_{AntF} , 则掩星探测覆盖纬度极值为 λ_{\max} 时, 星座内卫星倾角算式为

$$I = \lambda_{\max} - \min(\theta_{\text{LOP}}) \sin \left[\arctan \left(\frac{\tan \delta_{\text{AntH}}}{\sin(\delta_{\text{AntF}})} \right) \right] \quad (12)$$

此时掩星探测覆盖带宽度 β 算式为

$$\beta = 2 \min(\theta_{\text{LOP}}) \cos \left[\arctan \left(\frac{\tan \delta_{\text{AntH}}}{\sin \delta_{\text{AntF}}} \right) \right] \quad (13)$$

星座内卫星轨道倾角越高, 卫星运行空间越大, 形成掩星事件几率越多, 因此轨道高度应以满足探测大气覆盖范围需求为基准取最大值。

COSMIC 应用经验及学者对 GNSS 模拟仿真统计结果表明, 虽然掩星观测量因轨道高度、轨道倾角的不同存在一定波动, 但影响掩星观测数量的主因仍为探测星座内卫星数量。为实现全球均匀掩星探测, 当星座内等轨道高度、等倾角卫星组建 Walker 星座内每轨道面上仅有一颗卫星时, 星座内卫星数应满足为

$$N_{\text{LEO}} \geq \text{ceil}(\pi/\beta) \quad (14)$$

Walker 星座内相邻轨道上卫星轨迹位置关系如图 4 所示。

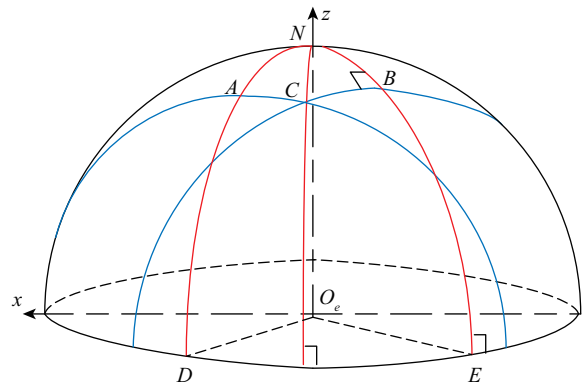


图 4 相邻轨道卫星轨迹交点示意图

Fig. 4 Diagram of ground tracks of satellites on adjacent orbits

图 4 中蓝色线为两条相邻卫星星下点轨迹, 相应星下点轨迹顶点分别为 A 、 B , 轨迹相交于点 C , N 为地球均匀球对称加设下地理极点。设 Walker 星座内相邻轨道面与赤道交点间距为 α , 显然有

$$\angle CNB = \frac{\alpha}{2} \quad (15)$$

在球面直角三角形 $\triangle NCB$ 中, 利用球面三角公式可计算 C 点纬度值为

$$\lambda_c = \arctan [\cos(\alpha/2) \tan I] \quad (16)$$

因此, 当探测卫星星座不满足极地覆盖要求, 仅实现区域性纬度带覆盖时, 单轨道周期内可实现无缝掩星探测覆盖的覆盖纬度极值为

$$\lambda_{c_{\max}} = \arctan [\cos(\alpha/2) \tan(I + \beta/2)] \quad (17)$$

4 GNSS 掩星大气探测星座设计

中国的第三代风云系列气象卫星 (FY3) 运行在轨道高度为 836km, 轨道倾角为 98.75° 的太阳同步轨道上。2013 年 9 月发射的 FY3-C 卫星是首颗携带 GNSS 掩星载荷的风云系列卫星, 可完成 GPS+BD 掩星大气探测任务^[10]。本文基于 FY3-C 卫星在轨资源, 提出利用基于太阳同步轨道的子星座 A 和轨道倾角相对较低的玫瑰型星座 B 组建混合星座, 实现全球 GNSS 掩星大气探测。其中子星座 B 主要实现南北纬 65° 以内有人区掩星大气探测覆盖, 子星座 A 补充完成极地区域掩星大气探测覆盖。参考 COSMIC 系列设计指标, 提出 GPS+BD 掩星大气探测混合星座概念设计指标:

- 1) 全球大气探测, 经度 0~360°, 纬度 -90°~90°。
- 2) 大气探测高度为 0~70km (中性大气), 90~720km (电离层)。
- 3) 全球掩星事件均匀分布。

子星座 A 由降交点地方时分别为早上 6:00 和 7:00 的两颗太阳同步轨道卫星组成。基于 GNSS 掩星大气探测星座设计准则可知, 玫瑰型子星座 B 内卫星轨道高度为 720km。参考 COSMIC 卫星掩星接收天线视场参数, 由式 (17) 计算得出子星座 B 内卫星轨道倾角在 46.4° 左右选取。此时单星掩星探测覆盖宽度接近 36°, 由式 (14) 计算得出子星座 B 内卫星数量应不少于 5 颗。综上, 建立混合星座模型中子星座 A、B 参数设计约束函数

$$g(\mathbf{X}): \begin{cases} H_B = 720\text{km} \\ I_B = 46.4^\circ + \sigma_1, \sigma_1 \in [-5^\circ, 5^\circ] \subset \mathbf{R} \\ N_B = P_B = 5 + \sigma_2, \sigma_2 \in [0, 1] \subset \mathbf{Z} \\ 0 \leq F_B \leq P_B - 1 \\ 0 \leq \Omega_B \leq 360^\circ \\ 0 \leq u_B \leq 360^\circ \end{cases} \quad (18)$$

式中, N_B 、 P_B 、 F_B 、 I_B 、 H_B 均为 Walker 星座

构型码, Ω_B 为历元时刻子星座基准星升交点赤经, u_B 为历元时刻子星座基准星纬度幅角。

GNSS 掩星大气探测星座设计准则将探测星座设计简化为 6 个星座设计参数在小范围值域内的寻优问题。

$$\mathbf{X} = [N_B \ F_B \ \sigma_1 \ \sigma_2 \ \Omega_B \ u_B] \quad (19)$$

将地球表面依 500km 间距栅格化, 以 24h 内 GPS+BD RO 掩星测点栅格内统计方差最小为优化目标函数, 以式 (18) 为约束函数, 采用遗传算法对混合 GNSS 掩星大气探测子星座 B 参数 \mathbf{X} 寻优。得到子星座 B 构型码为 6/6/4: 52°, 720km, 历元时刻基准星 $\Omega_B = 23^\circ$, $u_B = 13^\circ$ 。

对得到的混合探测星座进行前向 GPS+BD 掩星大气探测模拟仿真, 得到该混合星座每日获取掩星探测次数高于 6100 次, 某日掩星测点分布如图 5 所示, 较为均匀地实现了全球 GNSS 掩星大气探测。

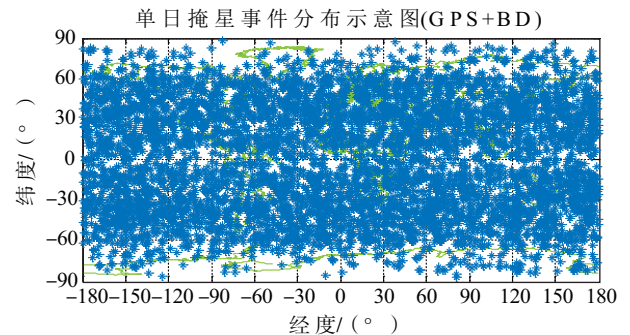


图 5 混合星座单日掩星测点分布图

Fig. 5 Distribution of soundings by the multi-constellation in 24h

与 COSMIC 相比^[12], 本文提出的混合星座包含 8 颗 LEO 卫星, 比由 6 颗 LEO 卫星组成的 COSMIC 星座仅在星座规模上扩充了 1/3, 通过搭载 FY3 星载掩星接收机及优化探测卫星运行轨道参数, 可实现掩星观测次数由每天近 1800 次升至 6000 余次, 探测数据量提高至 COSMIC 的 3 倍以上, 可进一步缓解当前气象研究及应用机构对高垂直分辨率大气数据的渴求。同时, 仿真结果表明该优化设计星座在 12h 时间间隔内获取全球掩星事件随栅格覆盖方差相比 COSMIC 降低 12%, 表明该星座在短时间间隔内可以更为均匀地获取全球

掩星探测数据,更利于满足于中尺度数值气象预报等数据更新周期低于12h的GNSS掩星数据应用需求。

特别地,鉴于掩星探测载荷体积小、质量轻的特点,探测卫星适于采用微小卫星平台搭建,此类星座中轨道倾角相同的卫星所组建的子星座可采用一箭多星或一箭一星等多种发射方式灵活部署。当子星座B采用一箭六星发射时,由于微小卫星推进能力有限,星座部署时间相对最长。GNSS掩星无线电探测具有在轨即可执行探测的特点,但在部署期间内探测数据量不稳定,且探测数据时空分布均匀度相对较差。

5 结论

GNSS掩星大气探测星座是实现GNSS掩星大气探测技术的最佳手段,可突破性地实现全球、全天时、全天候、高垂直分辨率的地球大气间接探测,其长期稳定的探测性能和极具吸引力的探测成本优势吸引了气象与航天领域的研究热情,为LEO卫星星座应用开拓了崭新的领域。针对此类卫星系统依赖于大量模拟仿真进行比对选取的卫星轨道及卫星星座设计研究现状,本文利用理想大气模型,将GNSS掩星大气探测中复杂的“星—地—星”临边观测问题转化为基于“星—地”几何关系的掩星观测模型,提出了一种适用于GNSS掩星大气探测星座设计研究的虚拟“星—地”掩星遥感假设,并基于该假设首次完成了探测星座参数对探测性能影响相关特性的分析和推导,为GNSS掩星大气探测星座设计准则的制定提供了理论依据。在所给出的GNSS掩星大气探测星座设计准则基础上,充分利用我国现有GNSS掩星大气探测资源,快速实现了GPS+BD掩星大气探测混合星座概念设计,与COSMIC相比,所得混合星座方案以星座规模扩充1/3为代价,掩星数量提

升了2倍以上,且更适于中尺度数值气象预告等短周期掩星数据更新需求,设计结果可用于未来我国GNSS掩星大气探测卫星星座研制参考。

参考文献

- [1] Hajj G A, Kursinski E R, Romans L J, et al. A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, 64 (4): 451-469.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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*,2002,3(2):85-89.
- [5] 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.
- [6] Cook K, Fong C J, Wenkel M J, et al. COSMIC-2/FORMOSAT-7: The enduring program[C]//2014 IEEE Aerospace Conference, March 1-8, Montana Venue, 2014.
- [7] Fong C J, Huang C Y, Chu V, et al. Mission results from FORMOSAT-3/COSMIC constellation system [C]//AIAA SPACE 2007 Conference & Exposition, Long Beach, 2007.
- [8] 童譔,箫耐园.大气折射与路径弯曲延迟[J].*天文学报*,2008,49(4):419-424.
- [9] Wang J Y, Liang B. Study on Compass occultation satellite constellation design[C]//33rd Chinese Control Conference (CCC), July 28-30, Nanjing, 2014.
- [10] Bi Y M, Yang Z D, Zhang P, et al. An introduction to China FY3 radio occultation mission and its measurement simulation [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49 (7): 1191-1197.
- [11] Fong C J, Shiao W T, Lin C T, et al. Constellation deployment for the FORMOSAT-3/COSMIC mission [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46 (11): 3367-3379.