

DOI:10.3969/j.issn.1671-0673. 2026. 03. 004

# 面向北极航道服务的北斗三号 IGSO 卫星轨道优化

潘 林<sup>1,2</sup>, 杜 兰<sup>1</sup>, 周佩元<sup>1</sup>, 陈 晨<sup>1</sup>

(1.信息工程大学,河南 郑州 450001; 2.智能空间信息国家级重点实验室,北京 100094)

**摘要:**为解决北斗三号(BDS-3)在北极航道服务性能受限问题,在保持现有星座总体架构基本不变的前提下,考虑倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星搭载区域短报文通信(RSMC)与星基精密单点定位载荷,并开展IGSO卫星轨道优化,以弥补地球静止轨道(GEO)卫星在高纬度地区的性能短板。针对轨道参数优选过程中不同性能指标最优值相互冲突的问题,建立了基于多准则决策(MCDM)的优化模型,通过max-min归一化与等权加权综合评价法对多维指标进行了统一量纲化与排序,实现倾角和偏心率的优选。结果表明,当IGSO卫星轨道倾角为 $75^\circ$ 、偏心率0.1、近地点角距为 $260^\circ$ 和回归经度为 $113^\circ\text{E}$ 时,20°截止高度角下,最大位置精度因子由 $3.9\times 10^4$ 降低至110.44,同时GEO+IGSO的可用性提升至99.92%,显著增强了北斗三号在北极航道区域的综合服务能力。

**关键词:**北斗三号;北极航道;倾斜地球同步轨道;轨道优化;多准则决策

中图分类号:P228.4

文献标识码:A

文章编号:1671-0673(2026)03-0275-07

## Orbital Optimization of BDS-3 IGSO Satellites for Arctic Shipping Route Services

PAN Lin<sup>1,2</sup>, DU Lan<sup>1</sup>, ZHOU Peiyuan<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>

(1.Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2.National Key Laboratory of Intelligent Spatial Information, Beijing 100094, China)

**Abstract:** To address the limited service performance of the BeiDou-3 Global Navigation Satellite System (BDS-3) in the Arctic shipping route, while maintaining the overall architecture of the existing constellation essentially unchanged, it is considered to equip the inclined geosynchronous orbit (IGSO) satellites with regional short-message communication (RSMC) and satellite-based precise point positioning (PPP) payloads. The optimization of the IGSO satellite orbits is carried out to compensate for the performance shortcomings of geostationary orbit (GEO) satellites in high-latitude regions. To tackle the conflict among optimal values of different performance metrics during parameter selection, an orbit-optimization model based on multi-criteria decision making (MCDM) is developed. Max-min normalization and an equal-weight simple additive weighting (SAW) method are adopted to unify the dimensions of multi-dimensional indicators and rank candidate schemes, thereby determining key parameters such as inclination and eccentricity. Results show that when the IGSO inclination is  $75^\circ$ , the eccentricity is 0.1, the argument of periapsis is  $260^\circ$ , and the recurrent longitude is  $113^\circ\text{E}$ , the maximum position dilution of precision (PDOP) decreases markedly from  $3.9\times 10^4$  to 110.44 at a  $20^\circ$  elevation cutoff angle, while the availability of the combined GEO+IGSO configuration increases to 99.92%, significantly enhancing the comprehensive service capability of BDS-3 in the Arctic shipping route.

**Key words:** BDS-3; Arctic shipping route; inclined geosynchronous orbit (IGSO); orbital optimization; multi-criteria decision making (MCDM)

收稿日期:2026-02-24;修回日期:2026-03-12

基金项目:国家自然科学基金(42204041);智能空间信息国家级重点实验室基金(SYS-ZX02-2024-01);河南省科技攻关项目(252102110378)

作者简介:潘 林(1990—),男,博士生,主要研究方向为导航星座设计。E-mail:panlinlgd@163.com

北极航道被誉为“21 世纪的黄金水道”,主要包括东北航道、西北航道和中央航道。随着极地科考、资源开发及“冰上丝绸之路”建设的深入推进,北极地区已成为全球地缘政治与经济竞争的重要战略区域。2025 年 9 月,全球首条中欧北极集装箱快航航线的成功运营,标志着北极航道进入了实质性商业化阶段。然而,北极航道环境极端复杂,常年受浮冰、严寒等恶劣天气影响,且高纬度地区缺乏完善的基础设施。在智能航运、极地救援、资源勘探等领域,高可靠的定位、导航与授时(Positioning Navigation and Timing, PNT)以及通信服务是确保航行安全的核心前提<sup>[1-2]</sup>。

北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou-3 Global Navigation Satellite System, BDS-3)于 2020 年全面建成并具备全球服务能力,系统的信号质量等已达到国际先进水平,但在极区仍存在明显的服务能力不足问题<sup>[3-6]</sup>。首先,BDS-3 的中地球轨道(Middle Earth Orbit, MEO)卫星轨道倾角为  $55^\circ$ ,这导致极区用户观测到的可见卫星大多处于低仰角状态<sup>[4]</sup>。在冰山区或近岸狭窄航道环境中,低仰角卫星信号易被遮挡,导致位置精度因子(Position Dilution of Precision, PDOP)恶化。此外,虽然 BDS-3 中 14 颗 MEO 卫星搭载了全球短报文通信载荷<sup>[7]</sup>,但单次通信容量仅约 40 个汉字,难以满足海上安全信息的传输需求<sup>[8]</sup>。其次,北斗系统的特色服务——星基精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)和区域短报文通信(Regional Short Message Communication, RSMC)依赖于地球静止轨道(Geostationary Orbit, GEO)卫星播发。在高纬度地区,GEO 卫星相对于用户的仰角较低且始终位于南侧,易受到环境遮挡影响,形成“南墙效应”<sup>[5,9-10]</sup>。

针对极区卫星导航性能提升问题,国内外学者提出了多种改进方案。文献[11-12]通过增加倾斜地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)卫星数量,提出将覆盖范围扩展至北纬  $75^\circ$  的北斗二号“北扩”构型。杨元喜等<sup>[5]</sup>研究表明,提高 IGSO 卫星的轨道倾角是改善极区 PNT 服务的有效途径。此外,近年来低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星增强导航技术也成为研究热点,其在改善高纬度区域覆盖能力及定位精度方面展现出良好潜力<sup>[13-15]</sup>。

上述不同增强方案在工程代价与体制演进上存在显著差异:LEO 增强通常需要新增星座规模,

工程投入与建设周期较长;通过大幅调整现有 MEO 构型或增星,同样面临发射组网成本与运行维护约束。相比之下,利用 IGSO“8”字地面轨迹带来的高纬覆盖与几何补偿优势,可在较低增量代价下对高纬低仰角与几何退化问题形成针对性改善,并可通过“GEO/IGSO 可见性”提升 RSMC 播发链路连续性。

基于以上考虑,面向北极航道服务需求,在不增加卫星数量、保持 BDS-3 现有 MEO 与 GEO 构型不变的前提下,提出新发射 3 颗搭载 RSMC 与 PPP 载荷的 IGSO 卫星,替换现役 IGSO 卫星。以这 3 颗 IGSO 卫星为研究对象,开展 IGSO 轨道参数优化设计。针对轨道参数优选过程中不同性能指标最优值相互冲突的问题,构建基于多准则决策(Multiple Criteria Decision Making, MCDM)的评估模型,采用 max-min 归一化完成同向化与无量纲处理,并采用简单加权求和(Simple Additive Weighting, SAW)形成综合评分,对候选方案统一排序并获得折中最优解。最后,给出满足工程可实现性的新增 IGSO 最优轨道配置方案。

## 1 北斗三号星座参数与优化方法

### 1.1 北斗三号星座参数

BDS-3 采用混合星座架构<sup>[16]</sup>。各轨道卫星的分工如下<sup>[17]</sup>。1)MEO 卫星:提供基本的全球几何覆盖,维持基本的定位能力。

2)GEO 卫星:用于播发 PPP-B2b 改正数和 RSMC<sup>[9, 18]</sup>。

3)IGSO 卫星:具有动态的“8”字地面轨迹,弥补 GEO 缺陷并增强 MEO 的几何结构。

根据《北斗卫星导航系统公开服务性能规范》<sup>[19]</sup>,星座的星下点轨迹如图 1 所示。实验仿真使用的具体标称参数见表 1。

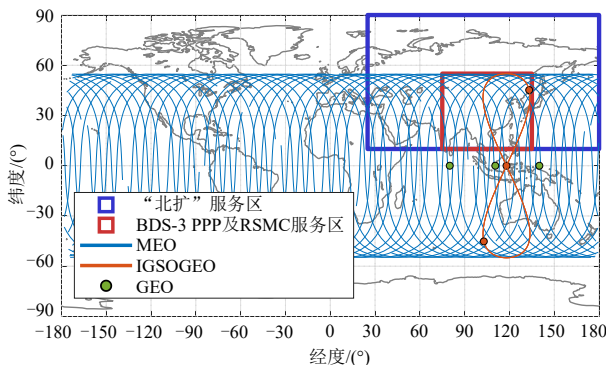


图 1 北斗三号星座星下点轨迹及服务区

表 1 实验仿真北斗三号星座名义参数

| 轨道类型 | 长半轴/km | 偏心率 | 轨道倾角/(°) | 升交点赤经/(°)    | 近地点角距/(°) | 平近点角/(°)            | 卫星数 | 轨道面 |
|------|--------|-----|----------|--------------|-----------|---------------------|-----|-----|
| GEO  | 42 164 | 0   | 0        | 80,110.5,140 | 0         | 0                   | 3   | 1   |
| IGSO | 42 164 | 0   | 55       | 202,82,322   | 0         | 0,120,240           | 3   | 3   |
| MEO  | 27 906 | 0   | 55       | 0,120,240    | 0         | 按照 Walker 24/3/1 分布 | 24  | 3   |

1.2 优化参数

对于单颗卫星,优化参数可由 6 个轨道根数描述;但对于 IGSO 卫星,可选的设计变量包括偏心率  $e$ 、倾角  $i$ 、近地点角距  $\omega$ 、升交点赤经  $\Omega$  以及平近点角  $M$ 。工程上,为便于星座维护,通常令 3 颗卫星具有相同的  $e$ 、 $i$  和  $\omega$ 。IGSO 卫星星下点轨迹为“8”字形封闭曲线。轨迹在地固系中的回归经度为

$$\lambda = \Omega + \omega + M - \theta_G \tag{1}$$

式中: $\lambda$  表示回归经度; $\theta_G$  表示格林尼治恒星时角。由此可见, $\omega$ 、 $\Omega$  与  $M$  共同决定  $\lambda$ 。单颗 IGSO 覆盖范围有限,难以保证区域连续覆盖,工程上常采用多颗卫星在同一地面轨迹上“相位错开”的构型以提升连续性,如北斗三号当前的 3 颗 IGSO 卫星也采用了重合的星下点轨迹。若要求 3 颗卫星星下点轨迹重合,则需满足

$$\Omega_q + \omega_q + M_q = \lambda + \theta_G \tag{2}$$

式中, $q \in \{1, 2, 3\}$ ,若希望 3 颗卫星在同一轨迹上近似等间隔分布,则相位间隔可取  $\Delta M = 120^\circ$ 。

本文将  $\lambda$  作为描述地面轨迹经度定位的参数进行优化,而将星间相位分布按等间隔原则设置并保持不变。因此,对于由 3 颗 IGSO 卫星构成的子星座,优化参数转化为  $i$ 、 $e$ 、 $\omega$  和  $\lambda$ 。

1.3 服务区定义

目前,BDS-3 通过 GEO 卫星可以向中国及周边地区( $75^\circ\text{E} \sim 135^\circ\text{E}$ 、 $10^\circ\text{N} \sim 55^\circ\text{N}$  的区域,图 1 中红色框)提供 RSMC 和 PPP 服务<sup>[19]</sup>。北极航道的东北航道和中央航道沿线(约  $25^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}$ 、 $70^\circ\text{N} \sim 90^\circ\text{N}$ )是“冰上丝绸之路”的核心区域。

若仿真仅以北极航道性能最大化为单一目标,可能导致 IGSO 卫星的地面轨迹重心过于偏北,进而引发在原核心服务区的几何构型退化与可用性下降。因此本文在原有服务区的基础上,将服务区范围扩展至  $25^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}$ 、 $10^\circ\text{N} \sim 90^\circ\text{N}$ ,构建“北扩”服务区,以确保优化后的星座在弥补北极性能短板的同时,仍能维持其在原有服务区的服务效能。“北扩”后的服务区如图 1 中蓝色框所示。

1.4 评价指标

1.4.1 可见性判定

设卫星到用户的视线方向与接收机当地水平

面夹角为高度角  $E$ , $E_0$  为截止高度角。当  $E > E_0$  时判定卫星可见。本文采用  $E_0 = 5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$  这 4 种情况,分别模拟开阔海域、一般遮挡、近岸航道与强遮挡环境。

1.4.2 DOP 选择

精度衰减因子(Dilution of Precision, DOP)指标包括 GDOP、PDOP、HDOP 与 VDOP 等类型。其中:GDOP 包含时间参数项,反映位置与时间联合解算的几何强度;HDOP 与 VDOP 分别刻画水平与垂直方向几何质量,属于 PDOP 的分量指标。本文面向北极航道三维定位能力问题,关注卫星空间几何构型对三维位置解算的影响,因此选取 PDOP 作为核心几何评价指标。

1.4.3 评价指标定义

为全面评估优化效果,本文选取如下指标。

- 1) 平均 PDOP,表示服务区内统计周期的 PDOP 均值。
- 2) 最大 PDOP,表示服务区内统计周期 PDOP 最大值,用于反映最坏几何退化。
- 3) PDOP 阈值可用性<sup>[17, 19]</sup>,表示服务区内统计周期在  $\text{PDOP} \leq 2$ 、 $\text{PDOP} \leq 4$ 、 $\text{PDOP} \leq 6$  条件下的占比。
- 4) GEO+IGSO 可用性,统计周期至少存在 1 颗 GEO 或 IGSO 卫星可见的时间占比,用于衡量 PPP-B2b 与 RSMC 播发链路的连续性。

1.5 多准则决策方法

MCDM 是一种在多个相互冲突的准则下进行综合权衡与优化的决策方法<sup>[20-21]</sup>。在星座轨道参数优化过程中需要同时兼顾多类性能指标,例如 PDOP、服务连续性(可用性)等,由于各指标在物理含义、量纲与取值范围上存在差异,且单一指标最优通常会与其他指标产生权衡关系,直接依据某一指标进行方案选择容易导致结论片面。

在众多 MCDM 方法中 SAW 因其结构清晰、计算透明、易于解释与复现,被广泛用于工程方案的多指标综合评价。本文采用 max-min 归一化+等权加权求和的方式构建综合评分,用于比较不同候选轨道参数值的整体性能。

- 1) 指标体系与类型划分。设某一轨道参数有  $m$  个候选方案  $\mathcal{A} = \{a_1, \cdots, a_m\}$ ,并设置截止高度角

$\{E_1, \dots, E_j\}$ 共 $j$ 种观测环境。候选值 $a_m$ 在截止高度角 $E_j$ 环境下,可计算对应的 $K$ 个评价指标值,构成向量 $X_j^m = [x_{j1}^m, \dots, x_{jk}^m]$ 。本文中评价指标包括平均PDOP、最大PDOP、GEO+IGSO可用性以及PDOP $\leq 2, 4, 6$ 可用性等共6个指标。

根据“优劣方向”将指标分为两类:代价型指标(越小越优),如平均PDOP、最大PDOP;效益型指标(越大越优),如GEO+IGSO可用性、PDOP $\leq 2, 4, 6$ 可用性。

为避免最大PDOP在部分情况下出现数量级差异而主导综合评分,对最大PDOP采用对数变换 $x' = \lg(x)$ 后再参与归一化与评分计算。

2)指标归一化处理。为消除不同指标量纲与取值范围差异,在同一截止高度角内对各指标采用max-min归一化,将其映射到 $[0, 1]$ 区间,并统一为“值越大表示性能越优”的得分形式。对第 $k$ 个指标,记该截止高度角下所有候选值 $\{a_1, \dots, a_M\}$ 计算得到的该指标值的最小值与最大值为:

$$\begin{aligned} x_k^{\min} &= \min_m (x_{jk}^m) \\ x_k^{\max} &= \max_m (x_{jk}^m) \end{aligned} \quad (3)$$

则归一化得分 $s_{jk}^m \in [0, 1]$ 分别定义为对效益型指标、对代价型指标:

$$s_{jk}^m = \frac{x_{jk}^m - x_k^{\min}}{x_k^{\max} - x_k^{\min}} \quad (4)$$

$$s_{jk}^m = \frac{x_k^{\max} - x_{jk}^m}{x_k^{\max} - x_k^{\min}} \quad (5)$$

当 $x_k^{\max} = x_k^{\min}$ (即该指标在该截止高度角下无差异)时,为避免分母为零并避免对综合评分产生不必要惩罚,令该指标对所有方案的得分 $s_{jk}^m = 1$ 。

3)简单加权求和综合评分。在得到各指标归一化得分后,采用SAW将多指标聚合为综合评分:

$$S_j^m = \sum_{k=1}^K w_k s_{jk}^m \quad (6)$$

式中, $w_k$ 为第 $k$ 个指标的权重 $\sum_{k=1}^K w_k = 1, w_k \geq 0$ 。考虑到PDOP与服务连续性指标在北极导航任务中具有同等的意义,且为降低权重分配的主观随机性,本文选取等权作为基准设置,即 $w_k = 1/K$ 。

4)最终决策评分。将所有截止高度角 $\{E_1, \dots, E_j\}$ 下的综合评分取平均,得到最终决策评分:

$$S_{\text{final}}^m = \frac{1}{J} \sum_j S_j^m \quad (7)$$

式中, $S_{\text{final}}^m$ 表示候选值 $a_m$ 的最终决策评分,其值越

大表示方案在其下的综合性能越优,可用于对参数候选集合进行排序并确定最优取值。

## 1.6 优化策略

星座优化算法总体可分为分析枚举法和目标优化算法(如遗传算法)。本文未采用目标优化算法,原因在于在多指标情形下,此类方法通常需要将各指标通过加权或惩罚项合成为单目标函数,其求得结果往往对权重与惩罚项设定较为敏感,且难以直观揭示各指标之间的折中关系以及参数变化的边际贡献,从而不利于形成可解释、可复核的工程设计依据。事实上,北斗三号星座的总体设计亦采用了分析枚举思路。基于上述考虑,从影响北极区域覆盖与几何构型的物理参数出发,本文采用敏感性分析识别关键参数及其优选取值区间,并结合MCDM模型开展综合决策与折中优选。

## 1.7 仿真设置

仿真采用以下统一设置。1)仿真时间:仿真覆盖连续7 d的星座运行,采样步长为300 s;2)轨道传播模型:卫星轨道积分考虑最大摄动项,即地球扁率 $J_2$ 摄动引起的轨道根数一阶长期项。3)服务区网格划分:在北扩服务区( $25^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}, 10^\circ\text{N} \sim 90^\circ\text{N}$ )按经纬度网格采样,分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ 。4)初始轨道参数:以北斗三号星座名义参数为初值,具体参数如表1,保持IGSO卫星数量不变,并假设IGSO卫星具备RSMC与PPP播发能力。

## 2 实验结果与分析

实验采用单因子敏感性分析配合MCDM评分的方法,对以上提出的4个轨道参数进行分析与综合优化,逐一确定各参数的最优取值,并最终对比优化前后的系统整体性能。

### 2.1 轨道倾角

倾角 $i$ 是IGSO卫星对极区覆盖影响最直接的参数。 $i$ 增大后,卫星轨迹可达更高纬度,北极区域可见卫星仰角提升,几何构型更加有利,尤其在高截止角(遮挡更强)时效果更明显。

在仿真中,离散选择的 $i$ 候选值为 $\{55^\circ, 56^\circ, 60^\circ, 63.43^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 85^\circ\}$ ,其中 $63.43^\circ$ 为冻结轨道倾角,结果如图2所示。

图中6个子图分别对应6个评价指标,五角星是在同一 $E_0$ 下该指标的最优值。结果表明,在低截止高度角( $5^\circ$ 与 $10^\circ$ )时,各指标几乎不随倾角变化,而高截止角( $20^\circ$ )下低 $i$ 构型的最大PDOP呈现

数量级跃迁;当 $i$ 提升至 $75^\circ \sim 85^\circ$ 时,最大PDOP显著降低, $i$ 增大也可改善其他指标的性能。但即使同一 $E_0$ 时,不同指标的最优值也产生相互冲突。为此采用指标max-min归一化等权综合评价方法进行 $i$ 优选。

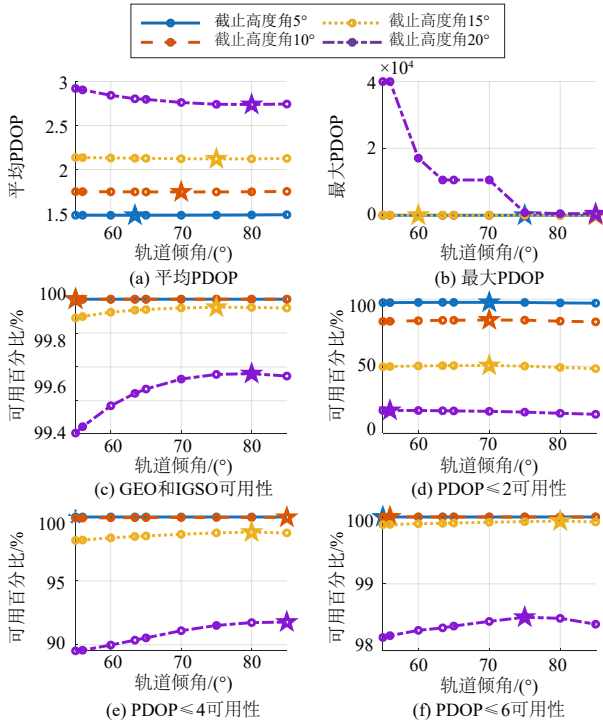


图2 不同轨道倾角下的PDOP与可用性指标对比

综合评分如表2所示。

表2 不同倾角方案的综合评分与最终决策评分

| 轨道倾角/ $^\circ$ | 不同截止高度角的综合评分 |            |            |            | 最终决策评分 |
|----------------|--------------|------------|------------|------------|--------|
|                | $5^\circ$    | $10^\circ$ | $15^\circ$ | $20^\circ$ |        |
| 55             | 0.74         | 0.42       | 0.10       | 0.17       | 0.36   |
| 56             | 0.77         | 0.60       | 0.16       | 0.22       | 0.44   |
| 60             | 0.85         | 0.76       | 0.55       | 0.44       | 0.65   |
| 63.43          | 0.89         | 0.85       | 0.68       | 0.56       | 0.74   |
| 65             | 0.90         | 0.90       | 0.73       | 0.60       | 0.78   |
| 70             | 0.94         | 0.97       | 0.87       | 0.72       | 0.88   |
| 75             | 0.94         | 0.96       | 0.89       | 0.88       | 0.92   |
| 80             | 0.79         | 0.83       | 0.82       | 0.86       | 0.83   |
| 85             | 0.65         | 0.67       | 0.68       | 0.76       | 0.69   |

结果表明, $i$ 对性能的影响与截止角高度强相关。在 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 等低截止角下,综合评分随 $i$ 变化的幅度较小;而在 $15^\circ$ 、尤其是 $20^\circ$ 截止角下,综合评分随 $i$ 增大呈总体上升趋势。冻结轨道可以避免近地点的进动,但其在高截止角时的综合评分和最终决策评分相比更高 $i$ 较低。最终决策评分 $S_{\text{final}}$ 在 $75^\circ$ 时达到最高值0.92,因此本文建议IGSO轨道

倾角调整为 $75^\circ$ 。

## 2.2 偏心率

在确定 $i$ 最优区间后,进一步分析偏心率 $e$ 对系统性能的影响。

椭圆轨道可使卫星在远地点附近运行速度降低,从而在远地点区域形成更长时间逗留,若远地点布设在北半球高纬区域,则可显著提升北极区域的覆盖能力与仰角水平。在 $i=75^\circ$ 条件下,本文设置3颗IGSO卫星共地面轨迹,近地点角距为 $270^\circ$ , $e$ 取 $0 \sim 0.2$ ,步长为0.025。结果见图3。

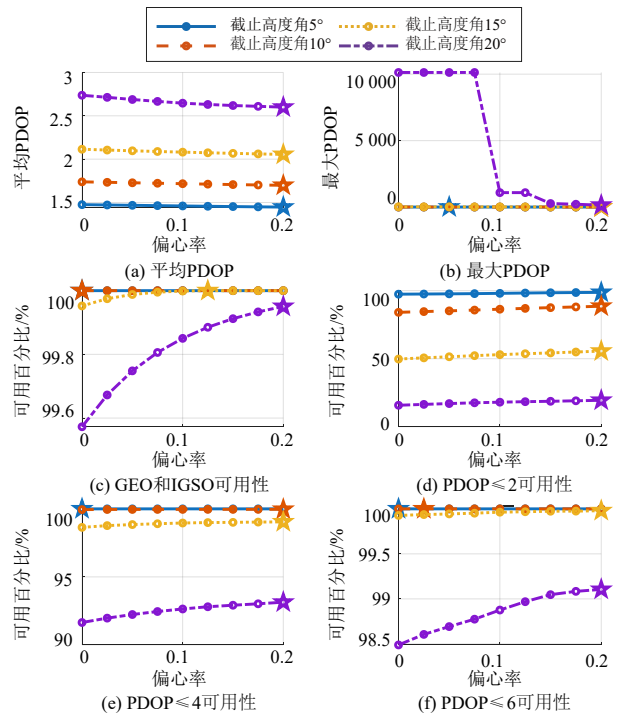


图3 不同偏心率的影響

可以看出,增大IGSO轨道偏心率能够系统性改善几何精度与可用性,且改善效应在高截止角 $20^\circ$ 时最为显著,尤其是最大PDOP在 $e=0.1$ 附近发生数量级下降,表明适当提高偏心率有助于抑制极端几何退化现象。另一方面,在低截止角情况下,多数指标接近饱和,使得偏心率的边际收益相对有限。

在工程实践中,过大的 $e$ 意味着卫星在近地点时的高度更低,会承受更剧烈的引力摄动及更复杂的太阳辐射压力,不利于卫星载荷和辐射防护的设计,同时也将导致近地点角距的进动更明显,不利于轨道控制。因此本文建议取 $e$ 为0.1。

## 2.3 近地点角距

近地点角距 $\omega$ 决定椭圆轨道在空间中的朝向,即远地点与近地点相对于地球赤道与纬度分布的位置。为了增强“北扩”服务区的覆盖,远地点(高

度最高、速度最慢的区域)应尽可能位于北半球高纬区域,从而提升卫星在北极上空的逗留时间与仰角。在固定 $i=75^\circ$ 、 $e=0.1$ 的基础上,进一步探讨近地点角距 $\omega$ 对“北扩”服务区导航性能的影响, $\omega$ 取值在 $230^\circ$ 到 $310^\circ$ 之间,步长 $10^\circ$ 。仿真结果如图4所示。

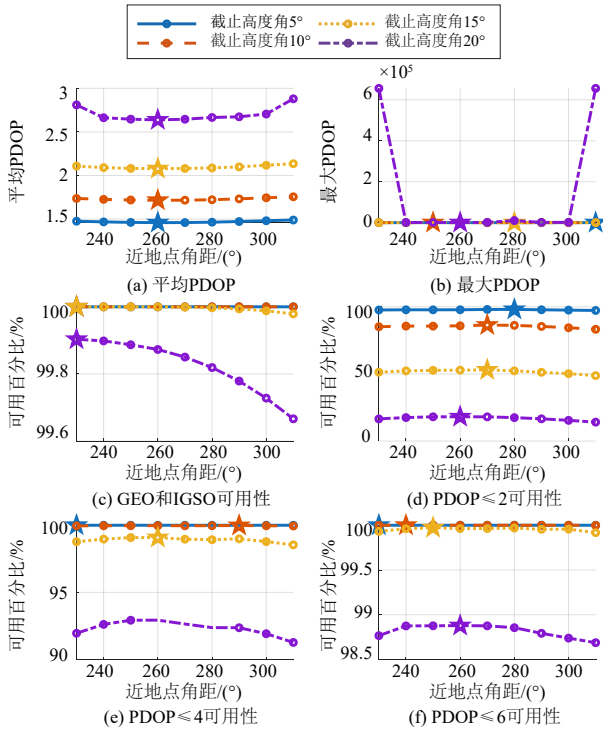


图4 不同近地点角距的影响

图4(a)结果表明,平均PDOP指标在 $260^\circ$ 附近达到最小值。但其他指标在不同 $E_0$ 时, $\omega$ 获得最优值的取值不同,因此采用指标max-min归一化等权综合评价方法进行排序。结果如表3所示。

表3 不同近地点角距方案的综合评分与最终决策得分

| 近地点角距<br>$\omega/^\circ$ | 不同截止高度角下的综合评分 |            |            |            | 最终决策得分 |
|--------------------------|---------------|------------|------------|------------|--------|
|                          | $5^\circ$     | $10^\circ$ | $15^\circ$ | $20^\circ$ |        |
| 230                      | 0.76          | 0.53       | 0.46       | 0.45       | 0.55   |
| 240                      | 0.79          | 0.82       | 0.79       | 0.88       | 0.82   |
| 250                      | 0.79          | 0.89       | 0.97       | 0.94       | 0.90   |
| 260                      | 0.87          | 0.91       | 0.93       | 0.98       | 0.92   |
| 270                      | 0.90          | 0.90       | 0.90       | 0.88       | 0.89   |
| 280                      | 0.83          | 0.89       | 0.86       | 0.73       | 0.83   |
| 290                      | 0.71          | 0.83       | 0.65       | 0.65       | 0.71   |
| 300                      | 0.65          | 0.64       | 0.50       | 0.45       | 0.56   |
| 310                      | 0.67          | 0.27       | 0.04       | 0.00       | 0.25   |

从不同 $E_0$ 看,在 $5^\circ$ 时,综合评分在 $270^\circ$ 时最高, $10^\circ$ 与 $20^\circ$ 时均在 $260^\circ$ 最高,而 $15^\circ$ 时在 $250^\circ$ 达到最高,反映高截止角条件下对 $\omega$ 更敏感且最优更

集中。最终决策得分随 $\omega$ 先升后降,存在明显最优区间,在 $260^\circ$ 达到峰值(约0.92), $250^\circ$ 次之(约0.90)。总体建议将 $\omega$ 选取在 $250^\circ \sim 270^\circ$ ,优先推荐 $260^\circ$ 作为最优解。

## 2.4 回归经度

不同回归经度 $\lambda$ 将导致IGSO在服务区内的逗留经度带不同,从而影响覆盖连续性、PDOP几何结构与GEO+IGSO可用性。

在 $i=75^\circ$ 、 $e=0.1$ 、 $\omega=260^\circ$ 条件下,本文进一步考察 $\lambda$ 的影响。回归经度取值范围为 $98^\circ\text{E} \sim 128^\circ\text{E}$ ,步长 $5^\circ$ ,仿真结果如图5所示。

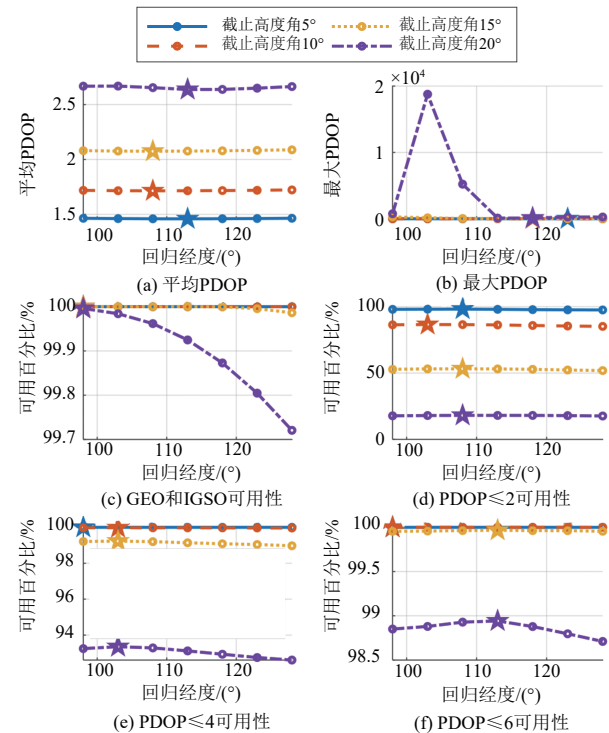


图5 不同回归经度的影响

从各指标趋势看。1)平均PDOP随回归经度呈中间优、两端劣的趋势,在约 $108^\circ \sim 113^\circ$ 附近达到较低水平。与之相对应,PDOP $\leq 4$ 、PDOP $\leq 6$ 在高截止角下也表现为在中间经度段占比更高、在经度端点下降更明显的规律。2)最大PDOP的敏感性最强,尤其在 $15^\circ$ 与 $20^\circ$ 截止角下,不同回归经度之间可出现显著差异。3)GEO+IGSO可用性在 $20^\circ$ 截止角下随回归经度的增大而减小。

采用指标max-min归一化等权综合评价方法得到不同 $\lambda$ 方案在4种截止角场景下的综合评分与最终决策评分,结果如表4所示。可以看出 $\lambda$ 在 $113^\circ\text{E}$ 附近在4种截止角下均保持较高评分,且表现最为均衡。因此考虑将 $\lambda$ 选取在 $108^\circ\text{E} \sim 118^\circ\text{E}$ 区间内,优先推荐 $113^\circ\text{E}$ 作为最优解。

表 4 不同回归经度方案的综合评分与最终决策评分

| 回归经度/(°) | 不同高度截止角下的综合评分 |      |      |      | 最终决策评分 |
|----------|---------------|------|------|------|--------|
|          | 5°            | 10°  | 15°  | 20°  |        |
| 98       | 0.63          | 0.88 | 0.54 | 0.57 | 0.65   |
| 103      | 0.79          | 0.65 | 0.72 | 0.58 | 0.68   |
| 108      | 0.90          | 0.78 | 0.88 | 0.74 | 0.82   |
| 113      | 0.90          | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89   |
| 118      | 0.84          | 0.79 | 0.74 | 0.77 | 0.79   |
| 123      | 0.77          | 0.62 | 0.52 | 0.49 | 0.60   |
| 128      | 0.63          | 0.47 | 0.15 | 0.16 | 0.35   |

2.5 结果对比

基于以上对轨道参数的分析与多准则决策评估,本文确定的 IGSO 星座最终优化配置方案为:倾角

表 5 优化前后“北扩”服务区几何精度与可用性指标对比

| 截止角/(°) | 平均 PDOP   | 最大 PDOP          | GEO+IGSO 可用性/% | PDOP≤2 可用性/% | PDOP≤4 可用性/% | PDOP≤6 可用性/% |
|---------|-----------|------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
|         | 优化前/优化后   | 优化前/优化后          | 优化前/优化后        | 优化前/优化后      | 优化前/优化后      | 优化前/优化后      |
| 5       | 1.48/1.46 | 3.53/3.52        | 95.82/100      | 97.39/98.04  | 100/100      | 100/100      |
| 10      | 1.75/1.71 | 7.3/5.5          | 92.32/100      | 83.39/86.28  | 99.92/99.97  | 100/100      |
| 15      | 2.14/2.08 | 36.41/26.3       | 87.64/100      | 49.56/53.13  | 98.16/99.14  | 99.88/99.97  |
| 20      | 2.92/2.64 | 39 967.66/110.44 | 81.90/99.92    | 16.89/18.10  | 89.53/93.12  | 98.20/98.94  |

首先,PDOP 显著增强。以 20° 为例,平均 PDOP 由 2.92 降至 2.64;PDOP≤4 可用性从 89.53% 升至 93.12%;最大 PDOP 由 3.996 8×10<sup>4</sup> 显著降至 110.44,表明极端 PDOP 的退化被有效抑制。其次,特色服务可用性提高。在 20° 截止高度角下,优化前 3 颗 GEO 卫星中的可用性为 81.90%,通过 IGSO 卫星搭载载荷,GEO+IGSO 可用性提升至 99.92%,提高约 18 个百分点。

3 结束语

面对北极航道区域对高可靠 PNT 与特色服务连续性的需求,本文以 IGSO 卫星搭载 RSMC 和 PPP 载荷为应用背景,在不改变北斗三号总体星座结构的前提下,优化 IGSO 卫星轨道。首先构建了“北扩”服务区(25°E~180°E、10°N~90°N),并建立了以 PDOP 与可用性为核心的多指标评价体系。然后研究了基于 MCDM 的优化模型,采用 max-min 归一化与 SAW 方法,解决了不同优化指标之间的冲突问题。最后系统分析了*i*、*e*、*ω* 和 *λ* 等轨道参数对“北扩”服务区定位与通信性能的影响。结果表明,优化后的 IGSO 星座在不新增卫星的情况下,显著改善了“北扩”服务区的 PDOP 分布和服务可用性指标。最大 PDOP 大幅降低,在截止高度角为

75°、偏心率 0.1、近地点角距 260°、回归经度 113°E。优化后的星座构型及“北扩”服务区如图 6 所示。优化前后的主要性能指标对比如表 5 所示。

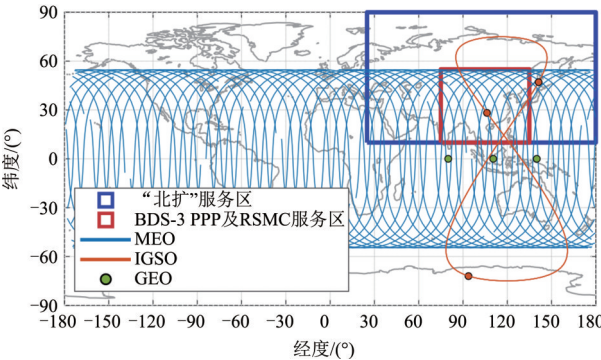


图 6 优化后的星座与服务区

20° 和 15° 时,GEO+IGSO 的可用性分别提升至 99.92% 和 100%。综上所述,本方案能够在工程可实现的范围内有效提升北斗系统在北极航道的导航几何性能与特色服务连续性,为北斗面向北极航道的能力增强提供可参考的技术路径。

参考文献:

[1] 程建华,刘佳鑫,赵琳.极区航海导航与定位保障技术发展综述[J].中国舰船研究,2021,16(5):16-29.

[2] 刘佳,韩冰,吴中岱,等.面向北极航道的通信导航保障系统设计[J].上海船舶运输科学研究所学报,2023,46(2):6-12;32.

[3] 杨元喜,姚铮,毛悦,等.星基弹性 PNT 体系设计及其关键技术[J].中国科学(地球科学),2025,55(3):686-698.

[4] 杨元喜,徐君毅.北斗在极区导航定位性能分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2016,41(1):15-20.

[5] YANG Y X, MAO Y, SUN B J. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system[J]. Satellite Navigation, 2020, 1(1):No.1.

[6] 杜彦君,贾小林,姚顽强,等.极地地区北斗三号单点定位精度分析[J].大地测量与地球动力学,2022,42(9):914-918.

[7] GU S F, GUO R X, GONG X P, et al. Real-time precise point positioning based on BDS-3 global short message communication[J]. GPS Solutions, 2022, 26(4):No.107.

(下转第 290 页)