

顾及星座稳定性及综合成本的低轨导航星座优化设计方法

贺 备, 蔡昌盛, 潘 林, 蔡成林

Optimization design method for low earth orbit navigation constellation considering constellation stability and comprehensive cost

HE Bei, CAI Changsheng, PAN Lin, and CAI Chenglin

引用本文:

贺备, 蔡昌盛, 潘林, 等. 顾及星座稳定性及综合成本的低轨导航星座优化设计方法[J]. 全球定位系统, 2022, 47(5): 9–15. DOI: [10.12265/j.gnss.2022092](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2022092)

HE Bei, CAI Changsheng, PAN Lin, et al. Optimization design method for low earth orbit navigation constellation considering constellation stability and comprehensive cost[J]. Gnss World of China, 2022, 47(5): 9–15. DOI: [10.12265/j.gnss.2022092](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2022092)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2022092>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

典型低轨卫星星座导航增强性能对比性评估研究

Comparative evaluation of navigation enhancement performance of typical LEO satellite systems

全球定位系统. 2021, 46(2): 49–55

导航星座异构扩展对系统服务性能的影响

The Effect of Constellation Expansion on System

全球定位系统. 2017, 42(2): 1–5

傅里叶级数拟合LEO轨道误差下的BDS/GPS/LEO 精密单点定位

BDS/GPS/LEO precise point positioning based on fourier series fitting LEO orbit error

全球定位系统. 2021, 46(6): 16–24

基于RT-PPP的低轨卫星实时高精度时间同步方法

Real time and high precision time synchronization method of LEO satellite based on RT-PPP

全球定位系统. 2021, 46(5): 26–32

卫星导航增强系统建设与发展

Construction and development of satellite navigation augmentation systems

全球定位系统. 2019, 44(2): 1–12

基于北斗的低成本无人机倾斜摄影系统的设计与实现

Design and Realization of Low Cost UAV Oblique Photography

全球定位系统. 2017, 42(3): 54–60



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2022092

顾及星座稳定性及综合成本的低轨导航 星座优化设计方法

贺备¹, 蔡昌盛¹, 潘林¹, 蔡成林²

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 湘潭大学 自动化与电子信息学院, 湖南 湘潭 411100)

摘 要: 利用低轨道地球卫星 (LEO) 进行导航增强首先需要设计低轨星座, 在进行星座构型设计时, 星座的稳定性及综合成本是需要考虑的两个重要因素, 本文提出了顾及星座稳定性及综合成本进行低轨导航星座优化设计的方法. 首先, 利用遗传算法对铱星星座进行了优化, 优化后的铱星星座与未优化前星座相比较, 全球可见卫星数均值由 2.3 颗增至 2.9 颗, 可见卫星数标准差由 2.3 降至 0.7, 综合成本因子由 5.3 降至 4.5, 证明了本方法的有效性. 然后以 Walker 星座作为基本构型, 在保证低轨混合星座稳定性的基础上, 顾及导航性能和综合成本, 利用遗传算法进行了混合星座的优化. 将优化后的低轨混合星座与北斗星座进行了组合, 组合后的星座与北斗星座相比较, 全球可见卫星数均值由 6.9 颗增至 9.3 颗, 可见卫星数标准差由 1.1 降至 0.4.

关键词: 低轨道地球卫星 (LEO); 导航增强; 星座设计; 遗传算法; 综合成本

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2022)05-0009-07

0 引 言

全球卫星导航系统 (GNSS) 已经在导航、定位和授时 (PNT) 领域发挥了巨大的作用, 但 GNSS 自身的可靠性和可用性较为脆弱^[1], 如在进行 GNSS 精密单点定位 (PPP) 时收敛时间过长, 而且由于 GNSS 轨道高度高, 地面接收站所接收到的信号较弱, 特别是在遮蔽环境下影响更为严重. 相比而言, 低轨道地球卫星 (LEO) 的轨道高度较低, 信号在传播过程中损失较少, 地面接收信号强. 此外, LEO 运行速度快, 卫星的快速运动有助于星座空间几何形态的快速变化, 可以促进 PPP 收敛速度的提升. 杨元喜院士^[2]提出综合 PNT 系统和弹性 PNT 概念, 并将低轨卫星增强技术作为 PNT 体系中的核心技术. 近年来, 低轨卫星技术发展迅速, 国内外机构相继提出低轨卫星发展计划.

低轨卫星对 GNSS 进行导航增强的前提是具有分布合理的星座构型. 基于此, 有不少学者开展了星座设计研究. GE 等^[3]从轨道倾角、卫星数、轨道平面

数等方面开展星座设计, 并将不同倾角的 LEO 星座组合在一起与 GNSS 联合进行 PPP 定位. HE 等^[4]为增加可见卫星数沿纬度分布的均匀性, 设计了不同轨道倾角组合的混合星座. 田野等^[5]推导了低轨卫星轨道高度与可视球冠以及太空垃圾的关系, 提出精度衰减因子 (DOP) 值较小的不同倾角轨道组合方案. 上述研究工作均采用分析枚举法设计低轨星座构型, 难以衡量星座设计构型是否达到最优. 徐哲宇等^[6]基于 Flower 星座构型并结合差分进化算法进行了轨道参数优化, 设计了一种区域导航增强的星座方案. GUAN 等^[7]基于遗传算法与非支配遗传算法针对多目标优化进行了混合 Walker 星座设计. MA 等^[8]设计了综合多种星座构型的混合星座, 在固定卫星颗数以及仰角的条件下采用遗传算法求取最优组合. 上述研究工作采用优化算法进行星座设计, 但他们在优化设计过程中未顾及卫星综合成本以及混合星座的稳定性. 谢恺等^[9]在星座设计中粗略分析了星座设计的发射成本因子, 然而没有考虑到卫星制造成本, 无法全面衡量星座设计的综合成本. YANG 等^[10]提出在

收稿日期: 2022-05-25

资助项目: 国家重点研发计划 (2020YFA0713501); 国家自然科学基金项目 (42174040); 湖南省自然科学基金 (2020JJ4111)

通信作者: 蔡昌盛 E-mail: csucaic@csu.edu.cn

设计混合星座时需要考虑轨道面之间的进动角速度影响,从而使得混合星座具有稳定构型。

本文同时顾及星座稳定性及综合成本进行低轨导航星座的优化设计。以 Walker 星座作为基本构型,在保证混合星座稳定性的基础上顾及综合成本及导航性能,利用遗传算法开展了低轨混合星座优化设计。

1 星座设计方法

1.1 遗传算法

星座设计的目的是将功能相似的多颗卫星分布在不同的轨道上,从而实现特定任务。目前而言,进行星座设计的主要方法包括几何解析法、仿真比较分析法以及优化算法^[11]。采用遗传算法等优化算法,可以顾及多目标任务,在空间范围内搜索最优的星座设计参数,能够弥补传统的几何解析法以及仿真比较法的不足,从而实现低轨星座的最优化设计。

遗传算法借鉴达尔文的进化论与自然选择学说,实际上是一种随机全局搜索的优化方法。遗传算法采用适者生存的原则,将问题编码成为二进制串染色体生成初始种群,通过设置适应度函数,保留种群中的最优个体,在此基础上针对编码个体进行选择、交叉及变异等操作得到新的种群,不断优胜劣汰直至得到最优解^[12]。相较于传统算法而言,遗传算法采用面对面的全局搜索方法,避免陷入优化过程中局部最优的情况,且具有较高的搜索能力和极强的鲁棒性^[13]。本文使用遗传算法处理附有整数约束条件的低轨星座优化问题。

1.2 Walker 星座构型

Walker 星座是一种常用的星座构型,具有很好的全球对称均匀分布特性,在实际星座设计中应用广泛。Walker 星座可由 T 、 P 、 F 三个参数确定^[12]。其中, T 为星座中的卫星总数, P 为星座的轨道面数, F 为相位因子,用来确定相邻轨道间的相位差, F 的取值范围为 $(0 \sim P-1)$ 。

将第一个轨道面的第一颗卫星定义为种子卫星,确定种子卫星的轨道参数即可计算得到 Walker 星座中所有卫星的轨道参数,式 (1) 给出了轨道参数的计算方法^[14]。

$$\begin{cases} a_j = a_0 \\ e_j = e_0 \\ i_j = i_0 \\ \omega_j = \omega_0 \\ \Omega_j = \Omega_0 + (j-1) \frac{360}{P} \\ M_{(j,k)} = M_0 + \frac{360}{T} F \cdot (j-1) + (k-1) \cdot P \cdot \frac{360}{T} \end{cases} \quad (1)$$

a_0 、 e_0 、 i_0 、 ω_0 、 Ω_0 、 M_0 分别表示种子卫星的半长轴、偏心率、倾角、近地点角距、升交点赤经以及平近点角。在上述参数中,半长轴和偏心率决定了轨道的形状,轨道倾角与升交点赤经决定了轨道平面的位置,近地点角距决定轨道半长轴方向,平近点角决定了卫星相对于时间的位置。 j 表示第 j 个轨道面, (j,k) 表示第 j 个轨道面上的第 k 个卫星,由上式可计算第 j 个轨道面上第 k 颗卫星的轨道参数。

1.3 星座综合成本计算

在设计低轨导航增强星座过程中,考虑导航性能增强指标如可见卫星数目以及分布均匀性的同时,也应该考虑综合成本。以 Starlink 为例,完成 62 颗卫星的组网布设需要花费成本费用高达 6 200 万美元^[15],由此可知星座的成本费用是非常巨大的,所以在保证星座性能的同时应尽可能降低成本。

星座综合成本可分为星座制造成本、发射成本以及维护成本。星座成本模型很难具体定量分析,到目前为止还没有完善的星座成本模型。但已有研究表明,星座综合成本与卫星数、轨道平面数、轨道高度以及轨道倾角有关^[9]。卫星数越多则制造与维护成本越大;卫星发射通常采用一箭多星技术使得卫星落在同一轨道面上,所以发射成本会随轨道面的增加而增加;轨道高度越高,相应需要的发射能量越大;轨道倾角增加时,借助地球自转能量越少,同样增加了发射成本。基于此,本研究将卫星综合成本因子表达为

$$\cos t = (P/P_0)^2 + i^2 + (h/h_0)^2 + (T/T_0)^2. \quad (2)$$

式中: P 为轨道面个数; P_0 为轨道面数下限; i 为轨道倾角,单位为 rad; h 为轨道高度; h_0 为轨道高度下限; T 为卫星数目; T_0 为卫星数目下限。值得注意的是,该卫星综合成本因子只表示在一个具体问题中不同方案的相对成本。

1.4 星座优化目标函数设置

本文旨在设计导航增强的低轨星座,对于导航定位而言,必须实现可见卫星数目大于 4,在此基础上可见卫星越多,观测值的冗余度越高,导航定位的可靠性和精度也越高,同时可见卫星分布越均匀,越有利于提升导航定位的精度。所以对设计星座的性能评价可分为全球平均可见卫星数、可见卫星分布的均匀程度以及星座综合成本因子三个指标。

由于 Walker 星座构型为全球均匀对称分布,其在全球的可见性也是均匀分布的。为简化计算且考虑到全球经济以及人口分布大部分在北半球,我们选取经度为 0° 的经线,在纬度方向每隔 2.5° 建立高度为 25 m 的虚拟观测站,这样共建有 37 个虚拟观测站,

设置截止高度角为 7° . 目标函数为

$$f(x) = \min\{w_1 \cdot E[v(x)] + w_2 \cdot STD([v(x)]) + w_3 \cdot \cos t(x)\}. \quad (3)$$

式中: $E[v(x)]$ 为全球平均可见卫星数; $STD([v(x)])$ 为全球可见卫星数标准偏离值, 即全球可见卫星数 STD 值, 用于衡量可见卫星分布均匀程度; $\cos t(x)$ 为综合成本因子, 其中 w_1 、 w_2 、 w_3 表示各部分所占权重, 将 w_1 、 w_2 、 w_3 分别设置为 -0.2 、 0.7 、 0.1 , 这样的定权方式表明: 可见卫星数目越多, 分布越均匀, 星座综合成本越少, 则认为星座配置最优.

2 实验结果与分析

2.1 基于遗传算法的铱星星座优化

铱星是以 Walker 为星座构型的低轨卫星星座, 轨道倾角为 86.4° , 轨道高度为 780 km , 通过 STK 与 MATLAB 互联对铱星轨道进行积分并输出铱星的空间三维构型, 如图 1 所示.

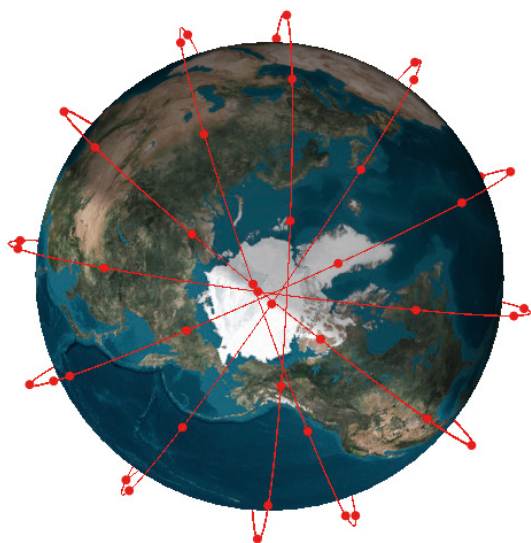


图 1 铱星三维构型

采用 1.4 节星座优化的目标函数, 顾及综合成本并基于遗传算法对铱星星座进行优化设计, 设置决策变量为 $[i, F]$, 其中 i 表示轨道倾角, F 表示相位因子, 决策变量取值范围如表 1 所示.

表 1 铱星星座决策变量范围

决策变量	$i/(^\circ)$	F
下限	30	0
上限	90	5

由于实验中采取了整数约束, 染色体编码采用实数编码, 形式为

$$X = \{[i], [F]\}. \quad (4)$$

在种群繁衍和进化的过程中, 适应度最强的个体直接存活至下一代而不做任何改变的精英个体数目设置为 2. 此外, 为了求解混合整数约束的最优化问题, 使用了工具箱中的整数 GA 求解器, 采用等级适应度函数排序, 随机均匀选择算子. 交叉算子选择 GA 求解器中的约束依赖模式, 根据优化函数的约束选择不同的函数, 交叉概率设置为 0.8 , 变异算子采用自适应变异函数, 适应度大的个体变异概率小, 适应度小的个体变异概率相对较大. 实验中采取了整数约束, 遗传算法试图使惩罚值函数达到最小而不是目标函数最小, 程序内部将使用惩罚函数值代替目标函数值, 对于满足约束条件的解, 其惩罚值就成为目标函数, 而对于不满足约束条件的解, 其惩罚值等于满足约束条件的最大目标函数值加上相应的违例惩罚项以降低其适应度^[8].

遗传算法中合适的初始种群大小和遗传代数对于提高计算效率和有效寻求最优解很重要, 如果初始种群和遗传代数太小, 算法可能无法有效地搜索空间中的最优解, 如果初始种群和遗传代数过大, 则会降低计算效率, 增加搜索时间. 在本次实验中设置种群大小为 40, 遗传代数为 50.

成本因子定义为

$$\cos t = (P/P_0)^2 + i^2 + (h/h_0)^2 + (T/T_0)^2. \quad (5)$$

图 2 显示了对铱星星座优化 50 代的平均和最佳惩罚值轨迹图. 从图 2 中可以看出, 随着种群的选择、交叉、变异、繁殖, 种群的适应度逐渐增强, 相应的惩罚值逐渐趋于稳定.

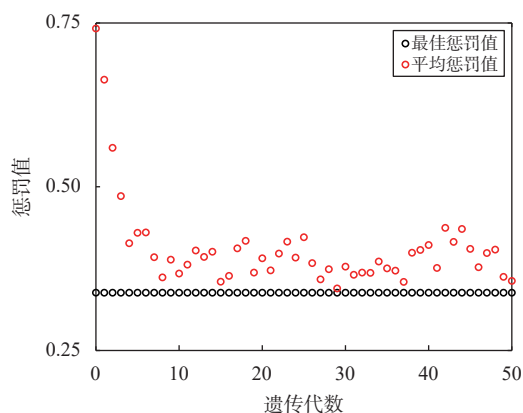


图 2 遗传算法搜索铱星星座最优解过程

最终确定优化后的星座轨道倾角为 70° , 相位因子为 3. 优化后的星座三维构型如图 3 所示, 表 2 给出了铱星优化前后的星座性能统计结果.

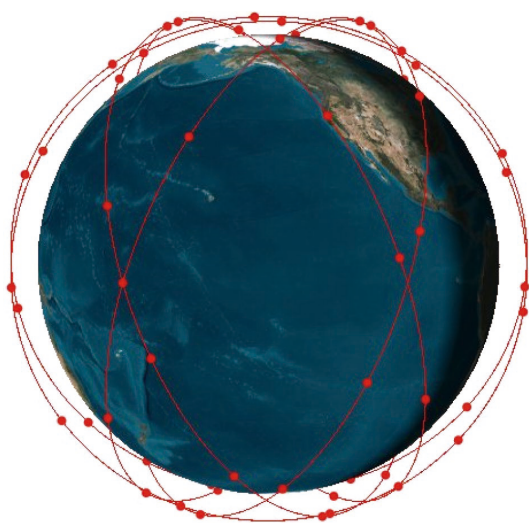


图 3 优化后的铱星星座三维构型

表 2 铱星优化前后的星座性能对比

方案	均值/颗	STD	成本
铱星优化前	2.3	2.3	5.3
铱星优化后	2.9	0.7	4.5

图 4 给出了铱星优化前后可见卫星数随纬度的变化情况。由于铱星轨道倾角接近 90° ，所以高纬度地区铱星的可见卫星数目大于优化后的星座。在 65° 以下的区域，优化后的可见卫星数显著优于优化前的铱星，而且优化后的可见卫星数整体上沿位置纬度变化更为平缓。计算结果表明，无论可见卫星数、STD 值还是综合成本因子较优化前的铱星星座均有明显改善，全球可见卫星数均值由 2.3 颗增至 2.9 颗，可见卫星数 STD 由 2.3 降至 0.7，综合成本因子由 5.3 降至 4.5，证明了本设计方法的有效性。

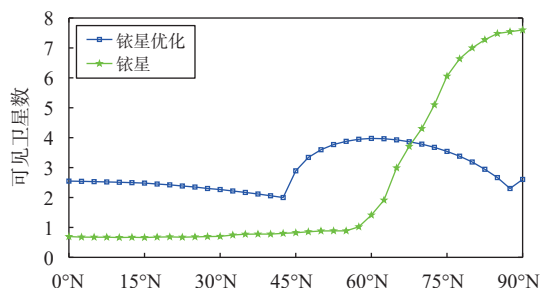


图 4 铱星优化前后星座随纬度变化的可见卫星数

2.2 基于遗传算法的混合星座设计

2.2.1 星座构型稳定性

当卫星星座的高度和倾角不同时，由于地球的非球形摄动力引起的轨道面进动产生差异会导致不同高度和倾角构成的星座不稳定，从而改变星间以及卫

星和地球之间的几何关系^[16]，无法保证星座能否按照设计方案准确运行。因此，混合星座优化的前提是星座构型具有稳定特性。

在设计星座轨道高度时，需要考虑的不仅是覆盖性能，更需要考虑空间环境，如太空垃圾分布、辐射粒子以及太空引力等实际因素。文献[7]使用 STK 分析了 500~1 100 km 的大气阻力对轨道因素的影响，并指出当轨道高度低于 900 km 时大气阻力显著增加。当轨道高度高于 1 500 km 时会受到范艾伦辐射带的影响，所以适宜的轨道高度范围为 900~1 500 km。

低倾角和高倾角的取值范围分别在 $(0^\circ, 45^\circ)$ 、 $(45^\circ, 90^\circ)$ ，这样能够使得倾角较小的星座增加赤道附近地区的卫星可见度，倾角较大的星座可以更好地覆盖高纬度地区。

为了保持星座稳定构型，必须在相同的进动速度下选择轨道^[10]。式(6)给出了轨道面进动速度计算公式

$$\Omega = -\frac{3\omega J_2}{2(1-e^2)^2} \cdot \left(\frac{R_e}{a}\right)^2 \cos i. \quad (6)$$

式中： Ω 为轨道面进动速度； R_e 为地球半径； e 为偏心率； a 为轨道高度； ω 为卫星的角速率； $J_2 = 1.086 \times 10^{-3}$ 。

在轨道高度范围和轨道倾角范围内进行遍历求解轨道面进动速度，轨道高度精度设置为 1 km，轨道倾角精度设置为 1° 。由以上分析可知，当低倾角星座与高倾角星座轨道进动速度相同时即可确定相对应的轨道高度和轨道倾角，具体构型设计如表 3 所示。

表 3 混合星座轨道倾角与高度构型设计

构型	倾角/ $^\circ$	高度/km
1	16	1 360
2	62	975

2.2.2 混合星座优化

将混合星座决策变量设置为 $[P_1, N_1, F_1, P_2, N_2, F_2]$ ， P 为轨道面数， N 为单个轨道面上的卫星数， F 表示相位因子，且 $N = \frac{T}{P}$ ，下标表示组合星座中的子星座，决策变量取值范围如表 4 所示。

表 4 决策变量取值范围

决策变量	P_1	N_1	F_1	P_2	N_2	F_2
下限	4	6	0	4	6	0
上限	10	12	P_1-1	10	12	P_2-1

染色体编码形式为

$$X = \{[P_1], [N_1], [F_1], [P_2], [N_2], [F_2]\}. \quad (7)$$

在种群繁衍和进化的过程中,适应度最强的个体直接存活至下一代而不做任何改变的精英个体数目设置为 3,其余处理策略与 2.1 节中策略一致.

综合成本因子表示为

$$\cos t = ((P_1/P_{1,0})^2 + i_1^2 + (h_1/h_{1,0})^2 + (T_1/T_{1,0})^2 + (P_2/P_{2,0})^2 + i_2^2 + (h_2/h_{2,0})^2 + (T_2/T_{2,0})^2)/2. \quad (8)$$

式中: P 为轨道面个数; P_0 为轨道面数下限; i 为轨道倾角,单位为 rad ; h 为轨道高度; h_0 为轨道高度下限; T 为卫星数目; T_0 为卫星数目下限; 下标 1、2 分别为混合星座中的两种不同的星座构型.

目标函数为

$$f(x) = \min\{-0.2 \cdot E[v(x)] + 0.7 \cdot STD([v(x)]) + 0.1 \cdot \cos t(x)\}. \quad (9)$$

在遗传算法中设置初始种群为 60,遗传代数数为 50. 图 5 显示了对混合星座 50 代的平均及最佳惩罚值轨迹图,从图 5 中可以看出,随着种群的选择、交叉、变异、繁殖,种群的适应度逐渐增强,相应的惩罚值减少,直至收敛.

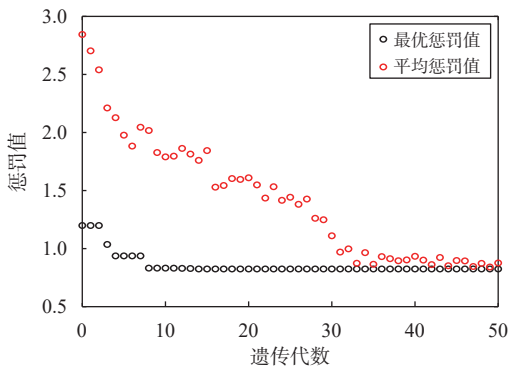


图 5 遗传算法搜索混合星座最优解过程

通过遗传算法搜索最优解后得到轨道高度为 1 360 km、轨道倾角为 160 的 Walker24/4/1 星座与轨道高度为 975 km、轨道倾角为 620 的 Walker35/5/2 星座. 图 6 给出了优化后的低轨混合星座 (Walker24/4/1 与 Walker35/5/2) 三维构型. 为进一步验证混合星座对 GNSS 的增强性能, 图 7 给出了北斗/低轨混合星座的三维构型, 并分别对低轨混合星座、北斗星座以及北斗/低轨混合星座进行性能评估.

表 5 为低轨混合星座与北斗星座以及北斗/低轨混合星座的可见卫星数以及 STD 值, 由于在设计混合星座过程中就已经顾及星座成本, 所以此处没有对

成本因子进行评估. 将组合后的星座与北斗星座相比较, 全球可见卫星数均值由 6.9 颗增至 9.3, 可见卫星数标准差由 1.1 降至 0.4. 可见卫星数沿纬度变化如图 8 所示. 本文主要针对于低轨卫星对于现有北斗系统的导航增强, 所以即使混合低轨星座可见卫星数目小于 4, 虽然不能进行单独的导航定位, 但是在与北斗系统混合之后, 增加了可见卫星数, 降低了 STD 值, 能够起到导航增强的作用.

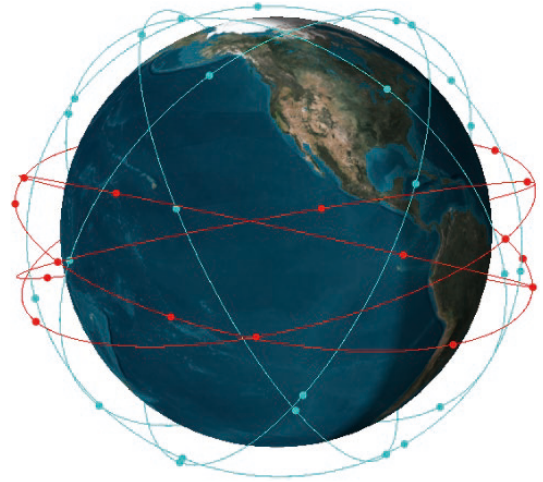


图 6 优化后的低轨混合星座三维构型

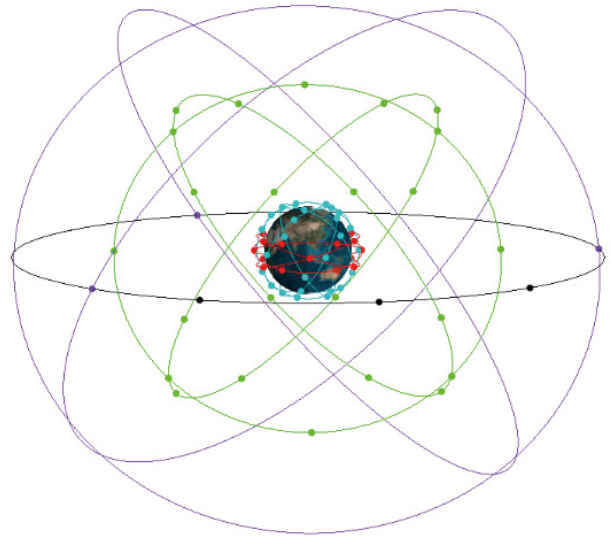


图 7 北斗/低轨混合星座三维构型

表 5 不同星座性能

构型	可见卫星数	STD
低轨混合星座	2.4	1.2
北斗星座	6.9	1.1
北斗/低轨混合星座	9.3	0.4

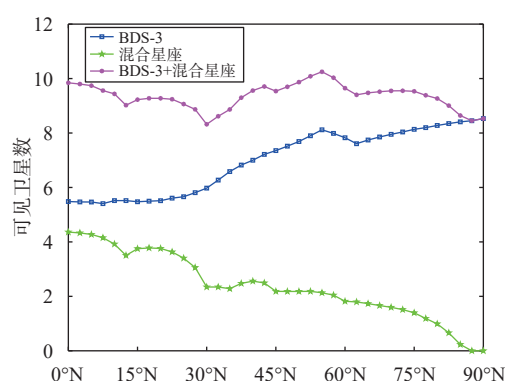


图 8 不同星座可见卫星数沿纬度位置变化分布

3 结束语

本文通过顾及星座稳定性及综合成本, 基于遗传算法对铱星星座以及混合星座进行了优化设计。在顾及导航性能以及综合成本的基础上, 设计目标函数, 采用与铱星相同的轨道构型, 对轨道倾角、相位因子进行搜索, 得到倾角 70° , 相位因子为 3 的优化后的铱星星座构型, 与优化前的铱星星座相比, 全球平均可见卫星数由 2.3 增至 2.9, STD 值由 2.3 降至 0.7, 同时成本因子由 5.3 降至 4.5, 验证了本文方法的有效性。在保证星座构型稳定性的条件下, 确定高倾角与低倾角混合星座的轨道高度和轨道倾角, 固定 Walker 星座的相位因子为 0, 利用遗传算法得到轨道高度为 1360 km、倾角为 16° 的 Walker 24/4/1 星座与轨道高度为 975 km、倾角为 62° 的 Walker 35/5/2 星座。将设计得到的低轨混合星座与北斗星座组合后, 与北斗星座相比平均可见卫星数由 6.9 增至 9.3, STD 值由 1.1 降至 0.4。在未来的星座优化设计过程中应该考虑到更多的实际因素, 如星座运行过程中是否存在碰撞风险、卫星轨道是否存在衰减可能等。

参考文献

- [1] 张小红, 马福建. 低轨导航增强GNSS发展综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1073-1087.
- [2] 杨元喜. 综合PNT体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5): 505-510.
- [3] GR H B, LI B F, NIE L W, et al. LEO constellation optimization for LEO enhanced global navigation satellite system (LeGNSS)[J]. Advances in space research, 2020, 66(3): 520-532. DOI: 10.1016/j.asr.2020.04.031
- [4] HE X C, HUGENTOBLE U. Design of mega-constellations of LEO satellites for positioning[C]//2018 Proceedings China

Satellite Navigation Conference(CSNC), 2018: 663-673. DOI:10.1007/978-981-13-0005-9_54

- [5] 田野, 张立新, 边朗. 低轨导航增强卫星星座设计[J]. 中国空间科学技术, 2019, 39(6): 55-61.
- [6] 徐哲宇, 杜兰, 刘泽军, 等. 基于FLOWER星座的区域导航增强低轨卫星星座设计与优化[C]//第十一届中国卫星导航年会论文集—S07 卫星导航增强技术, 2020.
- [7] GUAN M Q, XU T H, GAO F, et al. Optimal walker constellation design of LEO-based global navigation and augmentation system[J]. Remote sensing, 2020, 12(11): 1845. DOI: 10.3390/rs12111845
- [8] MA F J, ZANG X H, LI X X, et al. Hybrid constellation design using a genetic algorithm for a LEO-based navigation augmentation system[J]. GPS solutions, 2020, 24(2): 1-14. DOI: 10.1007/s10291-020-00977-0
- [9] 谢恺, 薛模根, 韩裕生, 等. 基于遗传算法的低轨天基雷达星座设计[J]. 信号处理, 2008, 24(2): 233-236.
- [10] YANG M Q, DONG X R, HU M. Design and simulation for hybrid LEO communication and navigation constellation[C]//2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), 2016: 1665-1669. DOI: 10.1109/CGNCC.2016.7829041
- [11] 范丽. 卫星星座一体化优化设计研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [12] 雷英杰, 张善文. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 第2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2015.
- [13] 关梅倩, 焦文海, 贾小林, 等. 基于导航增强的低轨卫星星座设计[C]//第九届中国卫星导航学术年会论文集—S07 卫星导航增强技术, 2018: 22-26.
- [14] 莫宇. 低轨卫星通信星座多目标优化设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [15] 章罗娜, 李心蕊, 赵书阁, 等. “星链”星座建设成本及运营分析[J]. 国际太空, 2020(11): 23-27.
- [16] 范丽, 张育林. 区域覆盖混合星座设计[J]. 航天控制, 2007(6): 52-55.

作者简介

贺备 (1998—), 男, 硕士, 主要研究方向为低轨卫星导航增强。

蔡昌盛 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为 GNSS 导航和精密定位。

潘林 (1989—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为 GNSS 精密定位。

蔡成林 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为卫星导航和无线通信。

Optimization design method for low earth orbit navigation constellation considering constellation stability and comprehensive cost

HE Bei¹, CAI Changsheng¹, PAN Lin¹, CAI Chenglin²

(1. *School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;*

2. *School of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

Abstract: The first step is to design a low earth orbit satellite (LEO) for navigation augmentation using low earth orbit satellites. When designing the constellation configuration, the stability and comprehensive cost of the constellation are two important factors to be considered. This paper presents an optimal design method for low earth orbit navigation constellation considering constellation stability and comprehensive cost. First, the Iridium constellation is optimized by genetic algorithm. Compared with Iridium constellation, the mean number of visible satellites increases from 2.3 to 2.9, the standard deviation of visible satellites decreases from 2.3 to 0.7, and the comprehensive cost factor decreases from 5.3 to 4.5, which proves the effectiveness of this method. Then, taking Walker constellation as the basic configuration, the low earth orbit hybrid constellation is optimized by genetic algorithm, considering the navigation performance and comprehensive cost on the basis of ensuring the stability of the hybrid constellation. The optimized low earth orbit hybrid constellation is combined with the BDS constellation. Compared with the BDS, the mean number of visible satellites increases from 6.9 to 9.3, and the standard deviation of visible satellites decreases from 1.1 to 0.4.

Keywords: low earth orbit satellite (LEO); navigation augmentation; constellation design and optimization; genetic algorithm; comprehensive cost