

卫星导航系统功率增强子星座优化设计与性能分析*

吕志成,李峥嵘,牟卫华,黄龙,欧钢
(国防科技大学电子科学学院,湖南长沙 410073)

摘要:卫星功率增强技术是提高区域导航信号抗干扰性能的一种有效措施,在卫星导航全星座中优选出卫星数量少、服务性能优的功率增强子星座,是新一代卫星导航系统建设迫切需要解决的问题。因此提出基于卫星数最少准则的功率增强子星座优化设计方法,详细介绍设计流程、数学模型及最优解搜索策略;定义了可用性水平、精度水平和覆盖范围等指标评估功率增强子星座性能;以GPS为例,分别针对覆盖点目标和区域目标两种应用背景进行功率增强子星座优化设计及性能评估。分析结果表明:全球范围内任意目标点进行功率增强需要12~17颗卫星;实现对我国沿海地区的连续覆盖需要18颗功率增强卫星;覆盖整个亚太地区则需要全星座24颗卫星都具备功率增强能力,这样才能满足其连续性和精度要求,此时最优功率增强子星座的服务范围可扩充至全球区域。

关键词:卫星导航系统;功率增强技术;星座设计

中图分类号:P228 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2021)04-009-08

Optimal design and performance analysis of satellite navigation system power-enhanced sub-constellation

LYU Zhicheng, LI Zhengrong, MOU Weihua, HUANG Long, OU Gang

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The power-enhancement technology of GNSS is one of the effective measures to improve the anti-jamming capability of regional satellite navigation signals. How to select power enhancement sub-constellation which has less satellite quantity and better service performance from global constellation is a problem in urgent need to be solved urgently in the construction of modern navigation system. An optimal design method of power-enhanced sub-constellation based on minimum number of satellites was proposed. The design process, mathematical model and optimal solution search strategy were introduced. Availability level, accuracy level and coverage area were defined to evaluate the performance of the power-enhanced sub-constellation. Taking GPS as an example, the optimal design and performance evaluation of power-enhanced sub-constellation was carried out for the application background of covering point target and regional target. The results of simulation show that power enhancement at any target point worldwide requires 12~17 satellites. 18 satellites are needed to achieve continuous coverage to the coastal area of China. And, covering the entire Asia-Pacific region requires full constellation satellite enhancements to meet continuity and accuracy requirements. In this case, the service range of optimal power enhanced sub-constellation can be extended to the whole world.

Keywords: satellite navigation system; power-enhanced technology; constellation design

提高卫星导航系统的抗干扰能力是新一代卫星导航系统建设面临的一项重要课题,区域导航信号功率增强技术可以在系统层面有效提升整个系统的干扰对抗能力,是新一代卫星导航系统在升级和建设中所面临的新的研究课题。

卫星导航系统功率增强技术是美国GPS现代化计划中的一项重要内容,表1给出了不同时期GPS信号功率增强技术状态变化情况^[1]。GPS IIRM/IIF卫星具有灵活的在轨可编程能

力,通过改进载荷平台性能和对下行导航信号功率重分配,使授权P码信号功率增强5~7 dB;新一代的GPS III卫星增加了点波束发射天线,可将L1、L2频段M码信号功率提高20 dB,使用户机接收信号功率达到-138 dBW,功率增强覆盖能力达到全球区域1 000~1 400 km直径范围,可以为用户提供高功率、强方向性的信号,从而有效提高系统的可靠性和抗干扰能力^[2]。关于卫星导航系统功率增强技术,除卫

* 收稿日期:2019-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41604016,61601485)

作者简介:吕志成(1982—),男,内蒙古赤峰人,讲师,博士,E-mail:chifeng21@163.com

星功率增强载荷实现技术外,还包括功率增强幅度、功率增强卫星数量及空间分布、功率增强频点选择以及功率增强控制策略等诸多系统层面的问题需要解决^[3-6]。不同于传统的以星座

构型为优化目标的星座设计^[7-8],本文以 GPS 为例,研究在确定的星座构型基础上,面向不同覆盖目标的功率增强子星座优化设计与性能分析方法。

表 1 GPS 信号功率增强技术状态变化情况
Tab. 1 Development of GPS signal power enhanced technology

| 频段 | 导航信号 | GPS II/IIA/IIR/dBW | | GPS IIRM/IIF/dBW | | GPS III/dBW | |
|------|--------|--------------------|----|--------------------|--------|----------------------|------|
| | | 正常 | 增强 | 正常 | 增强 | 正常 | 增强 |
| L1 | L1 C/A | -158.5 | | -158.5 | | -158.5 | |
| | L1 P | -161.5 | | -161.5 | -154.6 | -161.5 | |
| | L1 M | | | -161.0 | | -158.0 | -138 |
| | L1 C | | | | | -157 | |
| L2 | L2 C | -164.5 | | -160 | | -158.5 | |
| | L2 P | -164.5 | | -161.5 | -156.2 | -161.5 | |
| | L2 M | | | -161.0 | | -158.0 | -138 |
| L5 | L5(I) | | | | | -157.0 | |
| | L5(Q) | | | | | -157.0 | |
| 增强合计 | | 不增强 | | L1P、L2P 码增强 5~7 dB | | L1M、L2M 码增强 20 dB 左右 | |

1 基于卫星数最少准则的功率增强子星座优化设计方法

基于卫星数最少准则的功率增强子星座优化的目标是在满足设计指标要求的前提下,选取具有最少卫星数量和最优服务性能的功率增强卫星组合作为最优功率增强子星座^[9]。其中,最优功率增强子星座包含两个层面的含义:

- 1) 在满足设计指标要求的条件下,功率增强子星座的卫星数量最少;
- 2) 在功率增强子星座卫星数最少条件下,功率增强子星座具有最优的服务性能。

1.1 功率增强子星座优化设计流程

基于卫星数最少准则的功率增强子星座优化设计流程如图 1 所示,具体包括以下步骤。

步骤 1: 建立优化模型。将实际设计问题的物理模型抽象为数学模型,根据问题域的特征确定待优化设计变量和目标函数,并给出约束条件和评价函数。其中,目标函数建立了待优化设计变量与设计问题的最优指标之间的函数关系式;约束条件既可以是对设计变量的约束,也可以是对优化目标的约束;评价函数用于比较各可行解的优劣关系。

步骤 2: 可行解搜索。遍历所有可能的功率增强卫星组合,分析每种组合条件下功率增强目

标点的导航服务性能是否满足约束条件,最终得到一个由功率增强卫星数最小且满足设计指标要求的功率增强卫星组合构成可行解集合。

步骤 3: 最优解决策。对可行解集合中所有功率增强卫星组合的性能优劣性做出判断,最终决策出一组性能最优的功率增强卫星组合作为工程备选方案。

步骤 4: 最优解性能分析。在优选出的最优功率增强卫星组合条件下,采用仿真分析的方法对功率增强卫星组合的实际覆盖性能进行分析评估,为决策者提供依据。

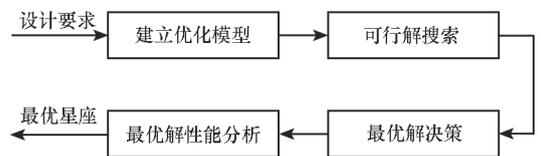


图 1 功率增强子星座优化设计流程示意图
Fig. 1 Optimal design process of power enhanced sub-constellation

1.2 功率增强子星座优化数学模型

功率增强子星座优化设计问题的优化参数为一组功率增强卫星集合,记为:

$$X = \{ (x_{l_1}, x_{l_2}, \dots, x_{l_{N_E}}) \mid x_{l_i} \in S, 1 \leq i \leq N_E, 1 \leq l_i \leq N \}$$

其中, N_E 为功率增强卫星数量, S 为全球星座所

有卫星的集合, N 为 S 中的卫星总数。基于卫星数最少准则的功率增强子星座优化设计的目标就是在满足设计指标要求的卫星组合集合中, 选择卫星数最少并且服务性能最优的功率增强卫星组合 X_{opt} , 实现费用与性能的综合最优。可见, 功率增强子星座优化设计是一个多目标的优化问题, 优化目标均为优化参数的函数。

根据功率增强子星座的设计要求, 可以给出功率增强子星座优化设计的数学模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & Y(X) = (f_{\text{number}}(X), f_{\text{AGDOP}}(X)) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} f_{\text{cover}}(X) = 100\%, C_{\min} = 4 \\ f_{\text{avail}}(X) = 100\%, G_{\max} = 6 \\ f_{\text{continue}}(X) = 100\% \\ f_{\text{number}}(X) \geq 4 \\ f_{\text{AGDOP}}(X) \leq 4 \\ X \subseteq S \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $Y(X)$ 为优化目标函数, 表示功率增强卫星组合; $f_{\text{cover}}(X)$ 、 $f_{\text{avail}}(X)$ 和 $f_{\text{continue}}(X)$ 称为等式约束条件, 分别表示对于功率增强目标点或区域来说功率增强星座满足最小覆盖重数要求 C_{\min} 的时间百分比(即覆盖性)、满足 GDOP 门限 G_{\max} 要求的时间百分比(即可用性)和满足导航服务性能要求的时间百分比(即连续性); $f_{\text{number}}(X)$ 、 $f_{\text{AGDOP}}(X)$ 既是不等式约束条件也是优化目标, 分别表示功率增强卫星数量和功率增强星座平均 GDOP 值; $X \subseteq S$ 称为边界条件, 表示功率增强子星座是全球星座的子集。

1.3 功率增强子星座最优解搜索策略

目前, 功率增强子星座优化设计问题还无法通过解析方法进行求解, 采用搜索方法求解最优功率增强卫星组合: 首先采用二分搜索法确定最优功率增强子星座卫星总数 N_E , 接着采用遍历搜索法搜索所有由 N_E 颗卫星构成的组合得到可行解集合 A , 最后根据性能最优准则从可行解集合 A 中决策出唯一最优解 X_{opt} 。

假设全球导航星座卫星总数为 N , 则满足约束条件的功率增强卫星组合可在 $\bigcup_{n=4}^N C_N^n$ 中进行搜索, 其中 C_N^n 表示从 N 颗卫星中任选 n 颗卫星组合构成的集合。由于导航解算中的 GDOP 值具有随卫星数增加单调递减的性质, 因此当选择 n 颗卫星作为功率增强卫星组合时, 如果不存在 $X \in C_N^n$ 满足约束条件, 则由 $n-i$ ($1 < i < n$) 颗卫星构成的卫星组合均不能满足约束条件; 如果存在 $X \in C_N^n$ 满足约束条件, 则在由 $n+i$ ($1 < i \leq N-n$)

颗卫星构成的卫星组合中总能找到满足约束条件的卫星组合。因此, 如果搜索到 n 颗卫星组合不存在可行解且 $n+1$ 颗卫星组合存在可行解, 即可确定最优功率增强卫星数为 $N_E = n+1$ 。

然后, 构建卫星组合集合 $C_N^{N_E}$, 依次遍历集合中的所有元素, 搜索得到满足所有约束条件的卫星组合构成功率增强子星座可行解集合 A 以及相应的精度评价集合 C , 记为:

$$A = \{X \mid X \in C_N^{N_E}, f_{\text{cover}}(X) = 100\%, f_{\text{avail}}(X) = 100\%, f_{\text{continue}}(X) = 100\%, f_{\text{AGDOP}}(X) \leq 4\} \quad (3)$$

$$C = \{f_{\text{AGDOP}}(X) \mid X \in A\} \quad (4)$$

可见, 功率增强子星座可行解集合中的所有元素均满足 $f_{\text{cost}}(X)$ 的最小化优化目标。进一步在可行解集合 A 中选择精度评价函数 $f_{\text{AGDOP}}(X)$ 取值最小的卫星组合, 即为功率增强子星座最优解, 记为 X_{opt} , 满足:

$$X_{\text{opt}} = \{X \mid X \in A, f_{\text{AGDOP}}(X) = \min f_{\text{AGDOP}}(C)\} \quad (5)$$

式中, $\min f_{\text{AGDOP}}(C)$ 表示取精度评价集合 C 中的最小值。

2 功率增强子星座的性能评估方法

功率增强的应用需求一般针对特定目标区域提出, 在功率增强子星座优化设计过程中通常以目标区域的服务性能作为设计依据和优化目标, 据此决策得到的最优功率增强子星座能达到对目标区域的最优覆盖性能。

借鉴星座性能分析中常用的球面格网分析法^[10], 提出基于功率增强子星座可用性水平和功率增强子星座精度水平的功率增强子星座性能评估方法。

2.1 可用性水平

格网点的可用性水平定义为格网点在仿真时段内满足可用性指标要求的观测历元总数与总仿真历元数的比值, 记为:

$$L_{\text{avail}}(m) = \frac{\sum_{n=1}^N F(n\Delta T, m)}{N} \times 100\% \quad (6)$$

式中: m 表示格网点; N 为观测历元总数; $F(n\Delta T, m)$ 为格网点 m 在观测历元 n 时刻的可用性标志, 取值如式(7)所示。

$$F(n\Delta T, m) = \begin{cases} 1 & G(n\Delta t, m) \leq G_{\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

根据网点可用性水平的不同, 可将所有格网点划分为三类: 如果存在部分观测历元满足可用

性指标要求,即 $0 < L_{avail}(m) < 1$,则称该格网点为部分时段可用格网点;如果所有观测历元均满足可用性指标要求,即 $L_{avail}(m) = 1$,则称该格网点为全时段可用格网点;如果不存在满足可用性指标要求的观测历元,即 $L_{avail}(m) = 0$,则称该格网点为全时段不可用格网点。部分时段可用格网点和全时段可用格网点统称为可用格网点。

功率增强子星座可用性水平可以从可用性覆盖水平和可用性服务水平两个方面进行评估。

功率增强子星座的可用性覆盖水平定义为全球范围内可用格网点占总格网点的百分比,反映了功率增强子星座对全球区域的覆盖能力,表示为:

$$f_{avail,area}(x) = \frac{\sum_{m=1}^M U(m)}{M} \times 100\% \quad (8)$$

式中: M 为全球格网点总数; $U(m)$ 表示格网点 m 处的可用性标志。

对于部分时段可用性覆盖水平, $U(m)$ 可取值为:

$$U(m) = \begin{cases} 1 & \exists n \in [1, N], \text{ s. t. } G(n\Delta t, m) \leq G_{max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

对于全时段可用性覆盖水平, $U(m)$ 可取值为:

$$U(m) = \begin{cases} 1 & \forall n \in [1, N], \text{ s. t. } G(n\Delta t, m) \leq G_{max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

功率增强子星座的可用性服务水平定义为具有不同可用性水平的格网点在总可用格网点中所占的比重,反映了功率增强子星座为可用格网点提供服务的水平,表示为:

$$f_{avail,level}(x) = \frac{\sum_{k=1}^K f_{BOOL}(L_{avail,min} < L_{avail}(k) \leq L_{avail,max})}{K} \times 100\% \quad (11)$$

式中: $K = \sum_{m=1}^M U(m)$ 表示可用格网点总数; $L_{avail}(k)$ 表示可用格网点 k 处的可用性水平; $L_{avail,min}$ 和 $L_{avail,max}$ 分别表示可用性水平的下边界和上边界, $f_{BOOL}(x)$ 表示布尔函数,当 $x = \text{true}$ 时取值为 1,当 $x = \text{false}$ 时取值为 0。

在分析过程中,可将可用性水平划分为不同等级,将可用性水平等间隔划分为 10 个等级,如表 2 所示。

表 2 格网点可用性水平等级划分

Tab.2 Availability level classification of grid point

| 可用性等级 | 下边界 | 上边界 |
|-------|-----|-----|
| 1 | 0.9 | 1.0 |
| 2 | 0.8 | 0.9 |
| 3 | 0.7 | 0.8 |
| 4 | 0.6 | 0.7 |
| 5 | 0.5 | 0.6 |
| 6 | 0.4 | 0.5 |
| 7 | 0.3 | 0.4 |
| 8 | 0.2 | 0.3 |
| 9 | 0.1 | 0.2 |
| 10 | 0.0 | 0.1 |

2.2 精度水平

功率增强子星座的精度水平定义为具有不同精度水平的格网点占全球范围总格网点的百分比,记为:

$$f_{GDOP,level}(x) = \frac{\sum_{m=1}^M f_{BOOL}(L_{GDOP,min} < L_{GDOP}(m) \leq L_{GDOP,max})}{M} \times 100\% \quad (12)$$

式中: $L_{GDOP}(m)$ 表示格网点 m 处的平均 GDOP 值(当格网点存在 $G > 148$ 或可用卫星数小于 4 的观测历元时,称其为不可定位格网点,记 $L_{GDOP}(m) = 0$); $L_{GDOP,min}$ 和 $L_{GDOP,max}$ 分别为精度水平等级的下边界和上边界。

精度水平反映了功率增强子星座在全球区域提供不同等级导航服务的能力。在分析过程中,可将精度水平划分为 12 个等级,如表 3 所示^[11]。

表 3 格网点精度水平等级划分

Tab.3 Accuracy level classification of grid point

| 精度等级 | GDOP 值下限 | GDOP 值上限 |
|------|-----------|----------|
| 1 | 1.0 | 1.3 |
| 2 | 1.3 | 1.8 |
| 3 | 1.8 | 2.6 |
| 4 | 2.6 | 4.5 |
| 5 | 4.5 | 6.3 |
| 6 | 6.3 | 9.0 |
| 7 | 9.0 | 18 |
| 8 | 18 | 36 |
| 9 | 36 | 64 |
| 10 | 64 | 148 |
| 11 | 148 | +∞ |
| 12 | 可用卫星数 < 4 | |

2.3 覆盖范围

功率增强信号覆盖范围是指,功率增强信号波束指向在可调整范围内遍历时,被功率增强信号覆盖且满足性能指标要求的区域构成的集合。位于点波束信号覆盖区内的任意目标均可称为被该点波束信号1重覆盖。功率增强覆盖范围的大小是影响功率增强子星座优化设计结果的另一个重要因素。

3 算例分析

功率增强子星座本质上是全球星座的一个子集,因此功率增强子星座与全球星座的卫星组成、星座构型等因素密切相关。美国GPS卫星星座由24颗卫星构成,分别位于沿赤道以60°间隔均匀分布的6个轨道平面,每个轨道分布4颗卫星,轨道高度约为20 182 km,轨道倾角为55°,可为全球用户提供连续的导航、定位和授时服务^[12]。

3.1 覆盖点目标的功率增强子星座优化设计

在全球范围内,经度间隔30°,纬度间隔15°,共选取144个特征点,分别搜索覆盖每个特征点

的最优功率增强子星座,图2给出了GPS在各特征点处的最优功率增强子星座卫星数量分布情况。从图2中可以看到,GPS最优功率增强卫星数在12~17之间,在-15°~15°纬度带功率增强卫星数较少,在中纬度地区功率增强卫星数较多。表4给出了GPS覆盖部分点目标的功率增强子星座优化设计结果,其中 M_{ij} 表示第*i*个轨道平面的第*j*颗卫星。

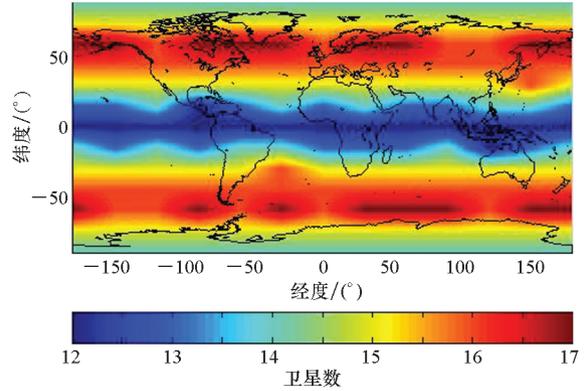


图2 GPS最优功率增强子星座卫星数全球分布
Fig. 2 Global distribution of satellite number of GPS optimal power enhanced sub-constellation

表4 GPS覆盖点目标的功率增强子星座优化设计结果

Tab. 4 Optimal design result of GPS power enhanced sub-constellation for covering point target

| 序号 | 坐标点 | 功率增强卫星数 | 功率增强子星座最优解 | $f_{AGDOP}(X)$ |
|----|-------------------|---------|---|----------------|
| 1 | 144.80°E, 13.43°N | 15 | {M11, M12, M13, M21, M22, M32, M33, M34, M42, M43, M51, M53, M54, M63, M64} | 2.73 |
| 2 | 129.08°E, 41.27°N | 16 | {M11, M13, M14, M23, M24, M31, M32, M41, M43, M44, M51, M52, M53, M61, M62, M64} | 3.18 |
| 3 | 123.20°E, 25.50°N | 15 | {M12, M13, M21, M23, M24, M33, M34, M41, M42, M44, M51, M54, M61, M62, M63} | 3.00 |
| 4 | 77.03°W, 38.90°N | 17 | {M11, M14, M23, M31, M32, M34, M41, M42, M43, M44, M51, M52, M53, M54, M61, M63, M64} | 3.24 |

3.2 覆盖区域目标的功率增强子星座优化设计

本节针对不同的区域目标进行功率增强子星座优化设计,并讨论功率增强目标区域不同对功率增强子星座优化设计结果的影响。

选取以下三个区域分别作为功率增强目标:

1) 区域 I: 范围为(100°E ~ 120°E, 10°N ~ 25°N), 包括我国部分沿海城市和岛屿, 约占全球面积0.51%。

2) 区域 II: 范围为(60°E ~ 145°E, 0°N ~ 55°N), 包括我国领土及其周边区域在内的亚太地区, 约占全球面积7.37%。

3) 区域 III: 全球区域。

表5给出了截止角为5°、最少4重覆盖且可用性门限 $G_{max} = 6$ 条件下, 仿真24 h GPS全球星座对三个目标区域的服务性能的统计结果, 也可以认为是在全球星座所有卫星均为功率增强卫星时功率增强子星座所能达到的最优性能。

3.2.1 覆盖区域 I 的功率增强子星座优化设计结果

表6给出了GPS覆盖I区域的功率增强子星座优化设计结果。可以看到,GPS需要18颗功率增强卫星, 平均分布在6个轨道平面上, 平均GDOP值为2.65。

表 5 GPS 全球星座对各目标区域的服务性能

Tab.5 Service performance of GPS global constellation to power enhancement target area

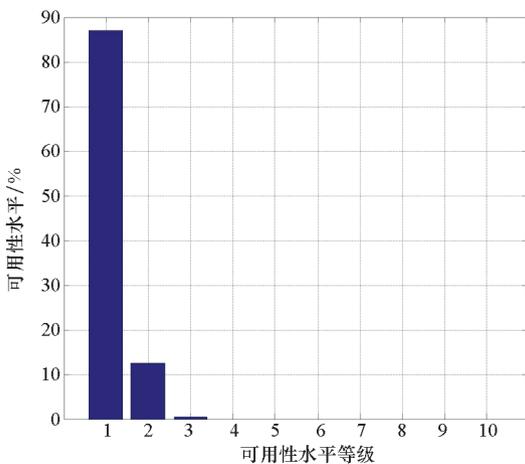
| 目标区域 | 占全球格网百分比/% | 服务质量 | | | | |
|------|------------|-----------|--------|-------|-------|-------|
| | | 平均 GDOP 值 | 平均覆盖重数 | 覆盖性/% | 连续性/% | 可用性/% |
| I | 0.51 | 1.98 | 8.15 | 100 | 100 | 100 |
| II | 7.37 | 2.01 | 8.02 | 100 | 100 | 100 |
| III | 100 | 2.15 | 8.29 | 100 | 100 | 100 |

表 6 覆盖区域 I 的 GPS 功率增强子星座优化设计结果

Tab.6 Optimal design result of GPS power enhanced sub-constellation for covering area I

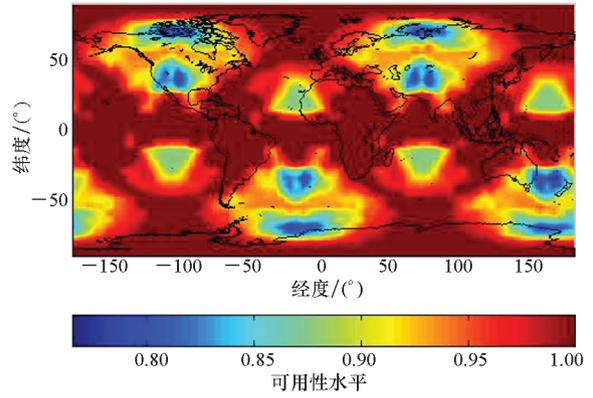
| 优化结果 | 取值 |
|----------------|--|
| 功率增强卫星数 | 18 |
| 功率增强子星座最优解 | { M11, M12, M13, M21, M23, M24, M32, M33, M34, M41, M42, M44, M51, M53, M54, M61, M62, M63 } |
| $f_{AGDOP}(X)$ | 2.65 |

覆盖区域 I 的 GPS 最优功率增强子星座性能评估结果如图 3 所示。从最优功率增强子星座对全球区域的服务性能来看, GPS 全时段和部分时段可用格网百分比分别为 45.28% 和 54.72%, 其中可用性水平在 90% ~ 100% 的格网占全部可用格网比达到 87% (见图 3(a)), 覆盖全球范围(见图 3(b)), 精度水平等级在 3 ~ 6 之间, 不可定位(即精度水平等级 12) 格网小于 10% (见图 3(c)和图 3(d))。



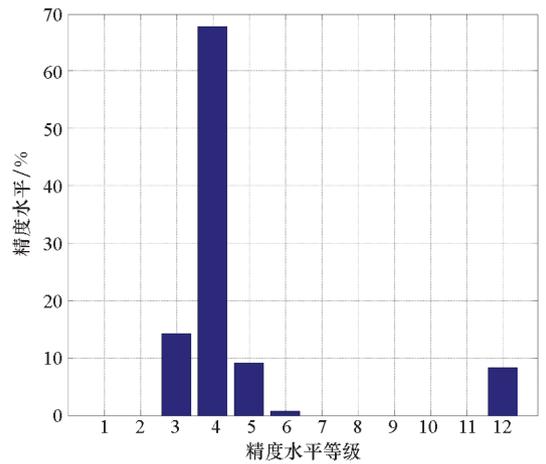
(a) 可用性水平等级统计结果

(a) Statistical results of availability level



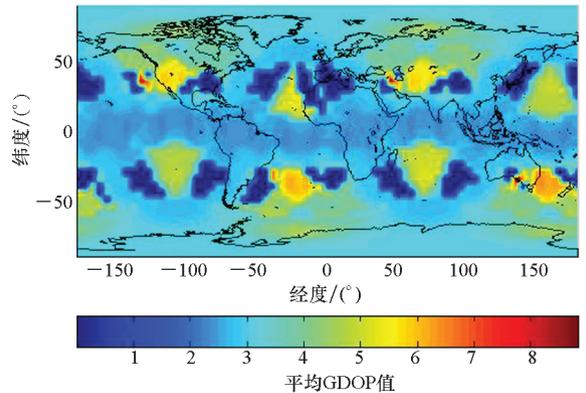
(b) 全球可用性水平分布

(b) Global availability level distribution



(c) 精度水平等级统计结果

(c) Statistical results of accuracy level



(d) 全球平均 GDOP 值分布

(d) Global average GDOP distribution

图 3 覆盖区域 I 的 GPS 最优功率增强子星座性能评估结果

Fig.3 Performance evaluation results of GPS optimal power enhanced sub-constellation for covering area I

分析表明,对于覆盖区域 I 的最优功率增强子星座, GPS 的中轨道 (MEdium Orbit, MEO) 卫星存在观测弧段的问题,因此需要较多的卫星才

能实现对目标区域的连续覆盖。除可对区域 I 提供满足精度要求的导航服务外,对全球超过 90% 的地区同样可提供具备一定精度水平的导航服务。

3.2.2 覆盖区域 II 的功率增强子星座优化设计结果

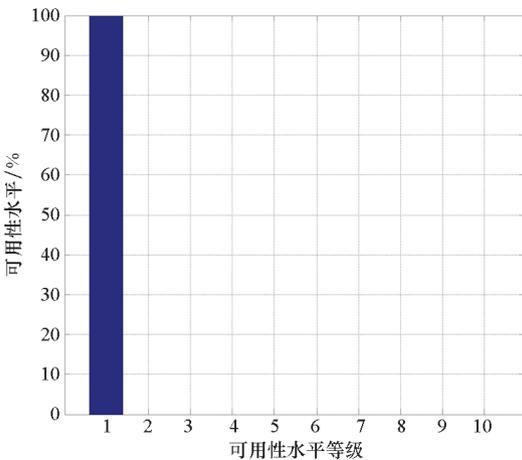
表 7 给出了 GPS 覆盖区域 II 的功率增强子星座优化设计结果。可以看到,GPS 需要全部 24 颗卫星都具有功率增强能力,平均 GDOP 值为 2.01。

表 7 覆盖区域 II 的 GPS 功率增强子星座优化设计结果

Tab.7 Optimal design result of GPS power enhanced sub-constellation for covering area II

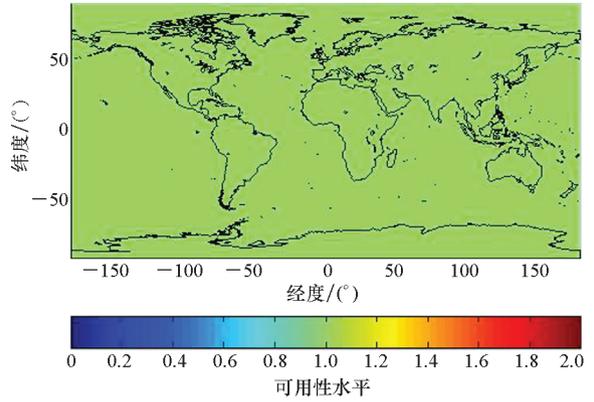
| 优化结果 | 取值 |
|----------------|--|
| 功率增强卫星数 | 24 |
| 功率增强子星座最优解 | { M11, M12, M13, M14, M21, M22, M23, M24, M31, M32, M33, M34, M41, M42, M43, M44, M51, M52, M53, M54, M61, M62, M63, M64 } |
| $f_{AGDOP}(X)$ | 2.01 |

覆盖区域 II 的 GPS 最优功率增强子星座性能评估结果如图 4 所示。从最优功率增强子星座对全球区域的服务性能来看,GPS 全时段可用格网百分比达到 100.00%,可实现全球覆盖,精度水平等级在 2~4 之间。可见,最优功率增强子星座同时还可以实现对区域 III 的连续性覆盖。



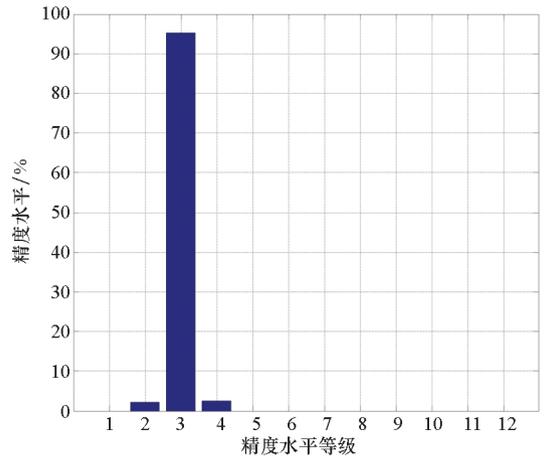
(a) 可用性水平等级统计结果

(a) Statistical results of availability level



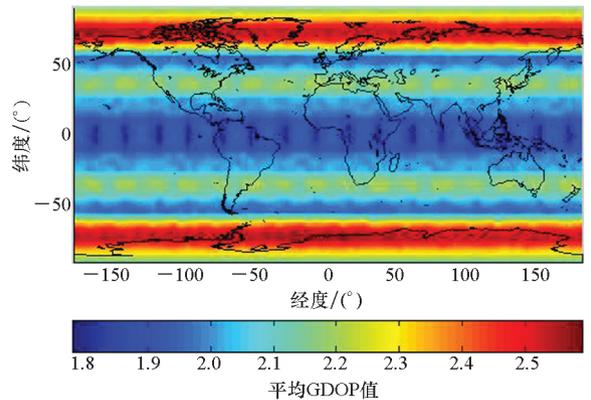
(b) 全球可用性水平分布

(b) Global availability level distribution



(c) 精度水平等级统计结果

(c) Statistical results of accuracy level



(d) 全球平均 GDOP 值分布

(d) Global average GDOP distribution

图 4 覆盖区域 II 的 GPS 最优功率增强子星座性能评估结果

Fig.4 Performance evaluation results of GPS optimal power enhanced sub-constellation for covering area II

4 结论

本文提出基于卫星数最少准则的功率增强子星座优化设计方法,详细介绍了优化设计流程、数

学模型以及最优解的搜索策略。定义采用可用性水平和精度水平用以评估功率增强子星座对全球区域的服务性能。

以 GPS 为例,针对覆盖点目标和区域目标两种应用背景进行功率增强子星座优化设计。分析结果表明:全球范围内任意目标点进行功率增强需要 12~17 颗卫星,低纬度地区和高纬度地区所需卫星数少于中纬度地区。实现对我国沿海区域的连续覆盖需要 18 颗功率增强卫星;覆盖亚太地区则需要全星座 24 颗卫星都具备功率增强能力,这样才能满足连续性和精度要求,此时最优功率增强子星座的服务范围可扩充至全球区域。

与 GPS 星座全部由 MEO 卫星构成不同,我国北斗系统星座是由 GEO、IGSO 和 MEO 构成的混合星座,其中 MEO 卫星主要实现全球覆盖,GEO 和 IGSO 卫星主要实现亚太地区的连续、多重增强覆盖。所提卫星导航系统功率增强子星座优化设计方法和性能评估方法同样适用于北斗系统,在具体应用时,可以作为数学模型约束条件将 GEO 和 IGSO 卫星作为功率增强卫星,然后再从 MEO 卫星中选取功率增强卫星实现全球覆盖,利用 GEO 和 IGSO 区域增强覆盖的特点减小功率增强子星座卫星数量。

参考文献 (References)

- [1] 李祖洪,郑晋军,张立新. GPS 有效载荷发展对北斗系统的启示[C]//第二届中国卫星导航学术年会论文集, 2011: 41.
LI Zuhong, ZHENG Jinjun, ZHANG Lixin. Enlightenment from evolution of the GPS payload for BeiDou system[C]// Proceedings of the 2nd China Satellite Navigation Conference, 2011: 41. (in Chinese)
- [2] 杨宁虎,刘春保,杨哲. 美国 GPS 系统导航战技术发展分析[J]. 国际太空, 2017(12): 4-8.
YANG Ninghu, LIU Chunbao, YANG Zhe. Analysis on GPS navigation warfare technologies[J]. Space International, 2017(12): 4-8. (in Chinese)
- [3] 孙进,初海彬,董海青,等. 导航卫星系统功率增强技术与覆盖范围研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(增刊1): 80-84.
SUN Jin, CHU Haibin, DONG Haiqing, et al. Research on power-enhanced technology and coverage areas of global navigation satellites[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(Suppl 1): 80-84. (in Chinese)
- [4] 翟玉娟,吴锋. GPS III 中的点波束及对抗技术探讨[J]. 光电系统, 2014(2): 19-23.
ZHAI Yujuan, Wu Feng. Research on spot beam in GPS III and countermeasures[J]. Electronic and Electro-optical Systems, 2014(2): 19-23. (in Chinese)
- [5] 董彦磊,汪春霆,孙巍. GEO 卫星点波束覆盖算法的研究与应用[J]. 无线电通信技术, 2016, 42(4): 83-86.
DONG Yanlei, WANG Chunting, SUN Wei. Research and application of GEO satellite spot-beam covering algorithm[J]. Radio Communications Technology, 2016, 42(4): 83-86. (in Chinese)
- [6] XIAO W, LIU W X, SUN G F. Modernization milestone: BeiDou M2-S initial signal analysis [J]. GPS Solutions, 2016, 20(1): 125-133.
- [7] 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.
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. (in Chinese)
- [8] 张科科,朱振才,周美江,等. 高轨目标监视系统星座设计和探测效能分析[J]. 宇航学报, 2018, 39(7): 808-818.
ZHANG Keke, ZHU Zhencai, ZHOU Meijiang, et al. Constellation design and detection efficiency analysis of high orbit objects surveillance system[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(7): 808-818. (in Chinese)
- [9] 吕志成,刘增军,王飞雪. 卫星导航系统功率增强对区域定位服务性能的影响分析[J]. 宇航学报, 2012, 33(1): 55-61.
LYU Zhicheng, LIU Zengjun, WANG Feixue. An analysis of effect of enhancement on performance of region positioning service [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(1): 55-61. (in Chinese)
- [10] 陈晓宇,戴光明,陈良,等. 一种基于球面剖分的星座性能分析方法[J]. 宇航学报, 2016, 37(10): 1246-1254.
CHEN Xiaoyu, DAI Guangming, CHEN Liang, et al. A method for constellation performance analysis based on spherical subdivision [J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(10): 1246-1254. (in Chinese)
- [11] KAPLAN E D, HEGARTY C J. Understanding GPS: principles and applications [M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2006: 243-300.
- [12] ENGE P K. The global positioning system: signals, measurements, and performance [J]. International Journal of Wireless Information Networks, 1994, 1(2): 83-105.