

doi: 10.7690/bgzd.2013.09.019

基于遗传算法的蜂窝广域空基伪卫星网络布局优化

史海青¹, 郁丰²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学高新技术研究院, 南京 210016)

摘要: 为能实现近地面大区域覆盖的多指标空基伪卫星网络的布局优化, 提出了蜂窝波浪式伪卫星网络, 并定义、分析了网络设计及优化的衡量指标。鉴于遗传算法大范围搜索能力弱、优化结果容易陷入局部最优等问题, 因此对网络布局进行优化时, 采用先由经验法粗略确定影响网络性能参数的取值范围, 再用遗传算法在小区间内对网络性能指标进行多参数精寻优的方法, 最后对优化后的网络性能进行研究分析。仿真结果表明: 提出的蜂窝型波浪式网络优化后能实现广域覆盖, 能保证服务区 PDOP 的可用性; 通过对先用经验法后用遗传算法与直接用遗传算法 2 种方式网络优化性能的比较, 还能得出前者能提高网络优化的效率及性能。

关键词: 空基伪卫星; 蜂窝波浪式网络; 经验法; 遗传算法; 多指标优化; PDOP

中图分类号: TJ861 **文献标志码:** A

Wide Area Cellular Network Layout Optimization of Air-Borne Pseudo Based on Genetic Algorithm

Shi Haiqing¹, Yu Feng²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Academy of Frontier Science, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To achieve the layout optimization of multiple index air-borne pseudo satellite network of ground-level and large-scale coverage, the paper puts forward pseudo satellite network in cellular wave-mode, defines and analyses the measurable indicator of network design and optimization. Considering the weakness of wide-range search ability of genetic algorithm and the problem of the optimal result that is easy to fall into local optimum and so on, the suitable means of network layout optimization is that using empirical method to roughly determine the value range that affects network performance parameters, after that using genetic algorithm to conduct the multi-parameter optimizing on network performance indicators in small zones. Finally, research and analysis on performance of network which was optimized should be carried out. The simulation results show that the proposed cellular wave-type network can achieve wide area coverage and ensure the availability of PDOP in service area. By comparing the two approaches which are a combination of empirical approach first and genetic algorithm next and empirical approach merely and directly to optimize network performance, the conclusion can be achieved that the former approach can improve the efficiency and performance of network optimization.

Key words: air-borne pseudo satellite; pseudo satellite network in cellular wave-mode; empirical approach; genetic algorithm; multiple index optimization; PDOP

0 引言

在 GPS 发展的早期, 为了验证接收机的功能而使用了 4 个地面发射机提供模拟 GPS 信号, 这就是伪卫星的雏形^[1]。伪卫星不仅能够起到替代导航星座的作用, 而且能够提升整个系统的稳定性、可靠性以及测量精度, 甚至能在室内、地下等无法接收导航卫星信号的地方完全替代导航卫星星座。在过去的 20 年里, 在定位和导航应用的各个领域, 伪卫星技术得到了充分发展。

伪卫星组网是伪卫星关键技术中的一部分。随着全球信息化程度的提高, 空基伪卫星网络作为伪

卫星组网技术的产物, 在军事等领域的应用越来越广泛, 其重要性也越来越突出。目前, 伪卫星布局的研究大多基于几颗伪卫星^[2-5], 仅对单一指标计算仿真研究其在小服务区内的服务性能, 构型也比较常见, 而面向复杂条件下大区域多指标空基网络布局的研究尚不多见, 因此基于多指标大范围的伪卫星网络设计与研究显得尤为重要。在卫星星座设计中, 常用的方法是遗传算法^[6]。遗传算法具有鲁棒性强、适于并行处理, 能对全局进行优化的特点, 但由于编码精度和终止代数的限制, 优化结果与最优解之间可能存有一定的差距, 大范围寻优能力弱, 参数变量的取值范围不明确导致计算时间长, 而且

收稿日期: 2013-05-11; 修回日期: 2013-06-09

作者简介: 史海青(1987—), 男, 山东人, 硕士, 从事卫星导航、应用等领域的研究。

结果容易陷入局部最优；由于经验法^[7]具有直观、易行等优势，能通过逐次考虑单变量的变化对星座布局进行多参数多目标的研究，因此为了避免遗传算法存在的问题，可利用经验法缩小参数变量的取值范围，用以减小遗传算法的搜索范围。笔者以生活中蜂窝形状为例设计了新型的空基伪卫星构型，并把该构型以一定的方式组成伪卫星网络。为了得到优化的网络布局，笔者先用经验法粗略确定影响网络综合性能指标参数的取值，然后再用遗传算法对网络布局进行精优化。

1 平台组网指标与蜂窝波浪式网络构型

1.1 网络指标定义

伪卫星定位系统的原理与 GPS 类似，定位精度与伪卫星的空间结构密切相关。那么导航定位的误差方程组可以表示为

$$R - P = \mathbf{G}_u \cdot \mathbf{X}_u \quad (1)$$

式中， R 为用户至卫星 i ($1 \leq i \leq n$) 的几何距离；

$P = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$ 为用户至卫星 i 的观测伪距。

$$\mathbf{G}_u = \begin{bmatrix} -HE_{11} & -HE_{12} & -HE_{13} & 1 \\ -HE_{21} & -HE_{22} & -HE_{23} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -HE_{n1} & -HE_{n2} & -HE_{n3} & 1 \end{bmatrix}$$

式中， $(HE_{i1} HE_{i2} HE_{i3})$ 为用户至卫星 i 的方向余弦。 $\mathbf{X}_u = [\delta_x \ \delta_y \ \delta_z \ \delta_{ut}]$, $(\delta_x \ \delta_y \ \delta_z)$ 为位置修正数， δ_{ut} 为钟差引起的测距误差。

由此可得用户改正数的最小二乘为

$$\mathbf{X}_u = [\mathbf{G}_u^T \mathbf{G}_u]^{-1} \mathbf{G}_u^T [R - P] \quad (2)$$

则改正数的误差方差为

$$\text{cov}(\delta \mathbf{X}_u) = [\mathbf{G}_u^T \mathbf{G}_u]^{-1} \text{cov}[\delta(R - P)] [(\mathbf{G}_u^T \mathbf{G}_u)^{-1} \mathbf{G}_u^T]$$

设每颗卫星的测距误差相同，相互独立，零均值，方差为 δ^2 ，那么

$$\text{cov}(\delta \mathbf{X}_u) = [\mathbf{G}_u^T \mathbf{G}_u]^{-1} \delta^2$$

其中，

$$[\mathbf{G}_u^T \mathbf{G}_u]^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix}$$

则位置误差几何误差系数 PDOP 可表示为

$$\text{PDOP} = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}} \quad (3)$$

伪卫星平台组网的性能指标主要包括服务区域

的位置几何误差系数的均值、位置几何误差系数的离散度、位置几何误差系数的最大值及用户冗余度等，它们是网络构建的基本依据。笔者针对性地选取了前 4 个指标进行分析和优化，下面对选取的指标分别进行说明。

位置几何误差系数均值是伪卫星网络覆盖范围内所有用户 PDOP 的均值，该指标反映了整个网络定位性能的优劣，定义为

$$\text{PDOP}_j = \frac{\sum_{j=1}^n \text{PDOP}_j}{m} \quad (4)$$

式中： $j = 1, \dots, m$ ； m 个用户在服务区内均匀分布。

离散度 s 为所有用户 PDOP 的均方差，能够衡量伪卫星网络位置几何误差系数的波动程度，一般要求波动越小越好，从而保证覆盖区域内服务质量的稳定性，表达式为

$$s = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^n (\text{PDOP}_j - \text{PDOP}_j)^2} \quad (5)$$

位置几何误差系数最大值为所有用户 PDOP 的最大值，表达式为

$$\text{PDOP}_M = \text{PDOP}_j(\max) \quad (6)$$

K 为用户冗余度，网络设计时要求伪卫星网络服务区域内用户可视伪卫星数 N 必须大于等于 4 颗，即 $K \geq 0$ ，其中 $K = N - 4$ 。

为了消除各指标间量纲的影响，需要所有指标标准化，标准化方程为：

$$f_l = \frac{\Gamma_l}{4} \quad (7)$$

式中： Γ_l 表示第 l 个网络指标； f_l 为第 l 个指标标准化数值， $l = 1, 2, 3, 4$ 。

在分析的 4 个网络性能指标中，前 3 个指标的值越小越好，而冗余度降低会影响网络整体的性能，太高会增加平台耗，因此笔者利用遗传算法对网络布局进行合理优化。

1.2 伪卫星网络构型的提出

现存的伪卫星构型有很多，如正方形、长方形、五棱锥、蜂窝六边形等，笔者以正六边形蜂窝构型为例，在此基础上提出了蜂窝六棱锥伪卫星构型，该构型是由 2 种高度不同的伪卫星组成。初步分析表明该构型能实现一定区域的覆盖，PDOP 分布较为合理。为了得到广域的空基伪卫星网络，实现大区域的导航定位，由提出的六棱锥伪卫星构型顺次

组合得到，如图 1 所示，网络中 2 种高度不同的伪卫星呈现波浪起伏的状态，因此称其为蜂窝波浪式网络。

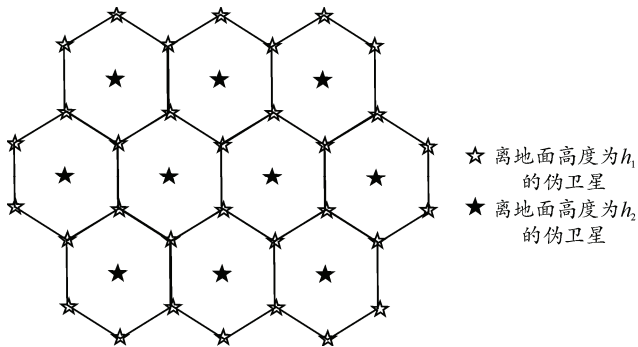


图 1 蜂窝波浪式网络

2 遗传算法网络优化方法

遗传算法^[8-11]起源于生物的遗传和变异，通过适者生存理论选择亲代优良基因遗传给子代。算法的实现涉及到它的 5 个基本要素：参数的编码、初始群体的设定及初始化、个体适应度函数的设计、遗传算子设计和遗传算法控制参数的设定。在遗传算法发展的过程中，算法的模式逐渐形成，由于遗传算法全局搜索能力弱，优化结果容易陷入局部最优，容易早熟。为了避免这些现象的发生，笔者先用经验法对影响网络性能参数进行粗略确定。

经验法的原理为：当研究网络综合性能时，让一个参数变化，保持其他参数不变，在满足空间网络性能指标要求的前提下，综合分析并优化得到网络设计参数值或其取值范围。针对文中的网络构型，影响其性能参数分别为伪卫星离地面的高度 h_1 、 h_2 及小六边形的边长 a 。基于网络综合性能优化指标，利用经验法就可以粗略确定参数 h_1 、 h_2 及 a 的取值范围。

文中蜂窝波浪式网络遗传算法优化可以通过图 2 完成。

结合图 2，遗传算法具体操作步骤如下：

步骤 1：确定优化变量并选择合适的编码方案，把待优化变量 h_1 、 h_2 及小六边形的边长 a 进行编码，并转化为染色体，对于文中选择二进制编码，易于实施编码、解码、交叉、变异等操作。

步骤 2：选择合适的遗传变异参数，包括遗传代数、初始种群个数及二进制编码位数等。

步骤 3：根据网络优化指标及网络性能约束条件，确定采用线性尺度规则变换得到新的适应度函数 F 。

步骤 4：根据遗传算法的规则生成个体数为 M

的初始种群，即

$$h_1 = \{h_{11}^1, h_{12}^2, \dots, h_{1M}^M\}, \quad h_2 = \{h_{21}^1, h_{22}^2, \dots, h_{2M}^M\},$$

$$a = \{a_{11}^1, a_{12}^2, \dots, a_{1M}^M\}$$

步骤 5：遗传算子^[12]根据网络构型进行设计，并对种群染色体进行选择、交叉和变异操作，选择、交叉、变异算子的取值均在 $[0,1]$ 之间。

步骤 6：计算个体的适应度函数及种群适应度函数，根据 Saaty 等人提出的 1~9 尺度^[13]求出影响网络各个指标的权重值 λ_i ，所有指标加权求和，以求和值作为遗传算法的目标函数 $f(h_1, h_2, a)$ ，值越小越好，把目标函数直接作为适应度函数 F_1 ，并把适应度函数按照线性尺度规则变换得到新的适应度函数 F ，即

$$F = C_1 \cdot F_1 + C_2 \tag{8}$$

式中： $F_1 = \sum_{i=1}^4 f_i \cdot \lambda_i$ ， $\sum_{i=1}^4 \lambda_i = 1$ ； C_1 、 C_2 为适应度线性尺度变换常数。

步骤 7：循环上述步骤，可以得到种群序列、个体序列及适应度函数序列，根据比例选择准则及网络性能约束条件不断的对种群选择、寻优，最后求解出最优的解。

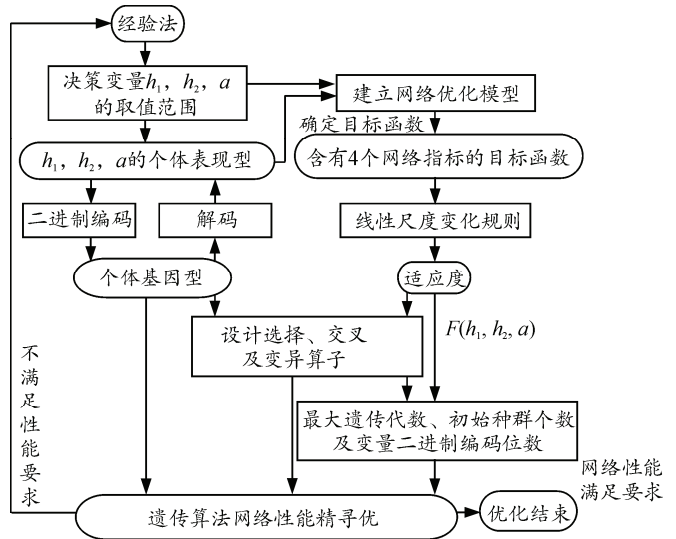


图 2 遗传算法流程

3 仿真、分析与验证

取 10 个六棱锥伪卫星构型组成网络如图 1，假设网络服务区中心位置为 $(118^\circ E, 32^\circ N)$ ，地球为均匀的球体，由于无人机飞行高度有限，因此设无人机伪卫星最大飞行高度为 20 km，地面接收仰角 $\geq 5^\circ$ ；遗传参数设置^[12]，选择概率为 0.9，交叉概率 0.7，变异概率 0.005，种群初始个数为 40，二进制

编码位数为 20，笔者根据网络结构特点设置最大遗传代数为 50；优化指标权重求解结果^[13]： λ_1 为 0.55， λ_2 为 0.15， λ_3 为 0.1， λ_4 为 0.2；用户在覆盖区域内均匀分布；适应度线性尺度变换常数 $C_1=C_2=1$ 。

为了弥补遗传算法的不足，笔者先用经验法对影响网络优化指标的参数进行粗略求取，在满足 PDOP 小于等于 6、用户接受仰角 $\geq 5^\circ$ 的条件下求得影响网络指标参数的取值为

$$\begin{cases} 16 \text{ km} \leq h_1 < 20 \text{ km} \\ 17 \text{ km} \leq h_2 \leq 20 \text{ km} \\ 85 \text{ km} \leq a \leq 95 \text{ km} \end{cases}$$

基于经验法参数变量的取值范围，运用遗传算法进行精寻优，优化结果如表 1 所示。

表 1 网络构型参数的优化结果

变量 h_1/km	变量 h_2/km	变量 a/km	覆盖范围/ km^2
17.043	19.970	90.704	约 24.2 万
17.109	19.968	91.031	约 24.2 万
17.523	19.993	92.969	约 24.3 万
17.399	19.832	90.693	约 24.2 万

因为遗传算法涉及生物的遗传和变异，因此参数变量的数值有所变化，根据表 1 数据，用各个参数的平均值作为最优参数，可以得出参数变量的取值为：

$$\begin{cases} h_1 = 17.269 \text{ km} \\ h_2 = 17.941 \text{ km} \\ a = 91.349 \text{ km} \end{cases}$$

根据参数取值，可得网络性能最优时对应的参数为此时位置误差系数及冗余度的分布如图 3。

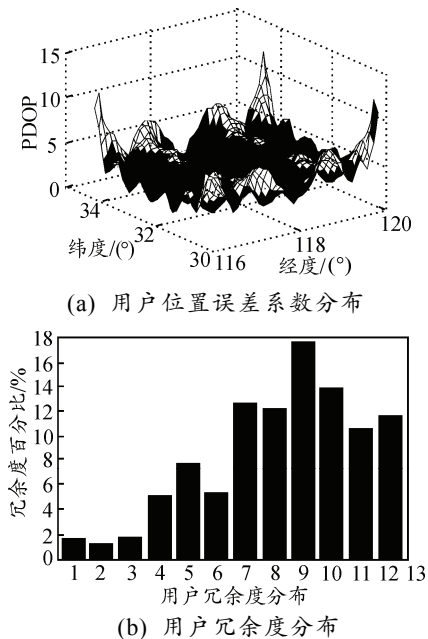
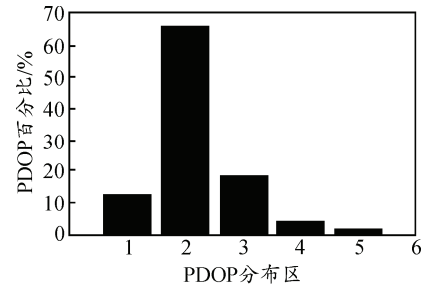
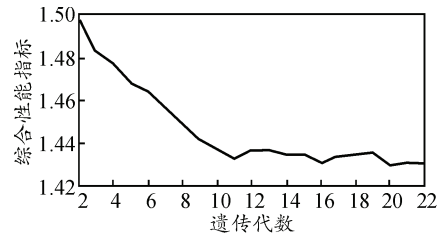


图 3 用户位置误差系数及冗余度分布

网络覆盖范围内用户 PDOP 各阶段的分布百分比及网络性能遗传算法跟踪如图 4(a)、4(b)所示， $1 < \text{PDOP} \leq 2$ 对应 0，1 表示 $2 < \text{PDOP} \leq 4$ ，2 表示 $4 < \text{PDOP} \leq 6$ ，3 表示 $6 < \text{PDOP} \leq 8$ ，4 表示 $\text{PDOP} \geq 8$ 。



(a) PDOP 各阶段百分比



(b) 网络优化性能跟踪

图 4 各个阶段 PDOP 的百分比及网络优化性能跟踪

根据仿真图 3(a)能够得出，最小 PDOP 为 1.326，位于网络覆盖区域的中心，最大为 10.933，位于网络服务区的 4 个角落处；由图 4(a)能够得到，PDOP 最大值的用户数量约占总数的 0.7%，对整个网络性能的影响极小；经计算得出 PDOP 均值为 3.287，方差为 1.262，如果不考虑 4 个角落的 PDOP，经计算得出剩余所有用户 PDOP 均值为 3.132，方差为 1.025。说明除 4 个角落外其他用户点的 PDOP 都是合理的。由仿真图 3(a)还能够得出，笔者设计的蜂窝波浪式空基伪卫星网络能覆盖的纬度区间约为 $[29.8^\circ N, 34.2^\circ N]$ ，覆盖的经度区间约为 $[115.8^\circ E, 120.2^\circ E]$ ，由 42 颗伪卫星组成，覆盖范围约 24.2 万 km^2 ，网络覆盖面积与平台总数的比值为 0.58 万 $\text{km}^2/\text{颗}$ ，说明网络能实现广域覆盖。

根据仿真图 3(b)能得出，在网络服务区边缘伪卫星最大冗余度为 5，而在 4 个角落里为 0，导致其 PDOP 偏大，与图 3(a)中 4 个角落 PDOP 最大相对应；冗余度最大为 11 出现在网络服务区的中心地带，与图 3(a)中心处出现最小 PDOP 相对应；冗余度结果说明了该网络构型完全可以保证网络覆盖区域内每一个服务点的可视伪卫星数 $N \geq 4$ ，在 4 个角落虽然满足了可视伪卫星数等于 4 颗，但是此处伪

卫星构型分布不好也是 PDOP 偏大的原因之一。

仿真图 4(a)表明: 在 1~2 之间的 PDOP 数约占总数的 12%, 在 2~4 之间的约为 67%, 在 4~6 之间的约为 18%, 整个网络覆盖范围内, 用户 PDOP 小于等于 6 的数量在 97% 以上; 说明网络覆盖范围内有 97% 以上的用户能得到较好的服务, 满足网络性能要求, 能保证服务区内 PDOP 的可用性。

如果利用遗传算法直接在相同条件下进行大区域网络寻优, 参数取值如下:

$$\begin{cases} 14 \text{ km} \leq h_1 < 20 \text{ km} \\ 14 \text{ km} \leq h_2 \leq 20 \text{ km} \\ 50 \text{ km} \leq a \leq 100 \text{ km} \end{cases}$$

寻优后的参数如表 2 所示。

表 2 直接用遗传算法对网络优化的参数结果

变量 h_1 /km	变量 h_2 /km	变量 a /km	覆盖范围/km ²
16.786	19.997	89.490	约 23.6 万
16.433	19.575	87.823	约 23.4 万

根据仿真数据得到优化参数指标数值及网络优化性能跟踪如图 5。

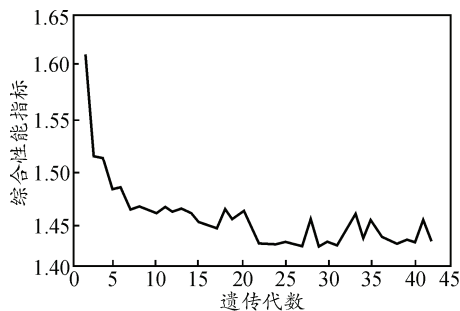


图 5 直接用遗传算法优化性能跟踪图

根据仿真图 4(b)能够看到, 优化代数超过 10 代后, 网络综合优化指标数值就稳定在 1.443 左右; 如果在大范围内直接用遗传算法对网络进行优化, 性能跟踪如图 5, 优化代数超过 22 代后, 才趋于稳定, 稳定值在 1.445 左右, 而且性能波动比图 4(b)大; 图 4(b)与图 5 相比, 后者优化代数是前者的 2 倍多, 优化时间也比前者的长, 而且最优解也不如前者的优; 以上数据能得出, 在保持精度相当的情况下前者比直接用遗传算法优化的效率高。

4 结论

针对多指标空基伪卫星网络布局的优化, 笔者基于生活中的蜂窝状结构提出了蜂窝波浪式伪卫星网络, 鉴于遗传算法存在的问题, 提出了先用经验法对网络构型参数的范围进行粗搜索, 再用遗传算法对网络复合优化指标在小范围内实现多参数精寻优的技术方法, 最后的仿真结果充分表明了该蜂窝波浪式空基伪卫星网络既能实现广域覆盖, 又能保证 PDOP 的可用性, 而且在保持精度相当的情况下比直接用遗传算法优化的效率高。

参考文献:

- [1] 史峰, 姚连璧. 伪卫星定位技术及其应用[J]. 地矿测绘, 2006, 22(3): 5-7.
- [2] Bradley W. Near-optimal low-thrust earth-mars trajectory via a genetic algorithm[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2005, 28(5): 1027-1031.
- [3] 李文华. 三星构型设计与时差定位精度研究[J]. 宇航学报, 2010, 12(3): 701-706.
- [4] 银炜, 张景伟. 基于北斗一代的区域导航星座的优化设计[J]. 兵工自动化, 2009, 28(8): 8-11.
- [5] 杨洋, 范丽, 董绪荣. IGSO 星座分析与优化设计[J]. 兵工自动化, 2008, 27(11): 53-55.
- [6] 王瑞, 马兴瑞, 李明. 采用遗传算法进行区域覆盖卫星星座优化设计[J]. 宇航学报, 2002(5): 24-28.
- [7] 帅平, 曲广吉. 基于半分析式方法的全球导航星座设计[J]. 中国空间科学技术, 2005, 23(8): 11-19.
- [8] 雷英杰, 等. 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 2-5.
- [9] Toshiaki T, Chris R, Wang J L, et al. A navigation/position service based on pseudolites installed on stratospheric airships[C]. Palm Beach: Sat Nav, 2001.
- [10] Wang J L, Toshiaki T, Chris R, et al. GPS and pseudosatellites integration for precise positioning[J]. Geometrics Research Australasia, 2001(2): 103-117.
- [11] Subbarao K, Shippey B M. Hybrid genetic algorithm collocation method for trajectory optimization[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2009, 32(4): 1396-1403.
- [12] 周明, 孙树东. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 58-60.
- [13] 施泉生. 运筹学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 242-248.