

通信星座弹性评估权值确定方法研究

汉京滨¹, 张雅声², 汤亚锋²

(1. 航天工程大学 研究生院, 北京 101416; 2. 航天工程大学, 北京 101416)

摘要: 太空环境日益复杂, 通信星座的全球覆盖、超视距通信等优势使其具有极高的存在必要性; 为保证通信任务的可靠性, 开展通信星座弹性评估研究, 为建设弹性通信星座提供参考; 针对通信星座弹性意义及特点, 构建通信星座弹性评估指标体系, 并对权重赋值问题进行分析, 确定数学模型; 针对层次分析法在判断矩阵一致性差时求解特征值困难的不足, 提出采用生物地理学优化算法求解权值问题; 通过对 BBO 算法中的迁移机制、迁移算子和突变机制进行改进, 实现了判断矩阵排序权值与一致性的统一; 并与基本 BBO 算法、GA 算法、GA-PSO 算法、AHP 算法进行比较验证, 结果表明改进 BBO 算法在收敛速度、优化精确性以及局部寻优能力方面较优; 随后, 采用改进 BBO 算法对通信星座弹性评估指标体系权值进行分析计算, 得出通信星座弹性评估指标体系权重, 可为后续通信星座弹性评估提供一定帮助。

关键词: 通信星座; 弹性评估; 判断矩阵; 权值确定; 改进 BBO 算法

Research on Method of Determining Weight of Communication Constellation's Resilience Assessment

Han Jingbin¹, Zhang Yasheng², Tang Yafeng²

(1. Department of Graduate Management, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: As the space environment becomes increasingly complex, the advantages of the global coverage and over-the-horizon communication of communication constellation make it extremely necessary. In order to ensure the reliability of communication tasks, the evaluation of communication constellation resilience is carried out to provide reference for building resilient communication constellation. According to the meaning and characteristics of communication constellation's resilience, an index system for evaluating communication constellation resilience is constructed, and the weight assignment problem is analyzed to determine the mathematical model. In order to solve the problem that analytic hierarchy process (AHP) is difficult to determine eigenvalues when the consistency of the matrix is poor, a Biogeography-Based Optimization Algorithm is used to solve the weight problem. By improving the migration mechanism, the migration operator and the mutation mechanism in the BBO algorithm, the unification of weights and consistency of the judgment matrix are achieved. The improved BBO algorithm is compared with the basic BBO algorithm, GA algorithm, GA-PSO algorithm, and AHP algorithm. The results show that the improved BBO algorithm is superior in convergence speed, optimization accuracy, and local search ability. Then, using the improved BBO algorithm to weight the indicator system, the communication constellation's resilience assessment weight system is obtained, which can provide some help for the subsequent resilience assessment of the satellite communication system.

Keywords: communication constellation; resilience assessment; judgment matrix; weight assignment; improved BBO algorithm

0 引言

太空的行动自由、全球覆盖、超视距侦查等优势, 为侦查、通信、导航定位提供了巨大的便利。强大的性能和优越的视野使得国防、商业、民用等领域都对太空资源产生强烈的依赖性, 太空资产失效所能产生的影响也越来越重大。

然而, 太空环境也随着技术发展和服务全球化变得越来越复杂, 太空碎片、电磁干扰以及破坏性甚至摧毁性的威胁不断增加, 太空资产的可靠性与可用性直接影响太空

能力的可靠性。为增强太空任务保证能力, 美国率先提出太空体系的“弹性”这一概念, 旨在通过优化体系结构, 增强太空资产抵御风险的能力以及快速恢复功能的能力。

卫星通信系统具有超视距的通信能力, 是国家和战略领导层获取态势感知并下达行动计划的重要工具, 也是战术机动部队和处于不利地位的用户进行信息沟通的关键渠道。对联合作战、信息支援都有十分重大的战略和战术意义。鉴于以上各项能力, 当前以及未来的发展需求要求通信星座必须保证能够在任何时候提供任务需要的通信能力。这就要求通信星座需要具备优良的弹性特征, 能够很好地应对可能面临的各类威胁。

开展通信星座弹性评估研究, 就是要研究衡量通信星座弹性优劣的标准。用科学合理的方法对其进行定量的评估, 分析当前或未来通信星座在弹性方面可能存在的缺陷或劣势, 并通过后续的优化措施, 增强通信星座的任务保

收稿日期: 2018-07-20; 修回日期: 2018-08-29。

作者简介: 汉京滨(1994-), 男, 黑龙江省佳木斯市人, 硕士研究生, 主要从事太空体系弹性方向的研究。

张雅声(1974-), 女, 安徽省淮南市人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事卫星星座设计与应用、空间安全等方向的研究。

证能力, 使之具备更好的应对各类威胁的能力。

在 2013 年国防工业协会 (NDIA) 弹性论坛上, 各工业部门及智库汇报了在太空体系弹性评估方面的研究成果, 提出各自的弹性评估方法。在美空军 2014 财年“太空弹性: 对能力与经济性平衡战略的研究”项目支持下, 美兰德公司提出非物质条件下的太空体系弹性评估方法, 并提出通过优化条令、培训、人员等方面实现弹性能力提升的建议方案^[1]。美国空军少尉 Turner 借鉴网络和电网模型建立通信系统模型, 提出基于混合整形变量和单调非线性连续的二次规划评估方法^[2]。

国内方面, 严晓芳等^[3]基于波音公司的评估方法, 针对太空系统的不同威胁场景的案例, 给出适应弹性的计算公式, 并进行相应案例仿真分析。潘星等^[4]通过分析不同的干扰事件和恢复策略, 建立基于重要度分析的体现弹性的优化模型, 分析了优化后的恢复策略对体系能力的影响。

1 问题分析

1.1 通信星座弹性评估指标体系

弹性这一概念的提出, 是为了确保太空资产的任务保证能力, 即抵御各类已知或未知威胁的能力, 主要实现方式为对其体系结构的优化设计。从需求角度出发, 可以判断该评估对于卫星本身的能力并没有进行过多的关注, 而是将主要的关注方向放在了更好的应对威胁方面, 即抵御风险的能力方面。

星座的安全防护能力由单一卫星的防护能力决定, 卫星是否安装调零天线、是否具备扩频调频功能、是否具备抗核加固能力等, 都将直接决定卫星的抗干扰、抗毁伤等能力, 也将直接影响卫星的安全防护能力, 从而影响了星座的安全防护能力。

通信星座弹性的优劣一方面体现在星座的安全防护能力方面, 另一方面也体现在星座本身的性能方面。例如, 当任务需求确定时, 卫星本身性能越高, 其所能承受的能力损失空间越大, 越能承受更强的威胁。

在通信星座效能评估研究方面, 国内外目前已有很多研究成果。结合许相莉^[5]等人研究成果的分析理解, 提出从信息传输能力、传输质量、适应能力、安全防护能力四个方面构建通信星座弹性评估指标体系, 如表 1。

1.2 权值问题的数学模型

准确衡量相对重要程度是进行权值确定的关键环节, 结果的准确与否将直接影响评估结果是否可信。权值确定常用的方法主要有特征值法、最小偏差法等。这些方法普遍存在精确度不高、一致性较差、权值较小时容易产生误差等问题^[6]。

随着近些年优化算法的快速发展, 考虑到传统算法的各项不足, 有学者提出采用非线性优化方法来处理判断矩阵的一致性。借助优化算法的寻优能力, 求解最佳权值。相关学者也进行了分析研究, 通过遗传算法、差分算法等优化算法成功解决权值问题, 但是在局部寻优和准确度方面还有待改进。

在使用优化算法求解权值问题前, 需要建立权值问题

表 1 通信星座弹性评估指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
通信星座弹性评估	安全防护能力	抗干扰
		抗摧毁
		抗截获
		信息保密
		安全认证
	适应能力	自适应性
		互操作性
	传输能力	覆盖
		容量
		传输速率
	传输质量	误码率
		接入与控制
		传输时延
掉话率		
最大用户数量		

的数学模型。首先根据评估指标关于评估对象的重要程度依照表 2 中的标度做两两比较, 对评估指标的相对重要程度做出判别, 获得判断矩阵 A 。

表 2 评估指标相对重要程度标度

标度	含义
1	表示两个指标 X_i 与 X_j 相比, X_i 与 X_j 同样重要
3	表示两个指标 X_i 与 X_j 相比, X_i 比 X_j 稍微重要
5	表示两个指标 X_i 与 X_j 相比, X_i 比 X_j 明显重要
7	表示两个指标 X_i 与 X_j 相比, X_i 比 X_j 强烈重要
9	表示两个指标 X_i 与 X_j 相比, X_i 比 X_j 极端重要
2, 4, 6, 8	介于以上两相邻状况的标度值
倒数	指标 X_i 与 X_j 相比得出判断 a_{ij} , 则 X_j 与 X_i 相比得出判断 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

a_{ij} 为第 i 个指标对第 j 个指标的相对重要程度的比值, ω_i/ω_j 为指标 i 的权 ω_i 和指标 j 的权 ω_j 的比值。可认为 a_{ij} 与 ω_i/ω_j 近似相等, 即判断矩阵 A 可表示为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \omega_1/\omega_1 & \omega_1/\omega_2 & \cdots & \omega_1/\omega_n \\ \omega_2/\omega_1 & \omega_2/\omega_2 & \cdots & \omega_2/\omega_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_n/\omega_1 & \omega_n/\omega_2 & \cdots & \omega_n/\omega_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

一般评估主体对 $a_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 的估计与两属性的权的比值 ω_i/ω_j 并不完全一致, 即 $a_{ij} \approx \omega_i/\omega_j$ 。因此应选择一组权值使其整体误差最小, 即判断矩阵的各要素单排序及其一致性检验问题可以归结为如下的非线性优化问题:

$$\min CIF(n) = \sum_{i=1}^n \left| \sum_{j=1}^n (a_{ij}\omega_j) - n\omega_i \right| / n \quad (2)$$

$$s. t. \omega_j > 0 (j = 1, 2, \dots, n), \sum_{j=1}^n \omega_j = 1$$

式中, $CIF(n)$ 为一致性指标函数; n 为判断矩阵的维数; $a_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 为判断矩阵元素; 单排序权值 $\omega_j (j = 1,$

2, ..., n) 为优化变量。

2 生物地理学优化算法

2.1 基本思想

生物地理学优化算法 (Biogeography-Based Optimization, BBO) 由美国克利夫兰州立大学学者 Dan Simon 于 2008 年提出。该算法采用生物地理学理论, 通过建立一定数量的栖息地, 模拟生物种群迁移、突变等现象来实现进化寻优^[7-8]。

生物地理学的数学模型囊括了物种形成 (新物种的演化)、栖息地间的物种迁移以及物种的灭绝等过程。该理论通过适宜性指数 (Habitat Suitability Index, HSI) 来体现一个栖息地的生存环境, 其高低取决于与栖息地相关的各类因素, 这些因素被称为适宜指数变量 (Suitability Index Variables, SIV), 例如降水、土壤成分、植被、气候等^[9]。

基本 BBO 算法具有收敛速率快、容易实现等优点, 但计算后期突变产生新个体普遍质量不高, 对于跳出局部最优解帮助不大, 易于出现“早熟”现象。因此本文在一些关键步骤上, 对其进行优化, 提出改进 BBO 算法。

2.2 关键步骤

2.2.1 迁移模型

基于麦克阿瑟和威尔逊的均衡理论, 可以得出物种迁移率与物种数量之间的迁移模型, 线性迁移模型如图 1 所示。

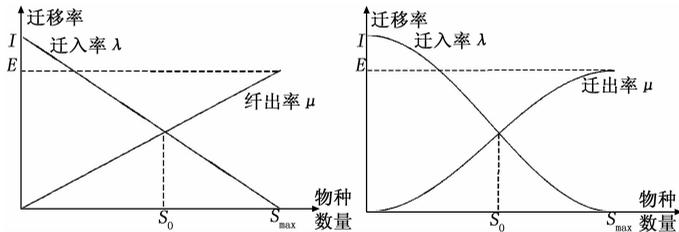


图 1 线性迁移模型

其中: S_0 为平衡物种数, S_{max} 为物种最大数量, I 为最大迁入率, E 为最大迁出率。

以公式的形式可表示为:

$$\lambda_i = I(1 - \frac{S_i}{S_{max}}) \quad (3)$$

$$\mu_i = E \frac{S_i}{S_{max}} \quad (4)$$

其中: S_i 为栖息地 i 的物种数量。

迁移模型的优化对寻优速度与精度都有一定的改善。线性迁移模型相对简单, 但其迁移过程与自然规律仍存在一定差距, 自然界中的许多数量变化都遵循非线性的 S 形, 因此尝试采用余弦模型模拟迁移过程。经对比发现, 更接近自然的余弦迁移模型实现效果相比线性迁移模型有一定的提升。余弦迁移模型如图 2 所示^[10]。

栖息地 X_i 的迁入率 λ 与迁出率 μ 分别为^[11]:

$$\lambda_i = \frac{I}{2} [1 + \cos(\frac{\pi S_i}{S_{max}})] \quad (5)$$

$$\mu_i = \frac{E}{2} [1 - \cos(\frac{\pi S_i}{S_{max}})] \quad (6)$$

2.2.2 迁移机制

迁移机制是 BBO 算法实现信息交换的主要环节, 因此迁移的有效性对于算法求解的精度与准确性都有一定的影响。较优的迁移算子能够改善算法的迁移性能, 使得较优的栖息地个体的信息能够通过优良的迁移算子得以保留, 从而推动种群中其他个体朝好的方向进化, 从而得出最优解。BBO 算法中的迁移机制主要有离散迁移和混合迁移两种。

离散迁移是将待迁出的栖息地个体 x_j 的 SIV 替换为随机选择待迁入的栖息地个体 z_i 的 SIV, 其数学模型为:

$$z_i(s) \leftarrow x_j(s) \quad (7)$$

这种算法可以发挥较优栖息地的优势, 引导整体进化趋势, 但这种进化方式容易导致物种单一, 缺乏多样性, 容易导致 HSI 过早收敛或提前停滞。

混合迁移是将待迁出和待迁入个体的 SIV 进行混合, 以此作为待迁入个体的新 SIV。在 GA 算法和 DE 算法的改进算法均有采用混合机制的尝试, 均对算法有一定的优化。其数学模型为:

$$z_i(s) \leftarrow \alpha z_i(s) + (1 - \alpha)x_j(s) \quad (8)$$

其中: α 为控制变量, $\alpha \in (0, 1)$ 。如果 α 取 0, 则是离散迁移。

2.2.3 突变机制

突变是 BBO 算法中的一个重要机制, 对于算法跳出局部最优以及种群的多样性有一定的帮助。基本 BBO 算法中选择随机生成新的 SIV, 以此取代原栖息地的 SIV。这种突变随机性比较大, 极易产生较差个体, 尤其是在算法的后期, 对结果的收敛速度与精度都会产生一定的影响。针对产生个体质量不高的现象, 采用 logistic 混沌突变机制, 通过生成局部最优个体周围的邻域点, 降低出现局部最优的可能^[12-13]。其数学模型为:

$$k_{g+1j} = \begin{cases} 4\omega k_{gj}(0.5 - k_{gj}), & 0 \leq k_{gj} < 0.5 \\ 4\omega(k_{gj} - 0.5)(1 - k_{gj}), & 0.5 \leq k_{gj} < 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$x_{ij} = (2 - 2k_{ij}) \times x_{ij} + (2k_{ij} - 1) \times x_{bestj} \quad (10)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, NP\}, j \in \{1, 2, \dots, D\}$$

其中: $k_{ij} \in (0, 1), j \in \{1, 2, \dots, D\}; x_{ij}$ 为新个体 x_i 的第 j 维 SIV; ω 为控制变量, 这里取 $\omega = 4; g$ 为迭代次数; x_{bestj} 为当前最好个体的第 j 维 SIV; NP 为个体数量。

2.2.4 一致性检验

求得排序权值最优解后, 还要对其进行一致性检验, 计算其一致性比例 CR, 检验判断矩阵的一致性是否可以接受。计算公式如下:

$$CR(n) = \frac{CIF(n)}{RCIF(n)} \quad (11)$$

平均随机一致性指标函数 $RCIF(n)$ 值^[14]见表 3。

表 3 判断矩阵平均随机一致性指标函数 $RCIF(n)$ 值

阶数	2	3	4	5	6	7	8	9
$RCIF(n)$	1.6	1.62	1.64	1.98	1.86	1.69	1.81	1.95

如表 2 所示, $RCIF(n)$ 值为随机构造 500 个样本矩阵, 计算 $CIF(n)$ 值并求其平均值。可见, $RCIF(n)$ 值均在 1.6~2.0 之间。当 $CR(n) < 0.10$ 时, 可以认为其一致

性符合要求。

2.3 算法流程

BBO 算法的主要流程为:

步骤 1: 初始化参数。设定最大迁入率 I 、最大迁出率 E 、物种最大数量 S_{max} 、突变概率 M 、初始种群 $P = \{x_i, i = 1, 2, \dots, NP\}$ 。

步骤 2: 计算每个栖息地个体 x_i 的栖息地适宜度指数 $f(x_i)$ ，并根据适宜度指数进行排序。

步骤 3: 判断是否满足终止条件。若满足，则进行步骤 9，不满足则进行步骤 4。

步骤 4: 判断是否满足迁移条件。若满足，则进行步骤 5，不满足则进行步骤 7。

步骤 5: 计算 x_i 对应的物种数量 S_i 、物种迁入率 λ_i 和物种迁出率 μ_i 。

步骤 6: 根据迁移算子改变种群 P 形成目标种群 P_1 ，计算种群 P_1 的适宜度指数并排序。

步骤 7: 判断是否满足突变条件。若满足，则根据 logistic 混沌突变机制进行物种突变操作，随后进行步骤 8；若不满足，则直接进行步骤 8。

步骤 8: 判断是否达到迭代次数。若满足，则进行步骤 9，不满足则进行步骤 2。

步骤 9: 得到最优解，判断其一致性。若满足，则进行步骤 10，不满足则进行步骤 1。

步骤 10: 输出最优解，结束。

操作流程如图 3 所示。

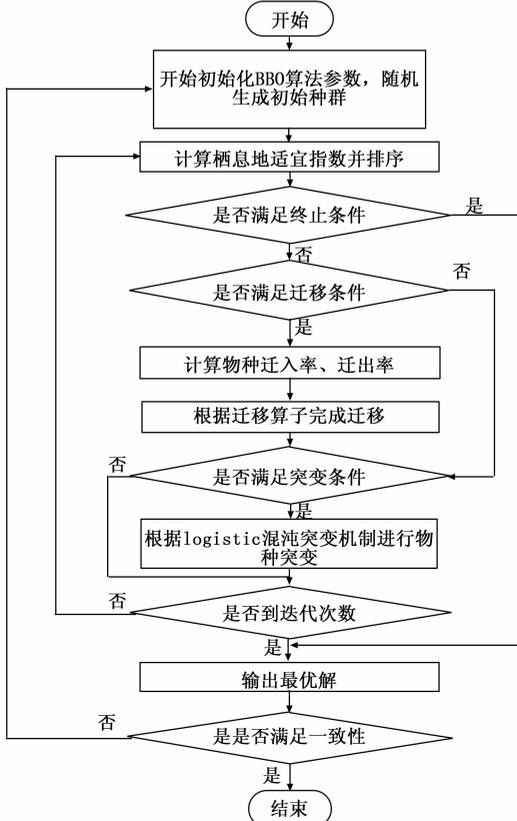


图 3 BBO 算法流程图

3 算法验证

在确定通信星座弹性评估权值前，需验证算法的有效性和准确性。首先将 BBO 算法与 AHP 算法、GA 算法、GA-PSO 算法、基本 BBO 算法进行比较。采用其中较优的优化算法对弹性评估指标体系赋值。算法选用的仿真环境为 Matlab 2010a。

首先根据评估指标体系构造判断矩阵。选取一组一致性指标函数 (CIF) 值为 0 的判断矩阵 A_1 ，和一组 CIF 值不为 0 的判断矩阵 A_2 ：

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

设置种群规模 $NP=20$ ，种群数量 50，进化代数 $G=50$ ，最大迁入率 $I=1$ ，最大迁出率 $E=1$ ，最大突变概率 $m_{max}=0.05$ 。

对判断矩阵 A_1 求解，得出排序权值如表 4 所示。

表 4 判断矩阵 A_1 排序权值比较

计算排序权值方法	判断矩阵	排序权值			一致性指标函数值
		W_1	W_2	W_3	
AHP	A_1	0.4	0.4	0.2	0
GA	A_1	0.4	0.4	0.2	3.50E-11
GA-PSO	A_1	0.40066	0.3994	0.19994	0.000912
基本 BBO	A_1	0.40117	0.39884	0.19999	0.0014682
改进 BBO	A_1	0.4	0.4	0.2	5.81E-13

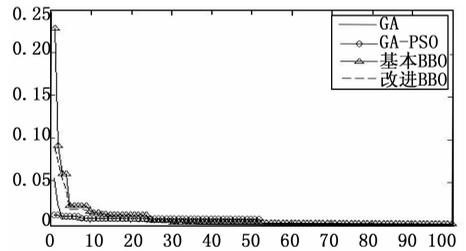


图 4 优化结果对比图

从表 4 以及图 4 中可以看出，当判断矩阵 CIF 值为 0 时，GA 算法和改进 BBO 计算出的排序权值与 AHP 算法计算出的排序权值基本相同，但 GA-PSO 算法与基本 BBO 算法计算出的结果有少许偏差。可见后两种算法在优化时对较优区域附近搜索能力不强，难以获得较精确的最优解。

对判断矩阵 A_2 求解，得出排序权值如表 5 所示。

表 5 判断矩阵 A_2 排序权值比较

计算排序权值方法	判断矩阵	排序权值				一致性指标函数值
		W_1	W_2	W_3	W_4	
AHP	A_2	0.52224	0.19983	0.07809	0.19983	0.014498
GA	A_2	0.52726	0.19832	0.07560	0.19881	0.003401
GA-PSO	A_2	0.52502	0.21011	0.07168	0.19319	0.044365
基本 BBO	A_2	0.52766	0.19825	0.07555	0.19853	0.0036543
改进 BBO	A_2	0.5283	0.19811	0.07547	0.19811	0.0033344

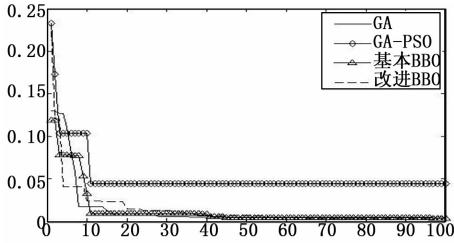


图 5 优化结果对比图

从表 5 以及图 5 中可以看出当 CIF 值不为 0 时, GA 算法、基本 BBO 算法、改进 BBO 算法得出的权值均与 AHP 算法大致相同, 仅 GA-PSO 算法得出结果有少许偏差。从精确性上看, 改进 BBO 算法优于其它 4 种算法。

由此可以得出以下几点:

1) 改进 BBO 算法发挥了 BBO 算法和 logistic 混沌映射思想对较优区域的附近区域搜索能力较强的优势, 降低了函数提前收敛和出现“早熟”现象的可能性。并对迁移操作以及迁移算子进行了改进, 使算法计算精度提升的同时, 确保了种群的多样性。同时, 当个别权重较小时, 避免了最小平方、最小偏差法等算法容易产生较大误差的不足。

2) 针对权重赋值问题, 将改进 BBO 算法与基本 BBO 算法、GA 算法、GA-PSO 算法进行了对比仿真计算。结果显示: 改进 BBO 算法在收敛速度与精度方面均优于其它算法, 展现了改进 BBO 算法在解决权重赋值问题方面的优势性。

4 通信星座弹性评估指标权值确定

根据前文建立的指标权重体系, 综合评价各指标对上一级指标的重要程度, 依照贡献度确定指标重要度判断矩阵。通过多名专家打分, 得出通信星座弹性评估指标体系权值见表 6。

表 6 通信星座弹性评估指标权值

	性能	权重	参数	权值	
卫星通信系统弹性评估	安全防护能力	0.54183	抗干扰	0.39782	
			抗摧毁	0.11053	
			抗截获	0.16388	
			信息保密	0.16388	
			安全认证	0.16389	
适应能力	0.16257	自适应性	0.75		
		互操作性	0.25		
传输能力	0.1478	覆盖	0.4603		
		容量	0.22097		
		传输速率	0.31873		
传输质量	0.1478		0.3868	误码率	
				接入与控制	0.21221
				传输时延	0.11944
				掉话率	0.21221
		最大用户数量	0.069339		

从表中可以看出:

1) 通信星座弹性能力, 主要为评估星座的体系结构的能力, 评估其能够在应对大部分威胁、不利条件时, 以较

高的概率满足任务所需能力。因此安全防护能力占据绝大部分的必中。

2) 由于通信卫星通常位于 GEO 轨道, 轨道高度较高以及轨道资源宝贵, 通信干扰、信息窃取等威胁手段发生可能性更高, 成本也相对较低。因此, 抗干扰性、抗截获性等指标为通信星座抵御威胁提供更大帮助, 占据更多的权重。

根据建立的指标权重体系, 可以对通信星座弹性展开评估, 分析当前通信星座与未来通信星座在弹性方面的优劣, 找出其薄弱环节, 为建设弹性天基通信体系提供参考。

参考文献:

- [1] Mcleod G, Nacouzi G, Dreyer P, et al. Enhancing space resilience through non-material means [R/OL]. http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR1100/RR1169/RAND_RR1169.pdf. 2016. [2017-03-24].
- [2] Turner J S. A Methodology For Measuring resilience in a satellite-based communication Network [R]. AIR Force Institute of Technology Wright-Patterson AFB OH graduate School of Engineering and Management, 2014.
- [3] 严晓芳, 饶玉柱. 太空系统的适应弹性研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9 (5): 458-462.
- [4] 潘星, 蒋卓, 杨艳京. 基于弹性的体系组件重要度及恢复策略 [J]. 北京航空航天大学学报, 2017 (9).
- [5] 许莉莉, 胡晓峰, 秦永刚. 基于“四域”的卫星通信系统效能评估指标体系 [J]. 指挥与控制学报, 2015, 1 (2): 220-222.
- [6] 评估理论和方法及其军事应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [7] Simon D. Biogeography-Based Optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12 (6): 702-713.
- [8] Dan S, Ergezer M, Du D, et al. Markov models for biogeography-based optimization [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B Cybernetics A Publication of the IEEE Systems Man & Cybernetics Society, 2011, 41 (1): 299-306.
- [9] 罗丹, 张宏立, 任甜甜, 等. 基于混合生物地理学算法的非线性系统辨识 [J]. 计算机仿真, 2015, 32 (1): 416-419.
- [10] Dan S. Evolutionary optimization algorithms. Biologically inspired and population-based approaches to computer intelligence [J]. Genetic Programming, 2013.
- [11] Khademi G, Mohammadi H, Dan S. Hybrid invasive weed/ biogeography-based optimization [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2017, 64: 213-231.
- [12] 毕晓君, 王珏, 李博. 基于混合生物地理学优化的多目标优化算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36 (1): 179-186.
- [13] 王珏. 生物地理学优化算法的研究及应用 [D]. 哈尔滨工程大学, 2013.
- [14] 金菊良, 魏一鸣, 付强, 等. 计算层次分析法中排序权值的加速遗传算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22 (11): 39-43.