

设最后划分得到 t 个类别, 显然有 $t \leq s$, 第 p 个类包含的专家配置有 h_p 个, 这个类包含的所有的配置方案, 可以用一个置信因子 T_p 来表示其重要程度. 那么有如下公式:

$$T_p = \frac{h_p}{s} \quad (3)$$

容量较大的类中包含的配置方案表达了较多人的意见, 对应的专家赋以较大的权重系数; 与之相反, 容量较小的类中的专家就赋以较小的权重. 假设专家 i 属于第 p 个类, 则 i 的权重系数 w_i 和专家 i 的置信因子 T_i 成正比, 其中 a 是比例系数

$$w_i = aT_i (T_i = T_p) \quad (4)$$

由式 (4) 推得:

$$w_i = \frac{T_i}{\sum_{j=1}^s T_j} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^s T_j = \sum_{q=1}^t h_q * T_q = \frac{\sum_{q=1}^t h_q^2}{s} \quad (6)$$

由 (3)、(5)、(6) 三式可得:

$$w_i = \frac{h_p}{\sum_{q=1}^t h_q^2} \quad (7)$$

由式 (7) 确定了各配置方案的权重, 然后通过加权平均法求得目标叶子节点映射关系的配置方案.

例: 针对图 4 指标体系中的卫星应用环境下的卫星用途节点的映射关系, 目前分为 5 种情况 (某用、国际组织、商用、政府和科研), 已有 7 名专家针对这 5 个阶段给出了自己的配置方案, 用向量表示如下:

$$\begin{cases} U_1 = (0.1, 0.1, 0.2, 0.2, 0.4)^T \\ U_2 = (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6)^T \\ U_3 = (0.1, 0.2, 0.2, 0.2, 0.4)^T \\ U_4 = (0.1, 0.2, 0.4, 0.4, 0.4)^T \\ U_5 = (0.1, 0.2, 0.6, 0.3, 0.4)^T \\ U_6 = (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5)^T \\ U_7 = (0.1, 0.3, 0.6, 0.3, 0.6)^T \end{cases}$$

采用系统聚类法, 由计算机可计算结果, 聚类分析结果如下:

$$\begin{cases} c(1, 2) = 0.981749 \\ c(1, 3) = 0.983282 \\ c(1, 4) = 0.942852 \\ c(1, 5) = 0.893188 \\ c(1, 6) = 0.978439 \\ c(1, 7) = 0.945691 \end{cases}$$

规定阈值 $T=0.97$, 最终聚为三类:

第 1 类: 有 4 位专家, 分别是: 1、2、3、6;

第 2 类: 有 2 位专家, 分别是: 4、7;

第 3 类: 有 1 位专家, 分别是: 5;

按照式 (7) 得到各位专家的权重分别是:

$$\begin{aligned} w_1 &= \frac{4}{21}; w_2 = \frac{4}{21}; w_3 = \frac{4}{21}; w_4 = \frac{2}{21}; \\ w_5 &= \frac{1}{21}; w_6 = \frac{4}{21}; w_7 = \frac{2}{21}; \end{aligned}$$

按照权重配置计算得到的卫星用途最终映射关系配置方案为:

某用: 0.1, 国际组织: 0.1905, 商用: 0.3143, 政府: 0.3095, 科研: 0.4762.

由结果来看, 通过聚类分析法对给出决策的专家们进行分类, 并以此为依据, 给各专家赋予一定的权重, 权重的大小表示了该专家在此项配置的影响力, 有效整合了所有专家的意见. 一方面, 这在指标体系柔性构建方面有重要意义, 另一方面, 综合了各专家意见, 评估结果会更加准确. 本文采用的层次聚类分析法, 不需要提前指定聚类数目, 通过设置阈值, 可以控制不同层次的聚类情况, 对评估算法的柔性化具有重要的支撑作用.

3.2 指标权重动态学习

指标权重计算采用层次分析法, 按其重要程度量化为 0-9 进行表述, 权重为 0 表示该指标不参与评估. 系统根据专家经验汇总拥有一套既定的指标权重方案, 另外, 系统还支持用户自主配置指标权重. 本文在指标权重支持自主配置的基础上, 进行了多指标权重的自适应学习. 用户也可以使用经过自主学习得到的权重方案, 经过学习得到的指标权重表述了大多数人的权重配置, 比起专家既定权重和用户自主配置权重两种方案, 降低了主观性, 使评估结果更加客观.

系统保存 n 个用户的权重配置, 针对指标体系中第 i 层的第 j 个节点 $a_{i,j}$ 有 n 个配比情况 $X_{a_{i,j}}$, 因为不同用户之间的配比互不影响, 所以配比 $X_{a_{i,j}}$ 是相互独立的, 且权重值围绕一个期望值 μ 分布在 0-9 之间, 即可认为 $X_{a_{i,j}}$ 是正态分布 (μ, σ^2) 的一个样本, σ 是 $X_{a_{i,j}}$ 的标准差. 所以可按照正态分布模型进行权重的自主学习, 正态分布的置信区间面积分布如图 5 所示^[12], 每条数据权重确定过程如下:

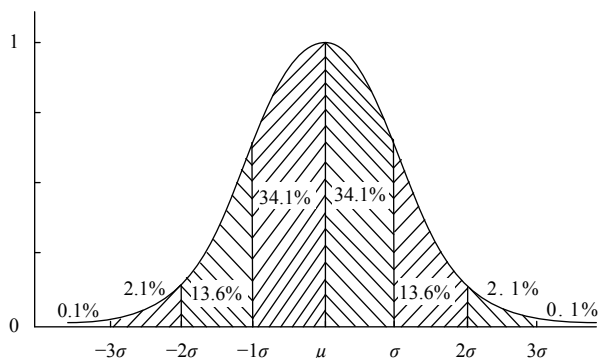


图5 正态分布区间面积图

x_k 是 $X_{a_i,j}$ 中的第 k 条数据, 按照正态分布, 如果 $ABS(x_k - \mu) \leq \sigma$, 权重 $w_k = 0.68$; 如果 $\sigma < ABS(x_k - \mu) \leq 2\sigma$, 则 $w_k = 0.27$; 如果 $2\sigma < ABS(x_k - \mu)$, 则 $w_k = 0.05$. 则最后的 $a_{i,j}$ 节点的权重学习结果为:

$$x_{a_{i,j}} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k * w_k}{\sum_{k=1}^n w_k} \quad (8)$$

例: 已知共有 20 位用户给出了图 4 中的卫星应用环境 (B1) 和卫星网络 (B2) 环境的权重配置, 在这两个节点的权重值如表 1, 其中, 用户不必关心所有节点配比和是否为 1, 当权重为 0 时, 此项指标不参与评估.

表 1 应用环境和网络环境节点权重汇总

用户	应用环境 (B1)	网络环境 (B2)
A	5	1
B	5	1
C	3	1
D	5	3
E	5	0
F	5	2
G	5	1
H	5	2
I	5	2
J	7	3
K	4	2
L	4	2
M	4	2
N	6	3
O	6	1
P	6	1
Q	6	2
R	7	0
S	2	4
T	3	3

根据前述方法针对这两个节点的指标权重进行自主学习, 得到两个节点的所有用户配置的期望: $A_{B1} = 4.9, A_{B2} = 1.8$. 标准差: $\sigma_{B1} = 1.26, \sigma_{B2} = 1.03$. 经

过学习得到的两节点权重分别为: $w_{B1} = 5.05, w_{B2} = 1.62$. 原始数据分布和结果如图 6.

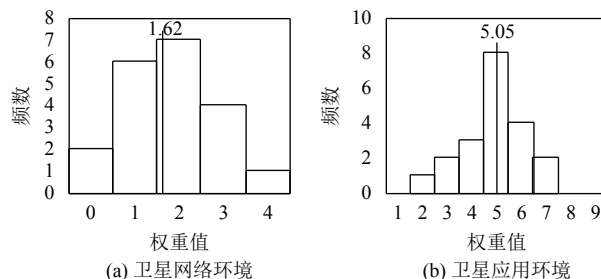


图6 权重自学习结果图

通过结果分析, 可以得到按照正态分布模型学习得到的权重能较好地表述绝大多数人的意见, 通过学习得到的权重可以较好地表述所有用户的权重配置趋势, 对科学地确定各指标节点权重具有重要意义. 总体而言, 本文提出的正态分布模型是一个主观假设, 实际情况下, 在样本数据较少的情况下, 存在假设太过主观的缺点, 但是针对个别恶意权重配置, 有很好的抵御能力. 在系统中, 用户可以选择默认权重、自行配比权重或系统学习权重, 选取最合适的权重进行评估是评估柔性化的重要体现.

4 实例验证

现计划在中国及周边上空的地球静止轨道上选择一个轨位, 发射一个通信卫星, 卫星频段选取常规通信频段 Ku, 考虑到覆盖区域, 计划在 120° 附近选择风险最小的位置, 默认调整步长为 1° , 选择 $115^\circ-125^\circ$ 轨位进行评估. 依据任务需求, 输入的评估任务如表 2.

表 2 通信卫星评估任务

属性	取值
轨位范围	$115^\circ E-125^\circ E$
协调弧	2°
频段类型	Ku
频段范围	10 000 MHz-12 000 MHz
占用带宽	50 MHz
链路方向	E(下行)
覆盖区	XVE
调整步长	1°

依据 GEO 卫星频轨选取风险柔性评估系统, 根据提示进行评估操作, 得到的结果如图 7 所示.

参评卫星基础数据		参评卫星网络基础数据		评估结果	
频段类型	轨位	卫星应用环境	卫星网络环境	频轨选取合理性评分	详情
Ku	115	0.2289	0.3435	0.2862	...
Ku	116	0	0.3413	0	...
Ku	117	0.2289	0.3434	0.2861	...
Ku	118	0.227	0.3467	0.2868	...
Ku	119	0.1932	0.3502	0.2717	...
Ku	120	0.1881	0.3434	0.2658	...
Ku	121	0.1898	0.3456	0.2677	...
Ku	122	0	0.3391	0	...
Ku	123	0.1864	0.3361	0.2612	...
Ku	124	0.1931	0.3402	0.2667	...
Ku	125	1	0.3589	0.6794	...

图7 通信卫星评估结果图

从结果来看,参评的卫星基础数据(在轨星)有4颗,评估任务中的116°和122°两个轨位的备选任务和轨星轨位发生冲突,所以直接将这两个方案否决,得分为0,125°轨位附近没有在轨卫星,卫星应用环境得分为满分1.参评的网络环境数据较多,任务轨位区间网络卫星分布多,协调难度大,所以卫星网络协调环境下的得分普遍较低.综合两个环境得分,125°轨位评估得分最高,协调风险最小.

针对评估结果进行原因分析,系统给出了分层评估结果对比和评估详情分析两种方法,分层结果对比

主要是对比不同频轨方案在同一层指标项上的得分情况.例如,选择第5层叶子节点,由于只有在轨星形势分析拥有第5层叶子节点,所以得分结果也只和在轨星基础数据有关,分层评估结果如表3.结果所示,轨位间隔得分为0的方案由于和在轨星轨位冲突,不适合作为备选轨位被一票否决,最终得分直接为0.得分为1的方案则表示此条方案附近没有在轨星分布,协调环境宽松.通过分层评估得分对比,分析各任务方案此层各指标节点得分情况,对找寻某一频轨方案得分高低原因有重要意义.

表3 第五层指标项评估得分表

频段类型	轨位	轨位间隔	波束覆盖	链路方向	当前轨位状态	频段类型	频谱重叠比例	极化类型	卫星用途	传统轨位	卫星状态
Ku	115	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8333	0.1	0.2	0.2	0.2
Ku	116	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8333	0.1	0.2	0.2	0.2
Ku	117	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8333	0.1	0.2	0.2	0.2
Ku	118	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5559	0.1	0.2	0.2	0.1667
Ku	119	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.001	0.1	0.2	0.2	0.1
Ku	120	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4172	0.1	0.2	0.2	0.1
Ku	121	0.075	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4172	0.1	0.2	0.2	0.1
Ku	123	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8333	0.1	0.2	0.2	0.1
Ku	124	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8333	0.1	0.2	0.2	0.1
Ku	125	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8333	0.1	0.2	0.2	0.1
Ku	126	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

频轨任务详情分析中,用户可选择单独的一个频轨方案进行详情分析,通过图形化的描述选定频轨方案的各节点得分情况,用户直观的分析哪些指标项主要影响了最终得分,在这里由于篇幅限制就不再给出系统截图.通过对评估结果的分析,用户更容易调整评

估需求,进行再评估,缩短了从评估任务收敛到可协调目标轨位的时间.

5 结束语

本文在 GEO 卫星频轨协调风险量化评估的基

基础上,实现了多用户的指标体系的柔性构建,包括指标权重的自学习和叶子指标项的柔性构建,根据对用户信息的收集分析,使评估算法更加科学,更具柔性化;根据频轨任务评估结果的特点,提出了针对分层指标和频轨任务的结果回溯,方便用户调整评估任务,更快收敛到目标轨位;开发了B/S架构下的柔性评估系统,并进行了实验案例验证了算法的有效性和系统的实用性。

本文研究的B/S架构评估系统,只需要在服务器上部署,便可以让用户访问网址进行评估工作,提升了工作效率,缩短了工作时间,扩大了数据处理规模,为GEO卫星频轨选取工作提供了有效的数据支持。

参考文献

- 1 刘畅,石会鹏,李伟. 卫星网络国际协调浅析. 2014全国无线及移动通信学术大会论文集. 沈阳,中国. 2014. 305-308.
- 2 梁斌,徐文福,李成,等. 地球静止轨道在轨服务技术研究现状与发展趋势. 宇航学报, 2010, 31(1): 1-13. [doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.01.001]
- 3 周鑫林,巩应奎,韩朝晖. 面向GEO卫星频轨协调风险的量化评估. 计算机仿真, 2018, 35(2): 410-416. [doi: 10.3969/j.issn.1006-9348.2018.02.088]
- 4 周鑫林. GEO卫星频轨协调风险量化评估技术研究[硕士学位论文]. 北京:中国科学院大学, 2017.
- 5 张杰. 效能评估方法研究. 北京:国防工业出版社, 2009. 35-70.
- 6 杜栋,庞庆华,吴炎. 现代综合评价方法与案例精选. 3版.北京:清华大学出版社, 2015.
- 7 毛志慧,王艳. 基于灰色模糊算法的机床产品制造系统能效评价方法. 计算机系统应用, 2016, 25(7): 1-7. [doi: 10.15888/j.cnki.csa.005328]
- 8 Sun CC. A performance evaluation model by integrating fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods. Expert Systems with Applications, 2010, 37(12): 7745-7754. [doi: 10.1016/j.eswa.2010.04.066]
- 9 蔺美青,高玉良,翁呈祥,等. 基于算子的武器系统效能柔性评估建模方法论. 第十三届中国系统仿真技术及其应学术会议论文集. 黄山,中国. 2011. 89-94.
- 10 刘一田,刘士进. 一种柔性Web展现框架模型. 计算机系统应用, 2013, 22(12): 155-159. [doi: 10.3969/j.issn.1003-3254.2013.12.030]
- 11 郭文明,相景丽,肖凯生. 群组AHP权重系数的确定. 华北工学院学报, 2000, 21(2): 110-113. [doi: 10.3969/j.issn.1673-3193.2000.02.005]
- 12 邵堃,罗飞,梅袅雄,等. 一种正态分布下的动态推荐信任模型. 软件学报, 2012, 23(12): 3130-3148.