

# 电磁环境监测传感器部署效率评估方法

徐英<sup>1</sup>, 周尚武<sup>2</sup>

(1.国防科技大学 电子对抗学院, 合肥 230037; 2.安徽新华学院, 合肥 230088)

**摘要:** **目的** 提升电磁环境的全域、精细化监测能力。**方法** 基于单个传感器监测能力和多个传感器协同监测效率, 建立相应的评估指标模型, 利用多属性决策方法将多指标量化为单一指标, 获得监测传感器部署效率评估结果。**结果** 以待评估方案与理想方案的贴近度作为部署效率评估指标, 建立了部署效率评估指标体系, 提出了基于逼近理想解排序法(TOPSIS)和网络分析法(ANP)的综合评估方法。**结论** 通过仿真验证了该方法的可行性和有效性, 为监测传感器部署方案优化和动态调度提供量化评估数据支撑。

**关键词:** 电磁环境监测; 部署效率; 优化部署; 综合评估

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.04.010

**中图分类号:** 000 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)04-0051-05

## Evaluation Method for Deployment Efficiency of Electromagnetic Environmental Monitoring Sensor

XU Ying<sup>1</sup>, ZHOU Shang-wu<sup>2</sup>

(1.Electronic Countermeasure College of National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;  
2.Anhui XinHua University, Hefei 230088, China)

**ABSTRACT: Objective** To improve the universe and refined monitoring capability of electromagnetic environment. **Methods** Based on the monitoring capability of single sensor and the collaborative monitoring efficiency of several sensors, corresponding evaluation indexes models were established to quantize multi-indexes into individual index with the multi-attribute decision-making method to obtain the deployment efficiency evaluation result of monitoring sensor. **Results** The evaluation index system of deployment efficiency was established based on the similarity degree between evaluation scheme and ideal scheme. And comprehensive evaluation method based on the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) and analytic network process (ANP) was proposed. **Conclusion** Feasibility and effectiveness of the method is validated by simulation. And the method can provide quantitative evaluation data support for monitoring equipment deployment scheme optimization and dynamic scheduling.

**KEY WORDS:** electromagnetic environmental monitoring; deployment efficiency; deployment optimization; comprehensive evaluation

电磁环境(频谱)监测通常采用多个监测传感器组网的方式实现, 监测传感器的部署多采用正三角形、正四边形或正六边形部署方法。在不考虑电波传播效应和地形环境的情况下, 正六边形部署方法效率

最高。在地形复杂的情况下, 单纯应用上述部署方法将导致所需监测设备数量多、监测覆盖盲区和冗余率直线上升等诸多问题。对不同部署方案及其优化方案的部署效率进行评估和比较, 是电磁环境监测传感器

收稿日期: 2017-10-30; 修订日期: 2017-11-25

基金项目: 国防科技项目基金(3603004), 安徽省教育厅自然科学基金(KJ2017A618)

作者简介: 徐英(1979—), 女, 山东沂南人, 博士, 主要研究方向为战场电磁环境及辅助决策。

优化部署和动态调度的前提。

监测传感器部署效率不仅取决于单个传感器的监测能力,还与多个传感器协同监测效率有关。葛云露等<sup>[1]</sup>提出以协同监测面积与监测任务区面积和监测设备的个数的比值作为部署效率指标,进行部署评估。这种单一指标的评估无法对监测传感器的部署效率进行全面、合理的评估。文中提出以单一传感器的监测能力、协同监测覆盖率和冗余率等多个指标建立监测传感器部署效率指标体系,利用多属性决策方法对部署方案的部署效率进行综合定量评估,给出部署效率的客观评估结果,确保了评估结果的合理性、可重用性和可比性。

## 1 指标体系

电磁环境监测分为区域监测和点目标监测两类。区域监测是指给定一个固定的监测目标区域,传感器节点能够监测该区域下所有的子区域,其目的是为了实现对监测区域的最大化覆盖,适用于火灾预警、气候预测和安全生产等。点目标监测是为了对(离散的)重点目标点进行监测,在这些目标点附近部署监测传感器节点,其目的是让每个目标能够被至少一个监测传感器节点覆盖,且监测传感器数量越少越好。

监测传感器的部署效率与监测传感器网络能够覆盖监测的区域或重点目标数有关,还与达成监测任务所需的传感器个数有关。一方面,覆盖监测的区域或目标数越接近监测任务越好;另一方面,监测传感器的数量越少、利用率越高越好,即由于传感器监测区域重合而导致的冗余越小越好。基于此,在建立监测传感器监测效率指标体系时,主要从单个监测传感器监测能力和多个传感器协同监测效率两个方面来综合考查。

### 1.1 单个监测传感器监测能力模型

对区域监测,单个监测传感器的监测能力用监测传感器所能覆盖监测的区域范围来衡量,以监测传感器的最大监测距离和监测区域为指标。对于点目标监测,还可以引入可监测目标数作为监测能力参数。

1) 监测距离。当不考虑地形的影响时,电磁波在自由空间传播,监测传感器的最大监测距离  $D$  可表示为:

$$D = 10 \frac{P_t + G_t + G_r - 32.45 - 20 \lg f - S}{20} \quad (1)$$

式中:  $S$  为监测传感器的电磁敏感度;  $P_t$  为辐射源等效辐射功率;  $G_t$  为发射天线增益;  $G_r$  为接收天线增益;  $d$  为传播距离, km;  $f$  为辐射源信号频率, MHz。

对于复杂地形,需要考虑地形对电波传播的影响,此时路径上的电磁损耗  $L(d)$  与距离  $d$  有关,最大监测距离可以通过迭代法<sup>[1]</sup>求得,在此不再赘述。

2) 监测区域。最大监测距离描述了监测传感器在某个传播方向上的监测能力,而监测区域描述的是监测传感器在空间上的整体监测能力。将水平方位空间划分为多个子空间,分别求出相应的最大监测距离所对应的位置点,将所有最大监测位置点按方位顺序连接起来,形成的封闭区域即为监测传感器的水平监测区域。如果再考虑俯仰方向的空间划分,则可以获得三维立体的监测区域。相应的,监测区域的大小可以用监测区域的面积(二维)或体积(三维)来衡量。

3) 监测目标数。对于点目标监测,当被监测目标位置确定时,不同位置的监测传感器能够监测到的目标数目不同,对应的监测能力也会有所区别。当目标在监测传感器的监测区域内时,认为该目标能够被监测。统计监测传感器监测区域内所有能够被监测的目标个数,即为该监测传感器的监测目标数。

### 1.2 多个监测传感器协同监测效率模型

多个监测传感器的协同监测能力可以用多个监测传感器协同部署时所能覆盖监测的区域范围来衡量,以协同监测区域为指标。此外,协同监测区域的形状与实际需要监测的区域并不可能完全重合,为了避免监测盲区,引入协同监测覆盖率和协同监测冗余率作为协同监测能力的衡量指标。

1) 协同监测区域。设单个监测传感器的监测区域为  $M_i$ , 不同监测传感器的监测区域可能会有重合,因此协同监测区域应为所有监测传感器可监测区域的并集集合,协同监测区域面积  $M$  可以表示为:

$$M = \text{Area} \left( \bigcup_{i=1}^k M_i \right) \quad (2)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, k$ ,  $k$  为部署的监测传感器个数。

2) 协同监测目标数。设第  $i$  个监测传感器的可监测目标数为  $N_i$ , 监测目标集合为  $P_i = \{P_1, P_2, \dots, P_{N_i}\}$ 。不同监测传感器可以监测的目标可能会有重合,因此协同监测目标数应为所有监测传感器可监测目标集的并集集合,协同监测目标数  $N$  可以表示为:

$$N = \text{Count} \left( \bigcup_{i=1}^k P_i \right) \quad (3)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, k$ ,  $k$  为部署的监测传感器个数。

3) 协同监测覆盖率。监测传感器部署优化的目的是用最少的监测站实现最大的监测覆盖率。对于区域监测,多个监测传感器协同监测覆盖率  $H$  由式(4)确定:

$$H = \frac{M}{X} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $X$  为监测任务区域总面积。

对于点目标监测,多个监测传感器协同监测覆盖率  $H$  由式(5)确定:

$$H = \frac{N}{W} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $W$  为目标总数。

4) 协同监测冗余率。为了提高监测传感器的利用率, 需要尽量避免监测传感器的监测区域之间有较大的重合, 即要求协同监测的冗余率较小。对于区域监测, 多个监测传感器协同监测的冗余率定义为协同监测重复区域和协同监测区域的比值, 由式 (6) 计算得到:

$$C = \left( \frac{\text{Area} \left( \bigcap_{i=1}^k M_i \right)}{M} \right) \times 100\% \quad (6)$$

对于点目标检测, 多个传感器协同监测冗余率定义为:

$$C = \left( \frac{\text{Count} \left( \bigcap_{i=1}^k P_i \right)}{N} \right) \times 100\% \quad (7)$$

综上所述, 对监测传感器部署效率的评估是对多个监测传感器协同监测的部署效率进行综合评估, 需要考虑多方面的影响因素, 评估指标体系可分解, 如图 1 所示。

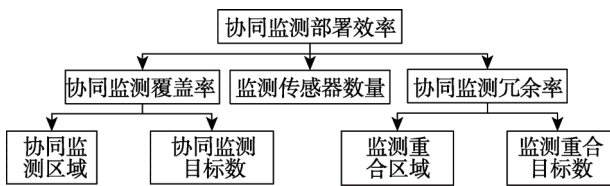


图 1 监测传感器网络监测效率评估指标体系分解

## 2 综合评估方法

监测传感器监测效率综合评估指标体系中, 对部署效率起关键影响作用的指标是协同监测覆盖率、协同监测冗余率和监测传感器数量, 各指标和参数间存在复杂的相互关系, 如图 2 所示。

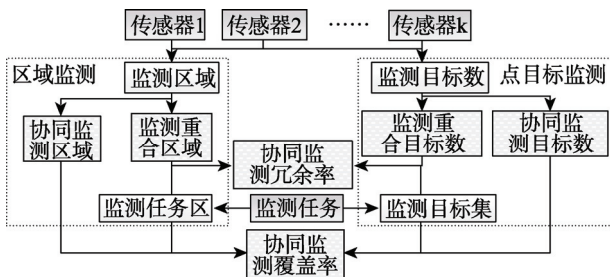


图 2 监测传感器网络监测效率评估指标关系

由于对监测传感器监测效率的评价属于小样本评价范畴, 且各个指标之间存在错综复杂的相互关系, 因此采用基于 ANP 的多属性指标赋权算法和改进的 Topsis 算法<sup>[2]</sup>综合评估监测传感器的部署效率, 通过集结算子将多个指标值合成<sup>[2]</sup>为一个综合评估

的部署效率指标。

定义监测传感器部署效率为待评估的部署方案与理想部署方案的综合贴近度。根据多属性决策方法<sup>[3-4]</sup>和综合评估理论<sup>[5-6]</sup>, 构造监测传感器部署效率  $SR$  模型为:

$$SR = f(\bar{w}, \bar{Q}) \quad (8)$$

式中： $\bar{w}$  为非负归一化的指标加权向量； $\bar{Q}$  为待评估的监测传感器部署方案中的指标数据集； $f$  为数据集结算子。 $SR$  为多属性数据集结后得到的单属性值, 其值在 0~1 之间, 值越大说明该方案的部署效率越好。

1) 基于改进 Topsis 算法确定正负理想点。Topsis 方法通过测度各指标与理想点 (值) 之间的距离, 给出待评估方案与理想方案的贴近度, 贴近度越大说明该方案的综合性能越优。同时考虑到电磁环境监测传感器网络是具有复杂指标集的系统, 各指标对部署效率的影响属于多准则决策的范畴, 应用中往往需要对不同的方案或是某一方案的多次改进进行比较和评估, 必须保证特定方案的评估结果在不同的评估对象序列中保持一致的评价值, 即保证评估结果是可重用的。采用基于历史数据库样本统计的广义理想点搜索方法<sup>[8]</sup>确定正负理想点, 最优方案为各监测传感器协同监测区域与监测任务区刚好重合, 监测覆盖率为 1, 监测重合率为 0, 且所用监测传感器数量最少, 此时对应的指标为正理想点, 反之对应的指标为负理想点。

2) 基于 ANP 算法的指标赋权。通过 ANP 方法进行多属性指标的赋权。设有指标集合  $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ , 其中  $x_1, x_2, x_3$  分别对应指标: 协同监测覆盖率、协同监测重合率和监测传感器个数。对所有指标进行两两比较, 比较两者对监测传感器部署效率的影响大小, 结合 Satty“1~9”比较标度法<sup>[9]</sup>, 建立成对比较判断矩阵<sup>[10]</sup>和相应的归一化特征向量<sup>[6]</sup>, 得到指标加权向量  $\bar{w}$ 。

3) 计算贴近度。设某方案的子指标向量 (决策向量) 为  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_i, q_n)$ , 正负理想点向量分别为:

$$\bar{Q}^+ = (q_1^+, q_2^+, \dots, q_i^+, \dots, q_n^+) \quad (9)$$

$$\bar{Q}^- = (q_1^-, q_2^-, \dots, q_i^-, \dots, q_n^-) \quad (10)$$

构造其归一化向量分别为:

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n) \quad (11)$$

$$\bar{Y}^+ = (y_1^+, y_2^+, \dots, y_i^+, \dots, y_n^+) \quad (12)$$

$$\bar{Y}^- = (y_1^-, y_2^-, \dots, y_i^-, \dots, y_n^-) \quad (13)$$

其中当  $q_i$  为望大型指标时:

$$y_i = \begin{cases} \frac{q_i - q_i^-}{q_i^+ - q_i^-}, & \text{当 } q_i \text{ 为望大型指标} \\ \frac{q_i^- - q_i}{q_i^- - q_i^+}, & \text{当 } q_i \text{ 为望小型指标} \\ y_i = \frac{D_i - |q_i - \alpha|}{D}, & \text{当 } q_i \text{ 为望适中型指标, 评估者最满意的值为 } \alpha \end{cases} \quad (14)$$

定义评估方案与正、负理想点的欧几里德加权距离为：

$$S^- = \sqrt{\sum_i^n [(y_i - y_i^-)^2 \times w_i^2]} \quad (15)$$

$$S^+ = \sqrt{\sum_i^n [(y_i - y_i^+)^2 \times w_i^2]} \quad (16)$$

则监测传感器部署效率，即部署方案与理想方案的贴进度为：

$$SR = \frac{S^-}{S^+ + S^-} \quad (17)$$

SR 为 0~1 之间的无量纲量，其数值大小表征了该部署方案部署效率的优劣程度，值越大，部署方案越优。

### 3 试验仿真

设有 6 个待评估部署方案，首先获得部署方案中的监测传感器个数，并依据前述模型计算部署方案单个传感器的监测能力和多个传感器的协同监测效率，得到协同监测覆盖率和冗余率指标，见表 1。

1) 根据各个指标的特点确定正负理想点，构造最优方案和最劣方案，见表 1。

2) 构造归一化判断矩阵，计算权值向量，获得各指标在指标体系中所占的权重。

基于比较标度法构造判断矩阵为：

$$WS_{11} = WS_{22} = WS_{33} = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 5 \\ 1/7 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中： $WS_{ij}=0, i \neq j$ 。

归一化判断矩阵，得到权值向量  $\bar{w}$ ：

$$w = \begin{bmatrix} 0.7134 \\ 0.1866 \\ 0.1000 \end{bmatrix} \quad (19)$$

4) 数据规范化处理。不同评估指标之间存在量纲不统一、绝对数值参照不同等问题，通过无量纲化和归一化处理，对不同指标进行规范化处理，可增加综合指标的可比性。为了方便模型计算处理，采用区间值法进行归一化处理，即使用该指标最大值和最小值限制的区间范围进行归一化处理：

$$x_1 = \frac{x_0 - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (20)$$

式中： $x_0$  为待处理指标数据； $x_{\max}$  为该指标最大值； $x_{\min}$  为该指标最小值； $x_1$  为归一化指标数据。

将表 1 中的监测传感器个数指标值进行归一化，由于监测传感器网络中同时工作的传感器越少越好，属望小型指标，归一化处理结果见表 2。

5) 计算指标与正负理想点的欧几里德加权距离，给出与最优方案的贴进度（即部署效率），见表 3。

由计算结果可知，方案 5 的部署效率最大，为最优监测传感器部署方案，评估结论与专家评估结果一致。此外，将该方法用于对方案在不同频段的监测效果进行评估比较，结合不同频段的重要程度进一步计算贴进度，还可以在不同频段上对方案进行更为细致的评估。

### 4 结语

电磁环境监测是实施频谱管控的重要前提，高效率的监测传感器部署方案是提升电磁环境感知能力的基础。对监测传感器的部署效率进行综合评估，能够为监测传感器部署方案的制定和优化提供客观定量的评估方法，有助于提高监测传感器部署的效率和动态调度的自动化程度，促进电磁环境的全域、精细化感知。

表 1 单项指标及正负理想点

待评估方案编号	1	2	3	4	5	6	最劣方案 (负理想点)	最优方案 (正理想点)
协同监测覆盖率	0.5	0.7	0.3	0.75	0.9	0.6	0	1
协同监测冗余率	0.2	0.35	0.1	0.4	0.3	0.4	1	0
监测传感器个数	3	5	2	5	6	4	11	1

表 2 指标归一化处理结果

待评估方案编号	1	2	3	4	5	6	负(-)理想点	正(+)理想点
协同监测覆盖率	0.5	0.7	0.3	0.75	0.9	0.6	0	1
协同监测冗余率	0.2	0.35	0.1	0.4	0.3	0.4	1	0
归一化监测传感器个数	0.2	0.4	0.1	0.4	0.5	0.3	1	0

表 3 加权距离和贴适度计算结果

$j$	$S_j^-$	$S_j^+$	$SR_j$
1	0.394 9	0.359 2	0.523 671
2	0.517 4	0.227 3	0.694 776
3	0.286 5	0.499 8	0.364 365
4	0.549 9	0.197 4	0.735 849
5	0.657 1	0.103 0	0.864 492
6	0.447 9	0.296 5	0.601 693

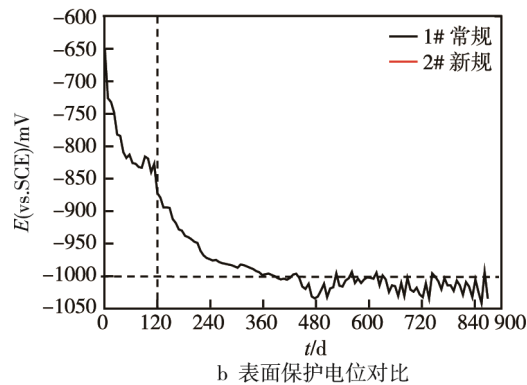
参考文献：

- [1] 葛云露, 董俊, 姬生云, 等. 电磁频谱监测设备部署优化算法[J]. 电波科学学报, 2014, 29(2): 353-357.
- [2] 周尚武, 徐英. 一种装备战场电磁兼容性综合评估方法[J]. 装备环境工程, 2017, 14(4): 16-20.
- [3] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 何美丽, 刘浪, 王宏伟. 基于集对分析的工程评标未知权重多属性决策[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10): 4057-4062.
- [5] 夏冰, 潘磊, 孙飞显, 等. 多元数据融合和层次分析的评估模型[J]. 计算机工程, 2010, 36(9): 153-155.
- [6] 李博. 多指标综合评价方法应用中存在的问题与对策[J]. 沈阳工程学院学报(社会科学版), 2010, 6(2): 200-202.
- [7] 郭亚军. 综合评价理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [8] 田锦. 通信系统电磁兼容指标构建与综合评估技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [9] SAATY T L. Decision Making with Dependence and Feedback[M]. RWS Publication Pittsburgh, PA, 1996.
- [10] 王莲芬. 网络分析法(ANP)的理论与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(3): 44-50.

### 勘误

由于审读和校对的失误，2018 年第 3 期刊出现一处错误，现向文章作者及广大读者致歉，并更正如下：

2018 年第 3 期第 16 页中图 3b 原为：



更正为：

