

## 一种电磁环境复杂度快速评估方法

王伦文<sup>①②</sup> 孙伟<sup>③</sup> 潘高峰<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(通信系统信息控制技术国家级重点实验室 嘉兴 314033)

<sup>②</sup>(解放军电子工程学院 309 研究室 合肥 230037)

<sup>③</sup>(总参 54 所 北京 100083)

**摘要:** 该文提出了一种适合重要区域电磁环境复杂度快速评估方法。首先论证并选择了适合快速评估的指标集;其次基于构造型神经网络对搜索接收机截获数据挖掘,发现异动信号,计算异动信号率并作为评估指标,体现了个体电台信号对复杂度的影响;最后采用自适应神经模糊推理系统对电磁环境复杂度进行了评估。实际数据对以上方法进行了验证,结果表明这些方法是有效的。

**关键词:** 无线通信;电磁环境复杂度;异动信号;构造型神经网络;模糊推理系统

**中图分类号:** TN92; TP18

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2010)12-2942-06

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2010.00063

## An Evaluating Quickly Method for Electromagnetic Environment Complexity

Wang Lun-wen<sup>①②</sup> Sun Wei<sup>③</sup> Pan Gao-feng<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(National Lab of Information Control Technology for Communication System, Jiaxing 314033, China)

<sup>②</sup>(309 Research Room, Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China)

<sup>③</sup>(54 Research Institute of the General Staff, Beijing, 100083, China)

**Abstract:** In this paper, a quick electromagnetic environment complexity evaluation method suited for important area is presented. Firstly, the index set suitable for quick evaluation is discussed and chosen; Secondly, the searching data is deeply mined to try to find abnormal signal, which consider the contribution of individual signals to the complexity; Finally, adaptive neuro-fuzzy inference system is trained and used to evaluate the complexity. The experimental results show that the evaluation model is valid.

**Key words:** Wireless communication; Electromagnetic environment complexity; Abnormal signal; Constructive neural networks; Fuzzy inference system

### 1 引言

随着无线电通信设备的大量使用,电磁环境日益复杂,对复杂电磁环境问题的研究成为热点。电磁环境复杂度<sup>[1]</sup>是指在有限的时空里,一定的频段上多种电磁信号密集、交叠的程度,目前有限的频谱资源与无限增长的无线通信存在着尖锐的矛盾,对电磁环境复杂度的研究价值凸现。快速评估复杂度在民用上有利加强对频谱资源实时监督和动态管理,在军事上能够快速估计战场电磁态势,判断电磁威胁等级。

常见的电磁环境复杂度检测方法是统计某区域、某频段和某时段内,时域、空域、频域、能量

域和调制域等方面的特征,通过一定模型估计复杂度<sup>[2]</sup>。文献[1]和文献[2]对战场电磁环境进行分类,选取频谱占用度、时间占用度、空间覆盖率和平均功率密度谱作为复杂度评估指标,并以此划定电磁环境复杂度等级。这种方法评估一般场合电磁环境复杂度尚可,但评估战场等重要区域则不妥,因为它只根据统计值来评估,忽视了少数重要信号的影响。如果采用这种方法评估,那么大城市的电磁环境可能比战场的还要复杂得多。

文献[3]基于作战效能采用模糊综合评价方法估计电磁环境复杂度,文献[4]将层次分析法运用于电磁环境复杂度的评估,它们对文献[2]进行了改善,把调制域参数作为评估指标,但不能快速计算电磁环境复杂度,由于调制域参数必须对个体信号调制样式分析才能得到,而个体信号数量大,所以,这种方法速度慢。

2010-01-19 收到, 2010-05-06 改回

国家自然科学基金(60675031)资助课题

通信作者: 王伦文 wanglunwen@163.com

所有信号对电磁环境复杂度都有影响,不同信号对复杂度贡献不一样,重要区域少数异常活动的信号对复杂度影响很大,而时域、空域、频域、能量域的统计特征可能对复杂度影响不一定大。因此,本文基于搜索接收机截获数据(简称搜索数据)选择可以快速获得的评估指数,剔除调制域参数为评估指数,增加异动信号率为一个重要评估指标,采用自适应神经模糊推理系统(ANFIS)对电磁环境复杂度评估。

论文第 2 节讨论了电磁环境复杂度评估的参数选择和异动信号发现<sup>[5]</sup>方法,第 3 节研究评估模型,第 4 节给出一个评估实例,验证算法。

## 2 评估参数与异动信号发现方法

影响电磁环境复杂度的参数较多,人们主要从时域、空域、频域、能量域和调制域考虑,为了快速获取电磁环境复杂度,必须及时获得评估参数,目前时域、空域、频域、能量域参数通过搜索数据可以实时提取,但是,调制域参数必须对所有信号进行调制样式分析才能得到,所以不可能实时获得。虽然信号的调制样式一定程度上反映了电磁环境的复杂程度,但无法快速得到,不能作为指标。

以上方法对复杂度评估主要从统计特征出发,没有考虑个体电台的影响,实际上电磁环境是所有个体辐射源贡献的总和。在估计电磁环境时,个体信号发挥重要的作用,比如:估计战场电磁环境时,往往把敌方威胁信号和可疑信号数量作为重要的因素;在估计机场等重要场所电磁环境时,把一些违规信号、异常信号作为评估指标。一些变化异常的信号往往具备较高的威胁等级,或是违规电台信号,或是敌方通信信号,集中地反映了电磁环境激烈冲突的程度。在估计电磁环境时只考虑统计特征是不够的,正因如此,把异常信号率作为电磁环境评估重要指标。参考文献[1]构建评估指标集为:  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7\}$ , 其中,  $u_1$  为异动信号率;  $u_2$  为大信号率;  $u_3$  为时间占有度;  $u_4$  为空间覆盖率;  $u_5$  为信道占用度;  $u_6$  为平均功率谱密度;  $u_7$  为背景噪声强度。其中  $u_2$  至  $u_7$  在文献[1]有过详细的描述。

$u_1$  是异动信号率 AS, 是指有异动信号的信道数  $AS_n$  同评估带宽内信道数  $F_n$  的比值。

$$AS = AS_n / F_n \quad (1)$$

异动信号是指某信号在时间、能量和频率上发生异常变化的信号,它反映了被观察区域内电台异常活动情况,异动信号率的大小很大程度上反映了电磁环境冲突的激烈程度。异动信号可以从搜索数据中挖掘获得,异动信号率可以快速获取。但是,

无线电通信信号由于受到噪声、多径效应等因素影响,异动信号率不容易提取。特别是在复杂环境下,直接从搜索数据中提取很困难,必须对数据进行预处理,文献[5]采用构造型神经网络和商空间理论进行不同粒度聚类,具体情况不再详述,这里研究基于时幅关联比较法的异动信号检测问题。

时幅关联比较法的基本思路是在采用基于构造型神经网络对前期  $n_0$ (一般取 2, 3)周期的训练样本进行聚类分析的基础上,统计提取常规通信电台活动的时间和幅度规律,并将其作为模本。测试时,把测试样本的同模本进行比较,检测是否异动信号。这种方法主要借助于常规通信电台在活动时间和信号幅度上相对稳定的特性。下面通过图形分两种情况讨论。

首先介绍时幅关联比较法在单周期异动信号实时检测中的思路。测试数据与同信道前一周期模本值比较,若差值超过门限判为异常信号,否则还是常规信号。如图 1 所示,在 2 维直角坐标系中,我们以某一频率的测试样本在某一时刻的信号幅度作为  $P$  点的  $x$  坐标,把对应模本在同一时刻的幅度作为  $P$  点的  $y$  坐标,则如果两信号相等,即  $x=y$ ,那么  $P$  点位于  $y=x$  直线上;考虑允许误差等因素,我们设定距离直线  $y=x$  位于  $d$  的两条直线  $l_1, l_2$  内部,则认为测试样本正常,否则即为异常。

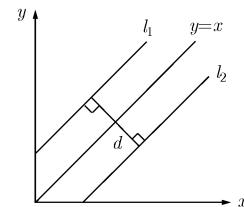


图 1 允许误差范围

其次介绍时幅关联比较法在多周期异动信号快速检测中的思路。这种情况下,我们把 2 维空间推广到  $n$  维空间,相应的 2 维平面点到直线的距离就变为  $n$  维空间点到直线的距离。如图 2 所示,将待分析的  $n$  周期的数据样本用构造型神经网络聚类处理,从其中选取  $n_0$  周期作为训练样本提取模本。然后,从  $n$  周期数据样本抽取每周期  $t$  时刻的信号幅度值组成  $n$  维空间中的点  $A_t = (p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n)^T$ ,模本  $t$  时刻的幅度值  $q$  组成  $n$  维空间中的点  $B_t = (q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n)^T$ ,其中  $q_1 = q_2 = \dots = q_n = q$ ,由此可知  $B_t$  位于过原点的直线  $l$  上。

由几何知识,已知空间点  $A_t = (p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n)^T$  和直线  $l$  上点  $B_t = (q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n)^T$  可得  $n$  维空间点到直

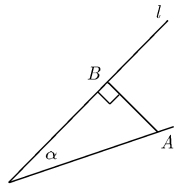


图 2 点到直线距离

线的距离公式。

$$d' = \sqrt{|A^T A|} \sin \alpha = \sqrt{|A^T A|} \sqrt{1 - \left( \frac{A^T B}{\sqrt{|A^T A|} \sqrt{|B^T B|}} \right)^2}$$

$$= \sqrt{|A^T A| - \frac{(A^T B)^2}{|B^T B|}} \quad (2)$$

本例中设定阈值  $d$ ，当  $d' < d$  判断信号活动正常，当  $d' > d$  判断它为异常。

总之，以上通过训练样本学习得到信号活动规律的模本，将训练样本与测试样本映射到 2 维或多维空间，计算他们之间的欧氏距离，根据距离大小发现异动信号。

图 3 是 2009 年 3 月 22 日至 24 日频率为 15726 kHz 信号的时幅图，图 3 (a) 为原始时幅图，图 3 (b) 为经预处理时幅图。以前两天数据为训练样本，能得到信号活动规律的模本，以第 3 三天数据为测试样本，采用时幅关联比较法，能判断该信号为异动信号，椭圆内频谱为异动点。

图 4 为 2009 年 3 月 22 日至 24 日, 15 至 16 MHz 频段内频率占用度图，其中横轴代表时间，以天为单位，纵轴代表频率，以 MHz 为单位，图中点的虚实代表该点对应的时间和频率上信号的有无。从该图中直接发现异动信号比较困难，采用构造型神经网络聚类后，得到图 5 所示频率占用度图，以前两

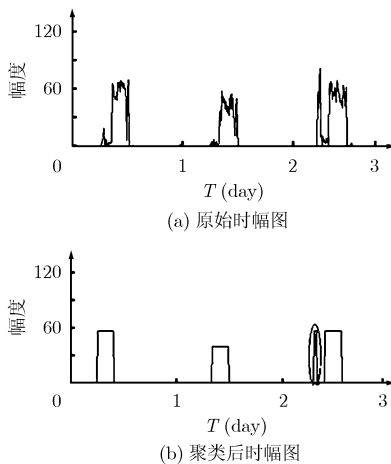


图 3 15726 kHz 信号 3 天时幅图

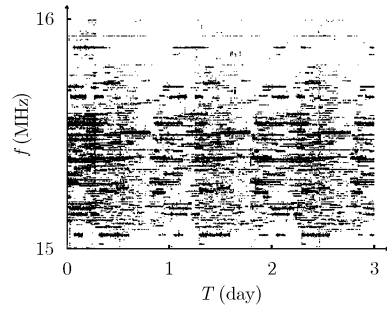


图 4 15~16 MHz 原始频率占用度图

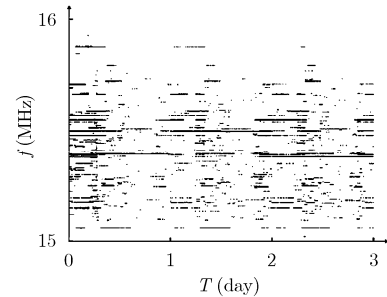


图 5 15~16 MHz 预处理后频率占用度图

天数据为训练样本，经处理可以得到图 6 所示的模本，以第 3 三天数据为测试样本，可以得到图 7 所示的异动信号，经统计可以得到异动信号率。

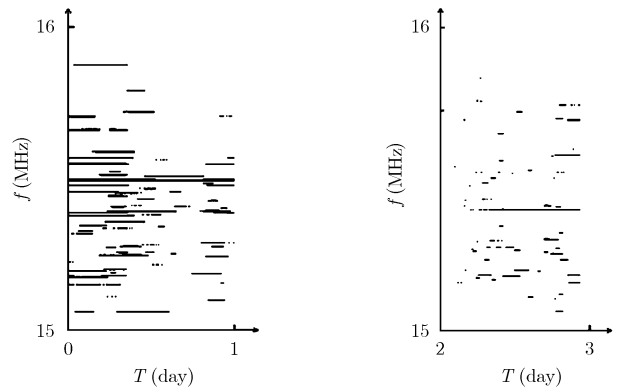


图 6 模本的频率占用度图

图 7 异动信号频率占用度图

### 3 基于 ANFIS 的复杂度评估

模糊推理系统的结构非常适合表示人的定性或模糊的经验和知识，但本身不具备自学习功能，对专家经验的过分依赖。神经网络能够自学习，具有自适应能力。两者结合，构成神经模糊系统，既具备人工神经网络自适应学习的功能，又具备模糊控制描述和处理模糊信息、进行判断和决策的功能<sup>[6,7]</sup>。

ANFIS 的网络结构<sup>[8]</sup>如图 8，是一个改进的前馈直觉模糊神经网络，可分为 5 层，每层物理意义明确，且模型计算简单，精度高，收敛速度快。其

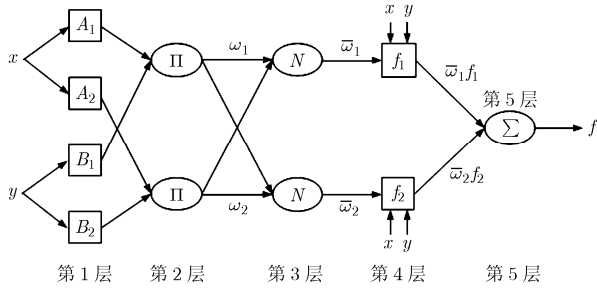


图 8 自适应神经直觉模糊推理系统结构图

中节点间的连线表示信号流向，方形节点表示带有可调参数的节点，圆形节点表示不带有可调参数的节点。假定 ANFIS 有两个输入  $x$  和  $y$ ，单输出为  $f$ ，对于 1 阶 Sugeno 模糊推理系统，对应的规则形式如下

规则 1: If  $x$  为  $A_1$  and  $y$  为  $B_1$  then  $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$ ,

规则 2: If  $x$  为  $A_2$  and  $y$  为  $B_2$  then  $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$ 。

其中  $x$ (或  $y$ )为节点  $i$  的输入语言变量(如信道占用度、时间占用度等);  $A_i$ (或  $B_i$ )是与该节点函数值相关的语言变量值(如大、小), 分别为  $\langle x, \mu_{A_i}, \gamma_{A_i} \rangle$ ,  $x \in X$  和  $\langle y, \mu_{B_i}, \gamma_{B_i} \rangle$ ,  $y \in Y$ ,  $f_i$  为后件输出,  $p_i$  和  $q_i$  为结论参数。由此可见, 规则中其前提部分是模糊的, 而结论部分是确定的, 即输出为各输入变量的线性组合。各层的功能表述如下。

第 1 层的作用是将输入变量模糊化, 每个神经元的输出应该是相应的隶属函数和非隶属度函数的合成真值<sup>[6]</sup>, 该层的每个节点的输出函数为

$$O_{1,i} = T(P_{A_i}) = \mu_{A_i}(x) + \frac{1}{2} \pi_{A_i}(x), \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

$$O_{1,i} = T(P_{B_{(i-2)}}) = \mu_{B_{(i-2)}}(x) + \frac{1}{2} \pi_{B_{(i-2)}}(x), \quad i = 3, 4 \quad (4)$$

其中, 隶属度函数  $\mu_A(x)$ (或  $\mu_B(y)$ )是任意合适的参数化隶属函数, 常选高斯函数。

为了简化起见, 令直觉指数  $\pi_A(x) = 0$ , 则非隶属度函数为

$$\gamma_A(x) = 1 - e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

式中  $\sigma$  和  $c$  为函数的参数(也称前提参数), 分别代表宽度和中心。需要指出, 上述简化条件的设置是合理的。因为当直觉指数  $\pi_A(x) = 0$  时, 非隶属度函数  $\gamma_A(x)$  的反制作用或形成的反对程度最强。在此情形下, 如果得到的结论是可信的、有效的, 那么当直觉指数  $\pi_A(x) > 0$  时, 亦即非隶属度函数  $\gamma_A(x)$  的反制作用或形成的反对程度减弱时, 所得到结果的可信度将会更高、更有效。当  $\pi_A(x) = 0$  时, 该层每个节

点的输出函数为

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \quad i = 1, 2; \quad O_{1,i} = \mu_{B_{(i-2)}}(y), \quad i = 3, 4$$

第 2 层的节点都为固定节点, 用  $\pi$  表示, 其中每个节点表示一条模糊规则, 它的作用是用来匹配模糊规则的前件, 计算出每条规则的适应度, 一般使用乘积算法, 输出表达式为

$$O_{2,i} = \omega_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

第 3 层的节点也为固定节点, 用  $N$  表示, 其作用是对各规则的适应度进行归一化运算, 第  $i$  个节点的计算输出为

$$O_{3,i} = \bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2}, \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

第 4 层计算出归一化的适应度下对应每一规则的后件输出, 表示 ANFIS 基于直觉模糊测度的输出语言变量的语言值, 每个神经元节点表达一个真值函数, 每个神经元的输出为相应的隶属度函数与非隶属度函数的合成真值。该层节点均为自适应节点, 对每条规则进行计算, 第  $i$  个节点的输出为

$$O_{4,i} = \bar{\omega}_i f_i = \bar{\omega}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

其中  $\bar{\omega}_i$  是第 3 层输出的归一化适用度。  $\{p_i, q_i, r_i\}$  是模糊规则后件的参数集合, 称为规则后件参数。

第 5 层的作用是解模糊化, 得到精确输出值。该层的单节点是一个固定节点, 计算所有输入信号的总输出, 采用加权平均解模糊方法, 总的输出为

$$O_5 = \sum_i \bar{\omega}_i f_i = \frac{\sum_i \omega_i f_i}{\sum_i \omega_i} \quad (9)$$

从 ANFIS 网络模型的输入输出可看出, 网络的学习是对前提参数和结论参数的调整。ANFIS 的建模主要结构辨识和参数辨识。ANFIS 结构辨识最核心的内容是输入空间的划分, 文中采用基于减法聚类的 ANFIS 评估电磁环境的复杂度。

## 4 实验分析与结论

实验分成数据截获、模型建立和测试评估 3 个阶段。数据截获时, 在某地域选择 9 个有代表性的地点, 假定该地域为正方形地域, 可选择九宫格中每个方格的中心为采集地点。每个地点设置一台短波搜索接收机, 使其在 15 MHz 至 16 MHz 频段内截获搜索数据, 作为实验数据, 图 4 是其中一台短波搜索接收机截获数据的频率占用度图。

模型构建时, 将前面一半数据作为训练数据, 后面一半作为测试数据。首先, 对训练样本进行减法聚类, 可以确定模糊规则和隶属度函数的个数, 并生成 ANFIS 的初始模型。本实验先取聚类中心在各数据维上的影响范围, 得到输入、输出向量的 4 个聚类中心, 即 ANFIS 的 4 条初始模糊规则。然后,

将训练样本输入初始 ANFIS 模型, 通过学习, 能够有效地计算出隶属度函数的最佳参数, 使得最终的 ANFIS 模型能够最好地模拟出希望的或是实际的输入输出关系。根据模型输出值的大小可将电磁环境分为一般、轻度复杂、中度复杂和重度复杂电磁环境 4 个等级。训练得到 ANFIS 网络如图 9 所示。

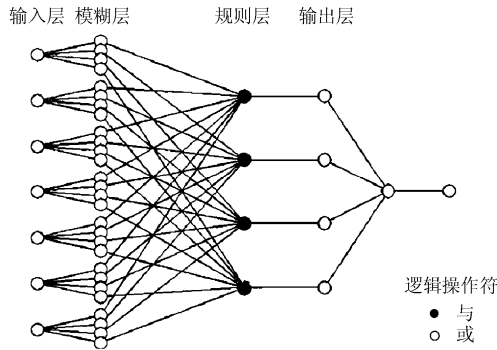


图 9 ANFIS 模型结构图

测试评估时, 将各短波接收机截获的实验数据按照频率划分为 3 个测试评估频段, 分别为 15.00~15.30 MHz, 15.30~15.60 MHz, 15.60~15.90 MHz。以每个频段测试数据为评估对象, 验证评估模型的有效性。在测试前要计算异动信号率等 7 个输入指标集。如表 1 所示, 将 3 个评估对象的 7 个指标分别作为 ANFIS 模型的输入, 模型的输出即为评估对象的复杂度。其中, 功率密度和背景信号强度为规范化的功率值, 取最大值为 100。

表 1 没把调制样式作为评估指标, 任何一个评估波段内都包含几十个信号, 提取每个信号的调制样式时间开销太大。如果考虑调制样式, 势必降低评估速度。

根据文献[1]和表 1 复杂度值可知: 波段 1 为轻度复杂电磁环境, 波段 2 为中度复杂电磁环境, 波段 3 为一般电磁环境。这与专家评估结果一致。从表 1 还可以看出: 异动信号率对电磁环境复杂度影响比较大, 这表明异动信号率作为评估指标是合理的。

电磁环境复杂度评估是当前研究热点, 但是只有快速、科学评估才能发挥最大效益。本文系统研究了复杂度快速评估方法, 根据复杂电磁环境需求和研究现状, 构造了快速评估复杂度的指标集, 剔除调制域参数指标, 提出将异动信号率作为一个重要的指标, 科学地评估复杂度; 提出了基于搜索数据的异动信号发现方法, 对预处理后的搜索数据进行挖掘, 检测了异动信号; 采用了基于 ANFIS 的复杂电磁环境评估方法, 该方法采用减法聚类确定自适应模糊神经网络的结构, 采用混合学习算法对参数进行训练, 克服了收敛速度慢、训练时间长和局部极小值等问题; 设计复杂度评估方案, 采集实际数据实现了电磁环境复杂度动态评估, 实验结果表明以上方法是有效的。该方法适合对战场、机场和重大活动区域的电磁环境复杂度评估, 能为无线电监督和管理提供依据。

表 1 电磁环境复杂度评估指标与结果数据表

评估对象 (MHz)	异动信号率	大信号率	时间占有度	空间覆盖率	信道占用度	平均功率谱密度	背景噪声强度	复杂度值
波段 1	0.17	0.13	0.0782	0.222	0.12	2.82	0.64	0.275
波段 2	0.21	0.27	0.1447	0.444	0.28	5.73	1.288	0.589
波段 3	0.08	0.03	0.029	0.111	0.04	1.13	0.15	0.110

## 参 考 文 献

- [1] 尹成友. 国军标 GJB 6520-2008, 战场电磁环境分类与分级方法[S]. 北京, 2008, 6.  
Yin Cheng-you. GJB 6520-2008, Classification and gradation methods for battlefield electromagnetic environment [S]. Beijing, 2008, 6.
- [2] 尹成友. 战场电磁环境分类与复杂性评估研究[J]. 信息对抗学术, 2007, 25(4): 4-6.  
Yin Cheng-you. Classification of battlefield electromagnetic environment and complexity evaluation [J]. *Journal of Information Countermeasure*, 2007, 25(4): 4-6.
- [3] 张笑韩, 余静. 基于作战效能影响的电磁环境复杂度评价方法[J]. 信息对抗学术, 2008, 26(2): 58-60.  
Zhang Xiao-han and Yu Jing. Electromagnetic environment complexity evaluation based on operational effectiveness [J]. *Journal of Information Countermeasure*, 2008, 26(2): 58-60.
- [4] 董志勇, 栗强. 基于层次分析法的人为电磁环境复杂程度评估[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(5): 106-109.  
Dong Zhi-yong and Li Qiang. The research of artificial electromagnetic environment complexity evaluation based on hierarchy analysis method [J]. *Journal of Command Control and Simulation*, 2008, 30(5): 106-109.

- [5] Wang Lun-wen, Tan Ying, and Zhang Ling. A data mining method based on constructive neural networks [J]. *Journal of Electronics (China)*, 2007, 24(1): 133-137.
- [6] 王坚强. 模糊多准则决策方法研究综述[J]. *控制与决策*, 2008, 23(6): 601-606.  
Wang Jian-qiang. Overview on fuzzy multi-criteria decision-making approach [J]. *Control and Decision*, 2008, 23(6): 601-606.
- [7] 张进, 陈东锋. 直觉模糊综合评判在目标识别中的应用[J]. *吉林大学学报*, 2009, 27(4): 407-410.  
Zhang Jin and Chen Dong-feng. Target recognition based on intuitionistic fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Journal of Jilin University*, 2009, 27(4): 407-410.
- [8] 夏博龄, 贺正洪, 雷英杰. 直觉模糊近似推理中的可信度传播 [J]. *计算机工程与应用*. 2009, 45(15): 160-162.  
Xia Bo-ling, He Zheng-hong, and Lei Ying-jie. Confidence factors spreading in intuitionistic fuzzy approximate reasoning [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(15): 160-162.
- 王伦文: 男, 1966 年生, 副教授, 从事通信与信息处理、计算智能等研究方向.
- 孙 伟: 男, 1966 年生, 高级工程师, 从事通信与信息处理、智能信息处理等研究方向.
- 潘高峰: 男, 1963 年生, 高级工程师, 从事通信与信息处理、数据挖掘等研究方向.