

基于自适应级联模糊推理的调制识别算法

陈筱倩 王宏远

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘要 针对非平稳的数字调制信号,构造新的高阶交叉累量特征;利用神经网络的学习机制实现自适应模糊推理调制识别器的非线性动态建模;采取分层决策的级联结构,提高了特征与识别器的契合度,最大程度上减少了隶属度函数和模糊规则的冗余;根据特征样本的大致分布建立蕴涵初始经验的级联模糊神经网络系统,使知识推理结构明确可控;通过样本训练实现结构参数自适应调整和优化,完成其逼近求精。仿真实验证明,该系统在信噪比等环境参数变化较大的情况下具有更好的稳健性,其算法识别率和效率相对于神经网络识别器和模糊识别器有明显提高。

关键词 调制识别,级联模糊神经网络,高阶交叉累量,模糊推理,自适应

中图分类号 TN971.1 **文献标识码** A

Adaptive Hierarchical Fuzzy Inference-based Modulation Recognition Algorithm

CHEN Xiao-qian WANG Hong-yuan

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract For the non-stationary digitally modulated signal a novel feature: High Order Cross Cumulant (HOCC) was proposed. The non-linear dynamic modeling of an adaptive fuzzy modulation classifier, which based on the training mechanism within the neural network, was first presented. The model adopted the hierarchical decision-based structure, which made the features match the classifier and reduced the redundancy of the membership functions and fuzzy rules. According to the distribution of the feature samples, we established the Hierarchical Fuzzy Neural Network System (HFNNS) with initial experience to guarantee the controllability of the knowledge inference structure. By applying the training data, the algorithm adaptively adjusted and optimized the structure parameter and completed the approximation process. The simulation results verified the better robustness of the system in the presence of various environment parameters (SNR etc), as well as the improvement of the average probability of correct classification and the algorithm efficiency, compared with the neural network classifier and fuzzy classifier.

Keywords Modulation recognition, HFNNS, HOCC, Fuzzy inference, Adaptation

数字调制识别作为必需功能广泛存在如智能无线网络、计算机网络自动路由分配、电子对抗等应用中^[1],基于计算智能的统计模式识别建模是很有效的解决方案。神经网络擅长在大量数据中寻找特定模式,应用其自学习和自适应机制实现非线性的映射和优化,但其信息隐含,不易表达知识推理,不可能将先验知识注入。模糊逻辑适合利用定性或模糊的经验知识建立模糊集、隶属度函数和模糊推理规则等,实现非线性、不确定复杂系统的建模,但缺乏自适应机制获取最佳的隶属度函数和规则,应用受限于专家知识的局限性、环境的可变性^[2]。

本文考虑将知识用规则表达运用的模糊逻辑技术和具有自组织能力通过学习获得知识的神经网络结构方法优势互补,以构成模糊神经网络识别器,使得结构性能变化方向明确可控。模糊逻辑中常采用最大最小运算原则,利于实时地抓住主要信息部分,迅速进行处理或做出决策。神经网络采用输入与对应权值乘积求和的运算方式,来近似地表征神经元

输出的时空叠加效应。由于权重可以通过学习来调节,因此其具有知识的获取和存储的作用。基于数据建模的模糊神经网络可将优化后的模糊知识提取出来,完成模糊模型求精,建立能自适应时变性及随机因素等干扰、具有更高容错能力的体系。根据实际问题 and 特征分析采取合适的级联神经网络结构,表现模糊逻辑推理层次,能充分降低系统冗余,进一步提高算法的各方面性能。

1 特征提取

一个实信号 $s(t)$ 有两种复信号表示形式:解析信号 $s_A(t)$ 和基带信号 $s_B(t)$: $s_A(t) = s(t) + j\hat{s}(t)$, 其中 $\hat{s}(t) = s(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} p. v. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t-\tau} d\tau$ 是 $s(t)$ 的 Hilbert 变换。 $s_B(t) = s_A(t) e^{-j2\pi f_c t} = s_{B1}(t) + js_{B2}(t)$ 为解析信号的复包络。实部分量 $s_{B1}(t)$ 和虚部分量 $s_{B2}(t)$ 分别称为基带信号的同相分量和正交

到稿日期:2009-01-22 返修日期:2009-04-03 本文受国家自然科学基金项目(60475024)资助。

陈筱倩(1980-),女,博士生,主要研究方向为智能信号处理与模式识别,E-mail:cxq@smail.hust.edu.cn;王宏远(1945-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能通信和数字信号处理。

分量,简记为 I 和 Q 。令滞后 $\tau=0$,其 $m+n$ 阶交叉矩用随机数学期望定义为:

$$M_{m+n,Q} = E[I^m Q^n] \quad (1)$$

高阶累积量实际是一种广义相关函数,可“屏蔽”高斯噪声的影响。利用高阶累积量定义和矩-累积量(M-C)转换公式,从特征值的类内聚集度和类间分离度考虑,构造对称形式的高阶交叉累积量特征如下。

$$\begin{aligned} C_{212Q} &= E[IIQQ] - E[II]E[QQ] - E[IQ]E[IQ] - E[IQ] \\ &\quad E[IQ] \\ &= M_{212Q} - M_{21}M_{2Q} - 2M_{1Q}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

算法实际处理时,利用 Hilbert 变换求得截获信号的复信号和包络函数,并对解析信号进行幅度归一化处理,能有效抑制噪声对信号幅度的影响。新特征无法有效区分不同调制度的 FSK 信号样本,故引入辅助特征零中心归一化非弱信号段瞬时频率绝对值的标准偏差 σ_{af} ^[3,4],时频域统计特征向量维数较大^[3,4]。模糊推理系统的输入变量数目大于 4 或 5 后,模糊规则数可能会组合爆炸增长,故新特征更适合本文识别器结构。

2 级联模糊神经网络识别器建模

模糊神经网络相当于求精的模糊模型。识别器建模步骤为:建立一个具有模糊规则和隶属度函数库的模糊系统;构造相应的神经网络,确定与模糊规则和隶属度函数对应的连接方式和权值;利用混合最小二乘估计的反向传播算法,训练神经网络,以修改(权值)隶属度函数,求精模糊规则,提高模糊推理系统的求解精度;将训练后的神经网络中权值的调整变化,作为隶属度函数的修改和求精后的模糊规则的变化予以解释,并用这些规则和隶属度函数来更新知识库^[5-7]。系统结构的选择在一定变动范围内都可取得较好的效果,应有足够的参数反映出全部特征,但其过于复杂,反而导致推理精度和算法效率降低。指导性的原则是结构应当与建模数据相配合,知识推理逻辑清晰,且冗余度尽可能低(这样所需训练样本少,建模周期短,算法效率和系统精度较高)。根据经验和结构对比实验结果来确定最合适的初始模糊系统,较直观的经验是在识别率和识别效率较理想的前提下,训练后输入的隶属度函数曲线覆盖整个输入/输出空间,且不出现各模糊子集的隶属度函数间几乎覆盖或重叠现象,即表明合适。

图 1 表示在 SNR=10dB 时 7 种调制方式特征组 C_{212Q} — σ_{af} 的分布(每种调制 50 个样本), C_{212Q} 特征样本大致分布在 6 个值域, σ_{af} 特征样本大致分布在 4 个值域,由此确定初始模糊系统为 2 个输入变量。推理判决结构可采用并联式,即独立 FNN(2 输入、1 输出),或级联式,即 FNN1(1 输入、1 输出)-FNN2(1 输入、1 输出)。综合分析待识别调制方式种类、特征分布,得出 4 种较合适的结构方案(高斯型隶属度函数,前 3 种为并联式,最后 1 种为级联式)如表 1 所列。

表 1 模糊神经网络结构方案

	并联		级联	
输入输出	2-1	2-1	2-1	1-1&1-1
隶属度函数数目	7+7	6+4	7+7	6+2
模糊规则组合数目	$C_7^1 C_7^1$	$C_6^1 C_4^1$	C_7^1	$C_6^1 + C_2^1$

参数数目	28 (非线性) 147 (线性) 175 (合计)	20 (非线性) 72 (线性) 92 (合计)	28 (非线性) 21 (线性) 49 (合计)	24 (FNN1) 8 (FNN2) 32 (合计)
------	----------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	----------------------------------

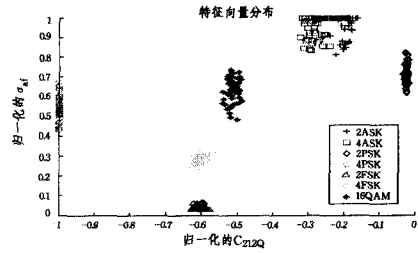


图 1 二维特征向量分布

按照系统结构选择的原则和结构测试,选择级联方案。图 2 为分析得到的级联模糊神经网络识别器系统架构和两子网内部分层结构, x 为输入特征, $A_1 \dots A_m$ 代表特征的模糊子集。由图 1 得对应关系 FNN1: $x - C_{212Q}$, $m=6$, $[A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6] - [4PSK 2FSK/4FSK 16QAM 4ASK 2ASK 2PSK]$; FNN2: $x - \sigma_{af}$, $m=2$, $[A_1 A_2] - [2FSK 4FSK]$ 。全部选用高斯型隶属度函数,单输出变量 y 为调制类别的判决值,采用线性隶属度函数,由于输入为归一化的特征值,产生训练数据时设判决调制类别的标准输出值在 $[0, 1]$ 区间均匀间隔分布。具体取值不影响识别结果,每层节点和连接方式对应的模糊推理系统功能要素如下。

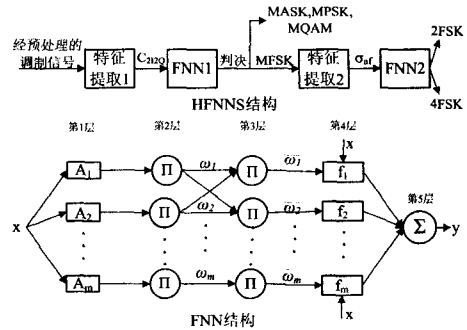


图 2 级联模糊神经网络结构

第 1 层:计算输入的模糊隶属度(参数可调)。

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) = e^{-\frac{(x-c_i)^2}{2\omega_i^2}}, i=1, 2, \dots, m$$

第 2 层:计算每条规则的适用度。

$$O_{2,i} = \omega_i = k_i \mu_{A_i}(x), i=1, 2, \dots, m, \text{ 设权值 } k_i \text{ 为常数}$$

第 3 层:计算适用度的归一化值。

$$O_{3,i} = \bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\sum_i \omega_i}, i=1, 2, \dots, m$$

第 4 层:计算每条规则的输出。

$$O_{4,i} = \bar{\omega}_i f_i = \bar{\omega}_i (p_i x + r_i), i=1, 2, \dots, m$$

第 5 层:计算模糊系统的输出。

$$O_5 = y = \sum_{i=1}^m \bar{\omega}_i f_i = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i f_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i}$$

在以上模糊神经网络模型中采用输出加权平均的一阶 T-S 型模糊推理^[7],包括了待定的前件非线性参数 c_i, ω_i ($i=1, 2, \dots, m$) 和后件线性参数 p_i, r_i ($i=1, 2, \dots, m$),共有 $4m$ 个参数。模糊推理规则通式为 If x is A_i then $y = p_i x + r_i, i=1, 2, \dots, m$ 。

3 仿真实验及结果

在通用环境参数下仿真,变频后中频通信信号载波频率为 150kHz,采样频率为 1200kHz,码元速率为 12.5kHz。为了取得较好的效果,输入/输出训练数据对数应当比参数个数大若干倍,才能避免系统结构的冗余,才有较好的通用性。FNN1 和 FNN2 分别取 120 组和 40 组训练数据对,400 组测试数据对,对 2ASK, 4ASK, 2PSK, 4PSK, 2FSK, 4FSK, 16QAM 每类信号在 0~20dB 信噪比 AWGN(加性高斯白噪声)信道每隔 5dB 进行独立 Monte Carlo 实验。识别器结构如上节分析,对训练数据栅格分区,最小二乘估计输出隶属度函数,BP 算法调整参数。FNN1 和 FNN2 训练周期分别为 30 和 10,期望误差 0,初始步长 0.01,步长递减率 0.9,步长递增率 1.1,采用均方根误差指标,当误差连续 4 次减小,则增加步长,当误差连续两次出现振荡,即一次增加、一次减小交替发生时,则减小步长。不同调制方式的同一特征值数量级相差较大,进入模糊系统前优化识别器的入口参数,统一对特征向量样本数据进行归一化预处理,可提高训练速度。从每个样本数据段提取相应特征,与所有采样独立数据段计算得到的同一特征最大值的绝对值相比,得到归一化为(-1,1)区间内的特征值。

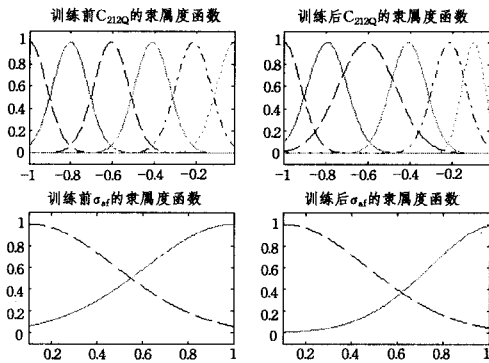


图3 训练前后的模糊隶属度函数

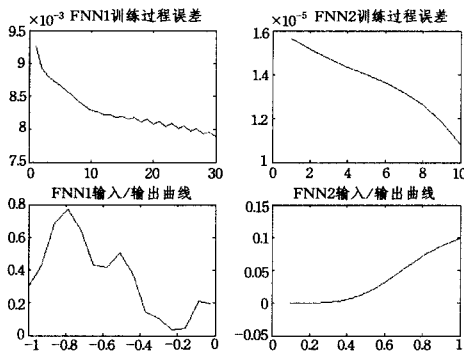


图4 模糊模型训练结果

图3对比了 FNN1 和 FNN2 在 SNR=10dB 时训练前后的模糊隶属度函数,图4显示了模糊模型的训练过程误差和训练结果,图5对比了训练数据经训练后系统的输出逼近误差和测试数据的逼近误差。可见,训练后的模型对于建模的训练数据具有很高的逼近程度,错判率为 0。对于测试数据,它也有十分理想的逼近程度,错判率<0.005,系统精度、适应性和容错性均达到了理论期望。将 400 组测试数据输入训练后的级联模糊神经网络识别器,得到的输出判决准则为 \hat{M}

$= \operatorname{argmin}_M |y - y_M|, M$ 为调制类别, y_M 为对应的标准输出值,最终统计得到平均正确识别率(训练和测试时间为秒级,约为并联结构的 1/2)。

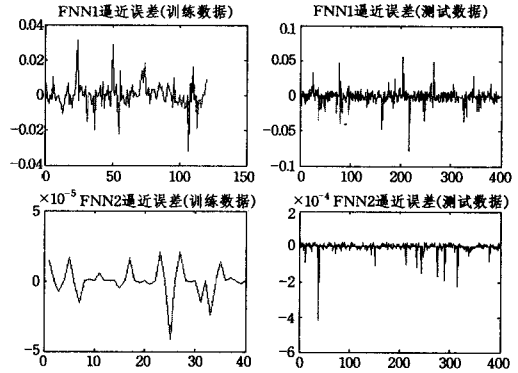


图5 模糊模型的建模误差曲线

比较在相同的实验条件下采用基于高阶交叉累量特征和弹性 BP 算法的神经网络对 400 组测试数据计算平均正确识别率,输入层节点取特征向量维数 2,输出层 7 个节点(待识别调制种类数),中间隐层 10 个节点,结构为 2-10-7,可看出本文算法的优越性。平均正确识别率比较如表 2 所列(①神经网络算法,②本文算法)。

表2 利用新特征向量的 7 种调制方式正确识别率(%)

调制方式	0dB	5dB	10dB
2ASK	①72.6 ②84.7	①82.8 ②92.9	①92.1 ②99.2
4ASK	①73.1 ②83.9	①83.1 ②93.3	①93.6 ②99.4
2PSK	①81.0 ②87.2	①85.3 ②95.7	①96.4 ②100
4PSK	①78.6 ②87.5	①87.6 ②96.3	①97.9 ②100
2FSK	①74.7 ②87.8	①85.6 ②97.7	①95.3 ②100
4FSK	①75.6 ②88.1	①83.7 ②97.0	①96.5 ②100
16QAM	①82.6 ②87.5	①87.2 ②96.8	①97.5 ②100
平均识别率	①76.9 ②86.7	①85.0 ②95.7	①95.6 ②99.8

调制方式	15dB	20dB
2ASK	①97.2 ②99.9	①100 ②100
4ASK	①95.6 ②100	①99.8 ②100
2PSK	①98.3 ②100	①100 ②100
4PSK	①100 ②100	①100 ②100
2FSK	①97.1 ②100	①100 ②100
4FSK	①98.4 ②100	①100 ②100
16QAM	①100 ②100	①100 ②100
平均识别率	①98.1 ②100	①100 ②100

结束语 本文针对通信信号非稳定的、信噪比(SNR)变化范围较大的信号提出新的高阶交叉累量分类特征,并根据特征样本分布建立初始模糊系统,首次将级联模糊神经网络建模应用于调制识别算法。分层模糊推理结构降低了错判率,冗余度低,算法效率明显提高,并缩短了模糊推理知识库的建立周期。训练后的知识存储结构具有更好的稳健性和可扩展性。实验结果表明,SNR 低于 10dB 时,平均识别率相对于基于时频域统计特征和 BP 算法的神经网络^[3,4]提高了 30% 以上,相对于高阶交叉累量特征和弹性 BP 算法的神经网络平均识别率也提高了约 10%;SNR 低于 5dB 时相对基于统计特征的模糊识别器^[6]提高了约 10%。

参考文献

[1] Dobre O A, Abdi A, Bar-Ness Y, et al. A survey of automatic modulation classification techniques; classical approaches and

new developments[J]. IET Comm., 2007, 1(2): 137-156

[2] 曹谢东. 模糊信息处理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003

[3] Azzouz E E, Nandi A K. Automatic modulation recognition-I [J]. Journal of Franklin Institute, 1997, 334B(2): 241-273

[4] Azzouz E E, Nandi A K. Automatic modulation recognition-II [J]. Journal of Franklin Institute, 1997, 334(2): 275-305

[5] Wei W, Mendel J M. A fuzzy logic method for modulation classi-

fication in nonideal environments [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1999, 7(6): 333-334

[6] Lopatka J, Pedzis M. Automatic modulation classification using statistical moments and a fuzzy classifier [J]. Proceedings of IEEE ICSP, 2000, 3(8): 1500-1505

[7] Zadeh L A. Fuzzy Logic Toolbox User's Guide Version 2. 1. 1 [M]. Berkeley, CA: MathWorks Inc, 2001

(上接第 163 页)

$$t_i = \varepsilon \wedge N_i = O_i = \Phi.$$

逻辑媒体定义了 GOMM 的媒体特征, 实现了与物理媒体的去耦。通过连接器 C_w , 逻辑媒体不仅仅在逻辑层次上建模媒体对象, 同时也维持了与相应物理媒体的连接。

定义 10 本体对象 $o \in \Theta$ 是一个实体, 并且 $k_o = \text{"ont"} \wedge s_o = t_o = \varepsilon \wedge C_o = N_o = O_o = \Phi$ 。

本体对象是代表本体概念的实体, 定义了 GOMM 的语义特征。本体对象的类型可以是一个非空集合。由于能再一次被其他本体对象分类, 因此, 支持在 GOMM 内表达本体结构。

定义 11 联系 $a \in \Lambda$ 是一个实体, 并且 $k_a = \text{"asso"} \wedge s_a \neq \varepsilon \wedge t_a \neq \varepsilon \wedge C_a = N_a = O_a = \Phi \wedge |T_a| = 1$ 。

联系描述了实体间的二元有向语义关系, 联系的类型通过一个本体对象表现。不同于其它实体, 一个联系只能与一种类型相关, 联系能被具体化。

定义 12 GOMM 容器 $e \in \Sigma$ 是一个实体, 并且 $k_e = \text{"omm"} \wedge s_e = t_e = \varepsilon \wedge C_e = \Phi$, 满足 $\forall x \in N_e: k_x = \text{"asso"} \rightarrow \{s_x, t_x\} \subseteq N_e$ 。

GOMM 把多个实体组合成一个容器。不被其它容器封装的容器称为根容器, 被其它容器封装的容器称为子容器。在多媒体内容发布时, 容器构成了 MTM 系统中多媒体元对象模型的核心, 表达了多媒体内容的 3 个特征及版本信息。

定义 13 本体是一个三元组 $O = \langle \Theta, H^o, A^o \rangle$, $H^o \subseteq \Theta \times \Theta$, 表示本体对象之间具有子类关系, A^o 表示本体公理的集合。

在 GOMM 中, 本体由本体对象表现, 分为对象概念和关系概念。GOMM 图中的结点、边分别标记对象概念、关系概念。本体的公理集说明了概念的属性、限制以及概念之间的关系。可以通过元本体对象来描述 GOMM 中的关系。

本体与 GOMM 集成有两种方法: (1) 按照本体公理, 扩展 GOMM 图。(2) 使用本体知识压缩 GOMM 图, 即从 GOMM 中删除任何能被推导的冗余的联系。在 MTM 系统中, 方法(1)提供了有效的 MTM 应用构架, 方法(2)能有效地发布 GOMM。选择哪一种方法依赖于如应用场景、本体、GOMM 的大小以及响应时间、设备的存取空间、带宽等因素。

结束语 本文从多媒体内容的媒体、语义和功能 3 个特征及对版本的支持出发, 提出一种面向图的多媒体内容、本体知识的描述和实现技术来支持多媒体任务管理的过程模型 GOMM。形式化描述 GOMM 所对应的“图类型”, 提高了过程模型 GOMM 的精确性。

参考文献

[1] Cai M, Frank M, Yan B, et al. A subscribable peer-to-peer RDF

repository for distributed metadata management [J]. Journal of Web Semantics, 2004, 2(2): 109-130

[2] Castano S, Ferrara A, Montanelli S. Ontology-based interoperability services for semantic collaboration in open networked systems [A] // Proceedings of the First International Conference on Interoperability of Enterprise Software and Applications (INTEROP-ESA) [C]. Geneva, Switzerland: Springer-Verlag, 2005: 135-146

[3] Benattallah B, Hacid M-S, Paik H, et al. Towards semantic-driven, flexible and scalable framework for peering and querying e-Catalog communities [J]. Information Systems, 2006, 31(4): 266-294

[4] Brenna L, Johansen D. Engineering push-based web services [J]. International Journal of Web Services Practices (IJWSP), 2006, 1(1): 89-100

[5] Beckett D. Resource Description Framework (RDF) Model and Syntax Specification [EB/OL]. W3C Recommendation. <http://www.w3.org/TR/REC-rdf-syntax/>, February 2004

[6] Information Technology - SGML Applications - Topic Maps [S]. ISO/IEC International Standard 13250. 2000

[7] Newman D, Patterson A, Schmitz P. XHTML + SMIL Profile [EB/OL]. W3C Note. <http://www.w3.org/TR/XHTML-plusSMIL/>, January 2002

[8] Pereira F, Ebrahimi T. The MPEG-4 Book [M]. California: Prentice Hall, 2002

[9] Ayars J. Synchronized Multimedia Integration Language (SMIL 2.0) [EB/OL]. W3C Recommendation. <http://www.w3.org/TR/SMIL20/>, August 2001

[10] Ferraiolo J, Jun F, Jackson D. Scalable Vector Graphics (SVG) 1.1 [EB/OL]. W3C Recommendation. <http://www.w3.org/TR/SVG11/>, January 2003

[11] Motama Gmb H. NMM homepage [EB/OL]. <http://www.motama.com/nmm.html>

[12] Brickley D, Guha R V. RDF Vocabulary Description Language 1.0: RDF Schema [EB/OL]. W3C Working Draft. <http://www.w3.org/TR/rdf-schema/>, February 2004

[13] Connolly D. DAML + OIL (March 2001) Reference [EB/OL]. W3C Note. <http://www.w3.org/TR/daml+oil-reference>, December 2001

[14] Schneider P, Hayes P, Horrocks I. OWL Web Ontology Language Semantics and Abstract Syntax [EB/OL]. W3C Recommendation. <http://www.w3.org/TR/owl-semantics/>, February 2004

[15] 孙亮, 任小康. 基于本体的图像语义检索模型 [J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, 23(1): 127-131