

一种集成直觉模糊信息的激励自适应信任模型

徐军^{*①②} 钟元生^② 万树平^②

^①(江西财经大学现代经济管理学院 南昌 330013)

^②(江西财经大学信息管理学院 南昌 330013)

摘要: 针对现有信任机制不能很好表达信任的不确定性,且缺乏有效处理分布式网络中存在的不诚实推荐和策略性欺骗等问题,该文提出一种集成直觉模糊信息的自适应信任评估模型。为了激励提供可信服务的实体,惩罚不良行为实体,该模型结合服务持续性强度和衰减因子,计算实体直接信任直觉模糊数。同时利用实体的推荐可信度和行为一致性过滤不诚实推荐行为。除此之外,为了克服综合信任聚合计算中权重确定较主观的问题,给出了一种新的自适应权重分配方法。仿真实验表明,该模型在提高实体服务积极性和抑制恶意欺诈行为中,都有较好的适应性和有效性。

关键词: 直觉模糊信息;信任模型;分布式网络;推荐可信度

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)04-0803-08

DOI: 10.11999/JEIT150750

Incentive Adaptive Trust Model Based on Integrated Intuitionistic Fuzzy Information

XU Jun^{①②} ZHONG Yuansheng^② WAN Shuping^②

^①(College of Modern Economics & Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China)

^②(College of Information Technology, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China)

Abstract: Existing trust models can not effectively express the uncertainty of trust relationship and deal with such issues as dishonest feedbacks and strategic frauds from malicious entities in the distributed network, an adaptive trust model based on aggregating Intuitionistic Fuzzy Information (IFI) is proposed. Firstly, in order to incentivize entities providing trustworthy service and punish entities taking along malicious behavior, an approach on aggregating IFI is constructed to compute the direct trust intuitionistic fuzzy numbers which contain the latest permanence factor and the time decay factor. Then, the recommendation credibility and uniformity are defined to detect dishonest recommendation. Subsequent, an adaptive weighted approach is developed to avoid distributing the weights of direct and indirect trust subjectively. The simulation experiments demonstrate that the proposed model not only is robust on malicious attacks, but also has better adaptability and effectiveness.

Key words: Intuitionistic Fuzzy Information (IFI); Trust model; Distributed network; Recommendation credibility

1 引言

近年来,对等(Peer to Peer, P2P)网络技术在协作、共享和分布式计算等方面得到了广泛应用。但

由于P2P网络技术的匿名性、开放性、自治性和不确定性等特征,使得网络环境中充斥着大量欺诈行为和不可信服务。为了解决这类网络安全问题,人们模拟人际网络中的信任关系,通过建立信任评估模型,可以有效地遏制开放网络中存在的恶意行为,从而降低交互失败的风险。因此,信任评估成为国内外学者研究的热点。

根据实体信任度的表示方法,已有的信任模型主要有:(1)基于概率理论信任模型^[1-4]。文献[1]利用最大似然估计方法获得节点的全局信任值,克服了EigenRep模型^[2]迭代产生的复杂性,通过置信区间估计方法提高了精确性,同时考虑了恶意节点的攻击行为。文献[3]提出了一种分层贝叶斯信任推理

收稿日期: 2015-06-24; 改回日期: 2015-12-18; 网络出版: 2016-02-19

*通信作者: 徐军 xujun1028@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(71361012, 61263018), 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ151601), 江西省高校人文社会科学研究项目(JC1338), 江西财经大学青年基金

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (71361012, 61263018), The Science and Technology Project of Jiangxi province educational department of China (GJJ151601), The Colleges Humanities Social Science Research Project of Jiangxi Province (JC1338), The Young Foundation of Jiangxi University of Finance and Economics

模型,该模型从客体或信息源行为间可观察的相关性来改善评估方法,并且能克服不可信实体用新的身份来掩饰其较差的信誉。文献[4]从节点之间的相似性出发,结合贝叶斯条件概率公式,提出了一种概率信任传播模型。(2)基于模糊集合理论的信任模型^[5-7]。文献[5]研究了基于主观逻辑的依赖上下文的信任决策和一系列折扣算子及其几何解释。文献[6]针对Jϕsang只给出二项式观点的传递公式,并考虑到实体信誉环境对信任融合操作的影响,提出了基于多项式主观逻辑的扩展信任传播模型。文献[7]将主观逻辑中的不确定性进一步区分为先验(没有证据)和后验(证据失真),从而提出一种3值主观逻辑(3VSL)方法,并用于评估社会网络中实体间的信任关系。(3)基于云模型的信任模型^[8,9]。文献[8]利用云模型来描述信任水平,基于节点的历史评分、推荐可信度和信任衰减特性,给出了防攻击的总体信任融合算法。文献[9]利用云模型表达无线传感网络中信任关系的不确定性,实验表明该模型能够有效地识别多种攻击行为。(4)基于证据理论信任模型^[10-13]。文献[10]通过节点评分建立的基本概率分配函数来表示信息中的不确定性,分析了信任传递的有效性,并利用D-S(Dempster-Shafer)证据合成规则聚合所有推荐者的证据,从而避免了不确定性在信任传递时丢失的问题。文献[11]提出了一种改进的基于证据的P2P信任模型,该模型利用置信度来建立基本概率分配函数模型,然后通过改进的D-S证据合成规则进行信任融合,获得节点的信任度。为避免门限值的主观设定对局部信任度计算的影响,文献[12]构造隶属度函数描述信任关系,并且通过获得的门限值和评价分布来修正推荐信任,以提高信任度量的准确程度。文献[13]为了解决直接交互的时效性和推荐信息的可靠性等问题,通过扩展D-S理论提高的信任模型的精确性和有效性。

综上所述,已有信任模型的发展奠定了坚实的理论基础。但在信任的不确定性表达,推荐实体的可靠性分析和模型的自适应性等方面仍有待进一步研究。

(1)大多模型不能很好地刻画信任的不确定性。现有基于云模型和概率理论的信任模型都是用概率来描述信任的不确定性,且须事先做出主观假设。基于模糊数学的模型,利用隶属度函数解决信任的不确定性。证据理论虽然能够解决开放网络中信任的不确定性计算问题,但大多基于证据理论的信任模型^[10-12],只用信任函数和似然函数表示信任值,没有考虑不信任程度分量和不确定性程度分量对信任值的影响。

(2)多数模型对恶意行为免疫力不强。一方面不能有效抑制策略性欺骗行为,如实体通过提供优质服务赚取信任,当其积累到较高信任值时,对用户提供恶意欺诈性服务。另一方面缺乏有效的方法处理恶意推荐行为,多数模型是基于相似度的观点,来避免恶意推荐行为,但忽视了推荐行为的一致性。

(3)多数基于不确定性方法的信任模型,忽略了实体持续提供可信服务行为的重要性,从而无法激励实体继续提供高质量的服务。

(4)多数模型虽然考虑了信任的时间衰减特性,但大多衰减函数收敛过快,致使大部分的历史评分在信任评价过程中失效。

(5)已有信任评估方法在计算综合信任度时,大多事先给定或采用主观的融合计算方法如专家打分法、平均法等确定权重,使得模型具有较大的主观性,缺少自适应性和科学性。

直觉模糊理论是对传统模糊集的拓展,且同时考虑了隶属度、非隶属度和犹豫度这三方面的信息,在处理信任的主观性和不确定性方面更具有直观性。它不必事先给出知识的先验概率,与主观Bayes方法相比,具有较大的灵活性。因此,基于直觉模糊理论的信任评估方法值得深入研究。针对上述问题,本文提出了一种集成直觉模糊信息的激励自适应信任模型。该模型的信任直觉模糊数考虑了时间衰减因子和服务持续因子,并且根据不确定性特征和交互次数对信任的影响,提出了综合信任计算中的权重因子自适应分配方法。

2 基本概念

2.1 直觉模糊集的概念

定义1 设 X 是一个论域。若 X 上存在两个映射 $\mu_{\tilde{A}}: X \rightarrow [0,1]$ 和 $\nu_{\tilde{A}}: X \rightarrow [0,1]$,使得 $x \in X \rightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1]$ 和 $x \in X \rightarrow \nu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1]$,且满足条件 $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) + \nu_{\tilde{A}}(x) \leq 1$,则称 $\mu_{\tilde{A}}$ 和 $\nu_{\tilde{A}}$ 确定了论域 X 上直觉模糊集 \tilde{A} ,可记作 $\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x), \nu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\}$,其中 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 和 $\nu_{\tilde{A}}(x)$ 为 x 属于 \tilde{A} 的隶属度和非隶属度。此外,若 $\pi_{\tilde{A}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) - \nu_{\tilde{A}}(x)$,且 $x \in X$,则称 $\pi_{\tilde{A}}(x)$ 为 X 中元素 x 属于 \tilde{A} 的犹豫度或不确定度^[14]。

直觉模糊集 \tilde{A} ,其隶属度 $\mu_{\tilde{A}}(x)$,非隶属度 $\nu_{\tilde{A}}(x)$ 和犹豫度 $\pi_{\tilde{A}}(x)$,分别表示对象 x 属于直觉模糊集 \tilde{A} 的肯定,否定和中立的程度。例如,设一直觉模糊集 $\tilde{A} = \{(x, 0.7, 0.2) | x \in X\}$,那么它的隶属度 $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0.7$,非隶属度 $\nu_{\tilde{A}}(x) = 0.2$ 和犹豫度 $\pi_{\tilde{A}}(x) = 0.1$ 。也就是说,对象 x 属于 \tilde{A} 的程度是0.7,不属于 \tilde{A} 的程度是0.2,既不肯定也不否定的中立程度是0.1。

2.2 直觉模糊数

对于 $\forall x$, 文献[14]称由隶属度和非隶属度所构成的有序对 $\langle \mu_A(x), v_A(x) \rangle$ 为直觉模糊数, 通常被记为 $\alpha = \langle \mu_\alpha, v_\alpha \rangle$, 其中 $\mu_\alpha \in [0, 1]$, $v_\alpha \in [0, 1]$ 并且 $\mu_\alpha + v_\alpha \in [0, 1]$ 。

2.3 直觉模糊平均集成算子

定义 2 设 $\alpha_i = \langle \mu_{\alpha_i}, v_{\alpha_i} \rangle (i = 1, 2, \dots, n)$ 为一组直觉模糊数, 直觉模糊混合平均(IFHA)算子: $I^n \rightarrow I$, 若

$$\begin{aligned} \text{IFHA}_{\omega, w}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \\ = w_1 \dot{\alpha}_{\sigma(1)} \oplus w_2 \dot{\alpha}_{\sigma(2)} \oplus \dots \oplus w_n \dot{\alpha}_{\sigma(n)} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 是与函数IFHA相关联的加权向量(位置向量), $w_j \in [0, 1] (j = 1, 2, \dots, n)$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。 $\dot{\alpha}_{\sigma(i)}$ 是加权的直觉模糊数 $\dot{\alpha}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 中第 i 个最大的元素, 其中 $\dot{\alpha}_i = n\omega_i \alpha_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 式中 n 是平衡因子, $\omega_i \in [0, 1] (j = 1, 2, \dots, n)$ 且 $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$, 则称函数IFHA为直觉模糊混合平均算子。特别地, 若 $w = (1/n, 1/n, \dots, 1/n)^T$, 则函数IFHA退化为直觉模糊加权平均算子, 若 $\omega = (1/n, 1/n, \dots, 1/n)^T$, 则函数IFHA退化为直觉模糊有序加权平均算子。

2.4 直觉模糊数的 Hamming 距离

设有两直觉模糊数 $\alpha_1 = \langle \mu_{\alpha_1}, v_{\alpha_1} \rangle$ 和 $\alpha_2 = \langle \mu_{\alpha_2}, v_{\alpha_2} \rangle$, 则 α_1 和 α_2 的 Hamming 距离为

$$\begin{aligned} \text{Dis}(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{1}{2} \left(\left| \mu_{\alpha_1} - \mu_{\alpha_2} \right| + \left| v_{\alpha_1} - v_{\alpha_2} \right| \right. \\ \left. + \left| \pi_{\alpha_1} - \pi_{\alpha_2} \right| \right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, π_{α_1} 和 π_{α_2} 分别为 α_1 和 α_2 的犹豫度。

2.5 直觉模糊熵

定义 3^[15] 设 $\alpha = \langle \mu_A(x), v_A(x) \rangle$ 为直觉模糊数, 则其直觉模糊熵为

$$E(\alpha) = \frac{1 - |\mu_A(x) - v_A(x)| + \pi_A(x)}{1 + |\mu_A(x) - v_A(x)| + \pi_A(x)} \quad (3)$$

2.6 实体集

参与在线服务环境的实体集可分为服务提供实体、服务评估实体和服务推荐实体。服务提供实体(service provider)是指在线服务中资源提供方, 即被评估的实体或目标实体, 记为 SP; 服务评估实体(Evaluator)是指在线服务中对目标实体进行评分的实体, 记为 E; 服务推荐实体是指向评估实体推荐服务提供实体信任信息的实体, 记为 K。

2.7 信任直觉模糊数

信任直觉模糊数 TIFN(Trust Intuitionistic Fuzzy Number)是一种描述信任的数量概念。它能够细腻、全面地刻画实体间信任关系的不确定性,

可以同时表示信任程度、不信任程度和不确定性程度(即犹豫度), 克服了单一标度(即信任程度)的局限性, 而把人思维中的“非此非彼”性包含在内, 使得更贴近人的主观认识。

定义 4 信任直觉模糊数是指用一个直觉模糊数 $\alpha = \langle \mu_\alpha, v_\alpha \rangle$ 表示信任, 其中 μ_α 和 v_α 分别代表信任和不相信的程度, $\pi_\alpha = 1 - \mu_\alpha - v_\alpha$ 表示信任的不确定性程度。同理可知, 理想信任直觉模糊数 $\text{TIFN}^+ = \langle 1, 0 \rangle$, 表示完全信任; 负理想信任直觉模糊数 $\text{TIFN}^- = \langle 0, 1 \rangle$, 表示完全不信任; $\langle 0, 0 \rangle$ 表示完全不确定。其运算法则参考文献[14]。

3 基于集成直觉模糊信息的信任评估模型

在开放的分布式网络中, 实体间的交互经验是产生其信任关系的基础。对此, 本文结合信任的时间衰减性和服务持续性, 主要考虑两类信息源, 即评估实体的交互经验和推荐实体的交互经验^[8, 16]。

3.1 直接信任

直接信任是指两个实体通过直接的交互活动, 而相互之间建立的一种直接信任关系, 信任度来源于双方根据交互质量产生的直接经验。

设向量 $Q_{ij} = (Q_{ij}^1, Q_{ij}^2, \dots, Q_{ij}^n)$ 为评估实体 i 和目标实体 j 交互 n 次产生的服务质量评价向量, 第 k 次在 t_k 时间交互的服务满意度为 $Q_{ij}^k (1 \leq k \leq n)$ 。则实体 i 对目标实体 j 的直接信任计算如下:

步骤 1 评价向量归一化。为消除物理量纲的影响, 根据式(4)和式(5)分别对效益型和成本型属性值处理, 使得向量 Q_{ij} 规范化为 $R_{ij} = (R_{ij}^1, R_{ij}^2, \dots, R_{ij}^n)$ 。具体公式为

$$R_{ij}^k = (Q_{ij}^k - \min Q_{ij}) / (\max Q_{ij} - \min Q_{ij}), k \in n \quad (4)$$

$$R_{ij}^k = (\max Q_{ij} - Q_{ij}^k) / (\max Q_{ij} - \min Q_{ij}), k \in n \quad (5)$$

式中, $\max Q_{ij}$ 和 $\min Q_{ij}$ 分别表示评价向量的最大和最小级别。

步骤 2 计算拟满意度 ξ_j 、拟不满意度 ζ_j 和拟犹豫度 η_j 。一般说来, 当一个实体对另一个实体的主观评价为满意和不满意各占一半, 即 $Q_{ij}^k = 0.5$ 时, 表示对服务的评价是最不确定的。因此, 对于向量 R_{ij} , 令 $R_{ij}^u = \{\text{TR}_{ij}^k | R_{ij}^k > 0.5, R_{ij}^k \in R_{ij}\}$ 为服务满意评价向量, $R_{ij}^l = \{\text{FR}_{ij}^k | R_{ij}^k < 0.5, R_{ij}^k \in R_{ij}\}$ 为服务不满意评价向量, 利用式(6)~式(8)计算 ξ_j , ζ_j 和 η_j :

$$\xi_j = \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^{|R_{ij}^u|} \text{TF}(t_k) \text{TR}_{ij}^k}{\sum_{k=1}^{|R_{ij}^u|} \text{TF}(t_k)}, & |R_{ij}^u| > 0 \\ 0.5, & |R_{ij}^u| = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\zeta_j = \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^{|\mathbf{R}_{ij}^l|} \text{TF}(t_k) \text{FR}_{ij}^{t_k}}{\sum_{k=1}^{|\mathbf{R}_{ij}^l|} \text{TF}(t_k)}, & |\mathbf{R}_{ij}^l| > 0 \\ 0.5, & |\mathbf{R}_{ij}^l| = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\eta_j = \frac{1}{2}(\xi_j + \zeta_j) \quad (8)$$

其中, $\text{TF}(t_k)$ 表示 t_k 时间的评分衰减因子, $|\mathbf{R}_{ij}^u|$ 为向量 \mathbf{R}_{ij}^u 中元素的个数, $|\mathbf{R}_{ij}^l|$ 为向量 \mathbf{R}_{ij}^l 中元素的个数。

定义 5(时间衰减因子) 信任具有随时间变化而变化的特性。从心理认知角度来看, 往往最近的交互行为更能反映实体的可信程度。由于现有信任模型多采用线性函数或者指数函数作为时间衰减因子, 不能有效利用历史评分, 对此, 本文利用描述计算时间衰减特性。

$$\text{TF}(t) = h / (h + (t - t_c)) \quad (9)$$

式中, t 为交互时间, t_c 为当前时间, h 表示衰减因子, 用来控制衰减速率。

如图 1 所示, 指数函数前期收敛快后期收敛慢, 经若干时间片后函数值接近 0, 以致绝大多数历史评分失去有效性。相反, 线性函数衰减速度是恒定的, 不能反映近期评分的重要性。然而, 比例函数的衰减速度在前期比指数函数要低, 后期比线性函数要高, 正好与信任衰减特性相吻合。因此, 式(9)结合指数函数和线性函数的优点, 不仅能保证近期评分衰减更小, 而且避免了更多历史评分失去对最终信任的影响, 从而体现了信任随时间衰减的变化趋势。

步骤 3 线性变换。鉴于文献[17]集成精确数为直觉模糊数的思想: (1)拟满意度越接近 1, 满意度越大; (2)拟不满意度越接近 0, 不满意度越大; (3)拟犹豫度越接近 0.5, 犹豫度越大。本文基于 TOPSIS 思想^[18], 利用相对接近度, 分别对拟隶属度 ξ_j 、拟非隶属度 ζ_j 和拟犹豫度 η_j 做线性变换:

$$\kappa_j = \frac{d(\xi_j, 0.5)}{d(\xi_j, 0.5) + d(\xi_j, 1)} \quad (10)$$

$$\varsigma_j = \frac{d(\zeta_j, 0.5)}{d(\zeta_j, 0.5) + d(\zeta_j, 0)} \quad (11)$$

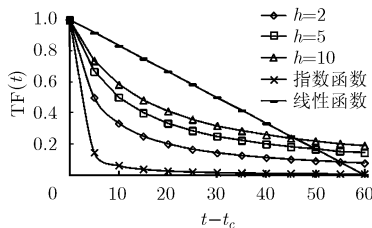


图 1 3 种衰减函数的曲线

$$\tau_j = \begin{cases} \frac{d(\varsigma_j, \eta_j)}{d(\varsigma_j, \eta_j) + d(\eta_j, 0.5)}, & \eta_j < 0.5 \\ \frac{d(\xi_j, \eta_j)}{d(\xi_j, \eta_j) + d(\eta_j, 0.5)}, & \eta_j > 0.5 \\ 1, & \eta_j = 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $d(\xi_j, 0.5)$ 表示 ξ_j 和 0.5 之间的 Haming 距离, 其它以此类推。

步骤 4 生成信任直觉模糊数。当 $\eta_j < 0.5$ 时, 对犹豫度的计算影响较大的元素属于向量 $\mathbf{R}_{ij}^{\pi l} = \{R_{ij}^{t_k} \mid \zeta_j \leq R_{ij}^{t_k} \leq 0.5, R_{ij}^{t_k} \in \mathbf{R}_{ij}\}$; 当 $\eta_j > 0.5$, 对犹豫度的计算影响较大的元素属于向量 $\mathbf{R}_{ij}^{\pi u} = \{R_{ij}^{t_k} \mid 0.5 \leq R_{ij}^{t_k} \leq \xi_j, R_{ij}^{t_k} \in \mathbf{R}_{ij}\}$; 当 $\eta_j = 0.5$, 对犹豫度的计算影响较大的元素既有属于向量 $\mathbf{R}_{ij}^{\pi l}$, 也有属于向量 $\mathbf{R}_{ij}^{\pi u}$ 。设 \mathbf{R}_{ij}^{π} 为对犹豫度的计算影响较大的元素组成的向量, $|\mathbf{R}_{ij}^{\pi}|$ 为向量 \mathbf{R}_{ij}^{π} 的个数。其计算公式为

$$|\mathbf{R}_{ij}^{\pi}| = \begin{cases} |\mathbf{R}_{ij}^{\pi l}|, & \eta_j < 0.5 \\ |\mathbf{R}_{ij}^{\pi u}|, & \eta_j > 0.5 \\ (|\mathbf{R}_{ij}^{\pi l}| + |\mathbf{R}_{ij}^{\pi u}|) / 2, & \eta_j = 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

设 $w_{\kappa}, w_{\varsigma}, w_{\tau}$ 分别为拟隶属度、拟非隶属度和拟犹豫度的权重因子, $0 \leq w_{\kappa} \leq 1, 0 \leq w_{\varsigma} \leq 1, 0 \leq w_{\tau} \leq 1$ 且 $w_{\kappa} + w_{\varsigma} + w_{\tau} = 1$ 。根据向量 $\mathbf{R}_{ij}^u, \mathbf{R}_{ij}^l$ 和 \mathbf{R}_{ij}^{π} 的长度, 以及最近持续相应服务的强度, 可得

$$\left. \begin{aligned} w_{\kappa} &= \frac{|\mathbf{R}_{ij}^u| \text{PF}_j^u}{|\mathbf{R}_{ij}^u| + |\mathbf{R}_{ij}^l| + |\mathbf{R}_{ij}^{\pi}|} \\ w_{\varsigma} &= \frac{|\mathbf{R}_{ij}^l| \text{PF}_j^l}{|\mathbf{R}_{ij}^u| + |\mathbf{R}_{ij}^l| + |\mathbf{R}_{ij}^{\pi}|} \\ w_{\tau} &= \frac{|\mathbf{R}_{ij}^{\pi}| \text{PF}_j^{\pi}}{|\mathbf{R}_{ij}^u| + |\mathbf{R}_{ij}^l| + |\mathbf{R}_{ij}^{\pi}|} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中, $\text{PF}_j^u, \text{PF}_j^l$ 和 PF_j^{π} 分别表示最近持续可信服务、不可信服务和不确定性服务的强度。

定义 6(最近服务持续因子) 最近服务持续因子是利用实体的最近持续同类质量(可信/不可信/不确定)服务次数, 根据以下 S 型函数计算所得到的表示实体持续提供同类质量服务的系数。

$$\text{PF}_j = 1 / (1 + (\text{SN}_j / \beta)^{\pi}) \quad (15)$$

其中, SN_j 表示实体 j 最近持续提供某类质量服务次数, β 是一个控制持续因子速度的参数。当 SN_j 大于 β 时, 持续因子 PF_j 增长较慢, 对持续可信服务的激励力度越小, 对持续不可信或不确定服务的惩罚力度越小; 反之, 则其增长较快, 最后收敛到一个平稳水平。

则实体 i 对目标实体 j 根据直接经验产生的信任隶属度 μ_j ，不信任隶属度 ν_j 和犹豫度 π_j 为

$$\left. \begin{aligned} \mu_j &= \frac{w_\kappa \kappa_j}{w_\kappa \kappa_j + w_\zeta \zeta_j + w_\tau \tau_j} \\ \nu_j &= \frac{w_\zeta \zeta_j}{w_\kappa \kappa_j + w_\zeta \zeta_j + w_\tau \tau_j} \\ \pi_j &= \frac{w_\tau \tau_j}{w_\kappa \kappa_j + w_\zeta \zeta_j + w_\tau \tau_j} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

根据式(16)，实体 i 对目标实体 j 的直接信任为 $DT_{ij} = \langle \mu_{DT_{ij}}, \nu_{DT_{ij}} \rangle$ ，其中， $\mu_{DT_{ij}} = \mu_j$ 表示实体 i 对目标实体 j 的信任程度， $\nu_{DT_{ij}} = \nu_j$ 表示实体 i 对目标实体 j 不信任程度。

3.2 间接信任

间接信任是指通过与目标实体交互过的其它评估实体的间接经验形成的信任^[16]。然而并非所有的推荐实体都是诚实可信的，往往存在不诚实的反馈夸大或诋毁目标实体。本文结合推荐实体的可信度、一致性及其直接信任，根据式(17)，计算实体 i 对目标实体 j 的间接信任 $RT_{ij} = \langle \mu_{RT_{ij}}, \nu_{RT_{ij}} \rangle$ ：

$$RT_{ij} = \bigoplus_{r=1}^k \frac{Cr_{ir} U_r}{\sum_{k \in K} Cr_{ik} U_k} DT_{rj} (k \in K) \quad (17)$$

其中， K 为推荐实体集合， Cr_{ik} 为实体 i 对实体 k 的推荐可信度， U_k 为推荐实体 k 的一致性。根据直觉模糊加权平均算子的定义可知， RT_{ij} 也是直觉模糊数。

定义 7(推荐实体可信度) 推荐实体可信度是指评估实体对推荐实体所提供信息的可信程度。利用评估实体与推荐实体对两者都交互过的实体的反馈相似度，来确定推荐实体可信度。

$$Cr_{ik} = \text{Sim}(i, k) / \sum_{k \in K} \text{Sim}(i, k) \quad (18)$$

其中， $\text{Sim}(i, k) = 1 - \sum_{c \in C} \text{Dis}(ic, kc) / |C|$ 为评估实体 i 与推荐实体 k ， C 与 i 和 k 都交互过的公共实体集合， ic 和 kc 分别为实体 i 和实体 k 对 C 中每个实体的直接信任所组成向量。与以往模型相比，由于直接信任是一个信任直觉模糊数，本文不仅考虑了实体间信任程度的相似度，而且考虑了实体间不信任程度和不确定程度的相似度，使得推荐实体可信度更加系统和全面。

定义 8(推荐实体一致性) 推荐实体一致性用来描述某一推荐实体与其它实体的推荐行为的一致性程度指标，设 \bar{D}_K 为所有推荐实体对实体 j 的直接信任的均值， D_{kj} 为推荐实体 k 对 j 的直接信任，则 $\Delta_k = \text{Dis}(D_{kj}, \bar{D}_K)$ 为 D_{kj} 相对于所有推荐实体整体对目标实体 j 的直接信任的偏差。因此，定义推荐实体 k 的一致性为

$$U_k = -\frac{1}{\log_2 |K|} \frac{\sum_{k=1}^{|K|} \Delta_k}{\sum_{k=1}^{|K|} \Delta_k} \log_2 \frac{\Delta_k}{\sum_{k=1}^{|K|} \Delta_k} \quad (19)$$

其中， $0 \leq U_k \leq 1$ 。当 U_k 越接近 0 时，表示偏差 $\Delta_k (1 \leq k \leq |C|)$ 越不均匀分布，也就是说推荐实体 k 的行为与推荐实体集的整体行为越不一致，从而给予推荐实体 k 较低的权重，以抑制推荐实体的恶意欺诈行为；反之，当 U_k 越接近 1 时，表示偏差 $\Delta_k (1 \leq k \leq |C|)$ 越均匀分布，即推荐实体 k 的行为与推荐实体集的整体行为越一致，从而给予推荐实体 k 较高的权重，使得推荐实体 k 提供的信任信息更客观可信。

3.3 综合信任

通过集成直接信任和间接信任，定义实体 i 对目标实体 j 的综合信任 $GT_{ij} = \langle \mu_{GT_{ij}}, \nu_{GT_{ij}} \rangle$ 为

$$GT_{ij} = w_D DT_{ij} \oplus w_R RT_{ij} \quad (20)$$

其中， w_D 和 w_R 分别为直接信任和间接信任的权重因子。虽然人们优先相信自身的直接判断，即认为交互的直接经验要比间接经验更可信，但很难确定 w_D 和 w_R 。现有文献大多采用主观方法(如取均值、专家打分和实验仿真)或引入节点特性因子^[19]，但缺少科学性、合理性和自适应性。从人的心理认知习惯角度分析，交互经验产生的不确定性和交互次数对信任计算的准确度有着重要影响^[8,19]。据此，本文结合交互次数和直觉模糊熵的概念，提出了一种自动权重分配方法，具体计算方法为

$$w_D(\theta) = \frac{(\theta/n)^{E_{DT_{ij}}}}{(\theta/n)^{E_{DT_{ij}}} + ((n-\theta)/n)^{1+E_{RT_{ij}}}} \quad (21)$$

$$w_R(\theta) = \frac{((n-\theta)/n)^{1+E_{RT_{ij}}}}{(\theta/n)^{E_{DT_{ij}}} + ((n-\theta)/n)^{1+E_{RT_{ij}}}} \quad (22)$$

式中， $0 \leq \theta \leq n$ 为评估实体与目标实体直接交互的次数， n 为评估实体和推荐实体与目标实体交互的次数， $E_{DT_{ij}}$ 和 $E_{RT_{ij}}$ 分别为直接信任和推荐信任产生的直觉模糊熵。直觉模糊熵是度量模糊集的不确定性程度的量，与基于概率理论的传统信息熵不同，它具有非概率性，并且当模糊集的携带的信息量越小，不确定性就越大，直觉模糊熵也越大。 $E_{DT_{ij}}$ 和 $E_{RT_{ij}}$ 可以用来调节 $w_D(\theta)$ 和 $w_R(\theta)$ 趋向于 1 的速度，例如，当直接交互产生的不确定性程度越小，随着直接交互次数所占比重的增加，则 $w_D(\theta)$ 趋向于 1 的速度越快；即在相同直接交互次数比例的情况下，不确定性程度越小， $w_D(\theta)$ 越大。 $E_{RT_{ij}} + 1$ 为了体现直接交互次数的增加比间接交互次数的增加影响综合信任的程度更大。当 $\theta = 0$ 时， $w_D(\theta) = 0$ ，表示

实体间无直接交互，其综合信任等于间接信任；当 $\theta = n$ 时， $w_D(\theta) = 1$ ，表示实体间的交互仅有直接交互，无推荐实体，其综合信任等于直接信任。

3.4 信任决策

本文借鉴逼近理想解的排序法思想^[18]，来定义实体综合信任的信任接近度，以此对目标实体进行信任排序。即计算综合信任与理想信任点、负理想信任点的距离来进行排序，若目标实体最靠近理想信任点同时又最远离负理想信任点，则为最优，否则为最劣。设实体 i 对目标实体 j 的综合信任为 $GT_{ij} = \langle \mu_{GT_{ij}}, \nu_{GT_{ij}} \rangle$ ，则相应的信任接近度定义为

$$\delta_{i,j} = d_{i,j}^- / (d_{i,j}^- + d_{i,j}^+) \quad (23)$$

其中， $d_{i,j}^+$ 和 $d_{i,j}^-$ 分别表示 GT_{ij} 与理想信任直觉模糊数 $TIFN^+$ 和负理想信任直觉模糊数 $TIFN^-$ 的距离。

4 仿真实验

为了验证本文信任模型的可行性和有效性，我们利用基于文件共享系统的 Query Cycle Simulator^[20]模拟 P2P 信任评估环境，通过对比 EigenRep 模型^[2]、云模型^[8]和 YuBin 模型^[10]，根据交互成功率，分析本文方法是否能够有效抑制欺骗行为。Query Cycle Simulator 是斯坦福大学开发的基于 P2P 的文件共享系统，特别适合开放网络中多实体间交互建模研究。其中设置 $h = 5$ 和 $\beta = 5$ ，实体总数为 1000 个，文件总数为 10000 个，文件种类 1000 个，且所有文件均匀随机分布在各实体上，并保证每个实体至少拥有一个文件，每轮仿真由若干交互周期组成，在每个交互周期过程中，每个实体必须完成一次交互。实体的初始信任值为 0.5，表示完全不确定的，即信任与不信任都有可能。

4.1 针对防信任骗取行为的仿真

本节实验模拟欺骗实体先伪装成可信服务实体积累较高的信任值，然后进行欺骗行为。该实验旨在比较 4 种模型对信任骗取行为的敏感程度以及惩戒效果，以检验本模型的有效性。如图 2 所示，当实体持续提供可信服务时，随着交易周期的逐渐增长，4 种模型的信任值都呈上升趋势，其中，本文模型的信任值增长更快，这是因为持续因子对信任分量的激励作用。当实体采用不可信交互行为时，本文模型和云模型的信任值降低较快，这是因为两者的惩罚机制导致的。随着不可信交互持续进行，和云模型相比，本文模型下降得更快，这是因为持续不可信因子在逐渐变大，惩罚力度会越来越大，从而能够迅速发现欺诈行为。

4.2 针对防策略性欺骗行为的仿真

本节实验模拟欺骗实体在改善信任和欺诈行为

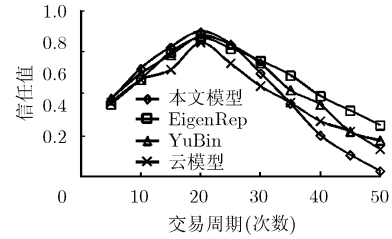


图 2 针对信任骗取行为的实验分析

间振荡，旨在比较 4 种模型对实体动荡行为的敏感程度以及惩戒效果，检验本模型的有效性。如图 3 所示，4 种模型都呈锯齿状下降趋势。但是，当实体进行欺诈后，欲建立声誉时，本文模型的信任值会延迟恢复。这是因为一旦实体实施欺诈行为，最近持续可信服务因子会迅速下降，要建立声誉，必须持续提供可信任服务才行。这也说明了信任易损难获取的特点，旨在激励实体提供可信服务。

4.3 针对恶意实体规模的仿真

本节实验模拟恶意实体比率不断变化，旨在测试本文模型遏制恶意实体行为的有效性。图 4 显示了恶意实体百分比变化时，4 种模型的交互成功率的变化情况。从中可以看出，随着恶意实体比例的增加，4 种信任模型的交互成功率均逐渐下降，但本文模型和云模型下降最缓慢。这是因为这两者的识别和惩罚机制发挥作用。相较于基于云模型而言，本文模型有区分不同交互时间和不同持续因子对信任度的影响，从而有效识别恶意实体。相反，另外两种模型不能有效识别恶意实体，故会误将恶意实体当作可信实体进行交互，导致失败交互次数增多，因此交互成功率下降较快。而本文信任模型即使恶意实体比例达到 50% 时，本文模型的交互成功率也可达到近 60%，说明本文模型能够有效地遏制恶意实体。

4.4 针对不诚实推荐实体的仿真

图 5 所示，随着不诚实推荐实体比例的增加，4 种信任模型的交互成功率均逐渐下降，但基于云模型和本文模型下降较慢，其中本文模型最为缓慢，而且不诚实推荐实体比例达到 50% 时，其交易成功率仍接近 0.75 左右。这是因为基于云模型和本文模型都考虑了推荐实体的可信度，因而交互成功率要高些。相较于基于云模型而言，本文模型依赖于内因和外因：内因是指推荐实体的一致性指标；外因是指从推荐实体的信任程度、不信任程度和不确定程度 3 个方面计算推荐实体相似度。对于不诚实推荐实体，其相应的可信度和一致性程度较低，从而可以减少不诚实推荐实体对综合信任的影响。而另外两种模型没有区分推荐信任的概念，因而不能有

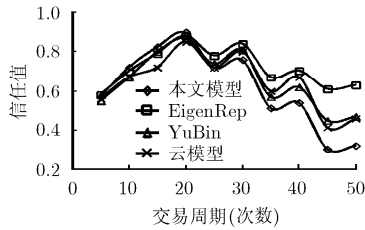


图 3 针对策略性欺骗行为的实验分析

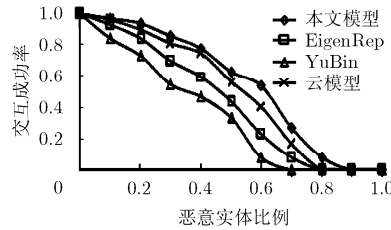


图 4 恶意实体比例变化时交互成功率变化

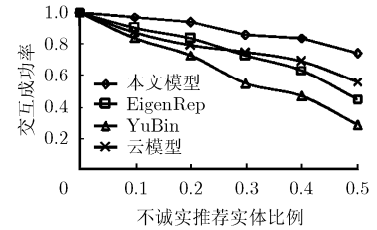


图 5 不诚实推荐实体比例变化时交互成功率变化

效减少不诚实推荐实体对信任的影响，因此交互成功率下降较快。

4.5 针对通信开销的仿真

图 6 所示，当实体总数为 100 时，4 种模型的网络通信开销差别不大，随着实体规模的扩大，它们的网络通信开销差别逐渐显著。其中云模型和本文模型的控制消息数明显比另外两者要少，这表明云模型和本文模型不仅具有抗欺诈能力，而且在通信开销方面也表现出较好效果。与云模型相比，本文模型的控制开销数要略微小一点。

4.6 针对实体规模的仿真

本节实验在实体恶意率固定和恶意率变化两种情况下，模拟 3 种实体规模的交互过程，即实体总数为 100(G_1)、实体总数为 1000(G_2)、实体总数为 10000(G_3)，旨在分析实体规模对实验结果的影响。图 7 所示，在恶意率为 20%的环境下，随着交易周期的增长，3 种实体规模的交互成功率逐渐上升，但与规模 G_1 相比，另外两种的规模的收敛要快，且相对较稳定，表明实体规模较大时，有效交互周期更多，以便进行实验对比分析。图中实体规模 G_2 和 G_3 的变化曲线相对较接近，表明实体规模数达到 1000 时，已具备验证实验的有效性和准确性。图 8 所示，在第 45 个交易周期时，当恶意率由 20%增加到 70%时，规模 G_1 下降最快，这是因为 G_1 规模最小。同时，随着交易周期的推移，我们还发现 G_1 的交互成功率在 0.17 附近振荡，而 G_2 和 G_3 的交互

成功率会回升到 0.35 左右，与 4.3 节的实验结果一致，这是因为一个恶意实体在规模大的环境中更易被遗忘。由此可见，本文设置实体数为 1000 可以较稳定地动态反映实体行为的变化。

5 结束语

针对现有 P2P 信任机制不能较好处理信任的不确定性、不诚实推荐以及权重分配较主观等问题，本文以直觉模糊理论为基础，提出了一种自适应信任模型。该模型的主要特色为：(1)为了较全面刻画信任的主观性和不确定性，模型采用信任直觉模糊数刻画，它不仅包含了可信分量，还包含不可信分量和不确定性分量；(2)以历史评分为基础，结合服务持续性因子和时间衰减因子，既能激励诚信实体提供高质量的服务，又能利用持续不可信服务因子惩罚恶意实体；(3)为了确保推荐实体的可信性，模型充分考虑了实体的相似性和行为一致性，并以此为依据赋予实体相应的权重，从而有效地减少了不诚实推荐实体对信任值的影响；(4)针对直接信任和间接信任权重因子难以客观确定的问题，提出了基于直觉模糊熵的权重自适应分配策略。最后的仿真实验验证了模型的有效性和可行性。

本文在分析研究过程中，没有考虑信息的异质性和多源性，未来将进一步研究多源异质自适应集成信任直觉模糊信息的方法，同时研究该方法在实际环境中应用以便发现更多新问题。

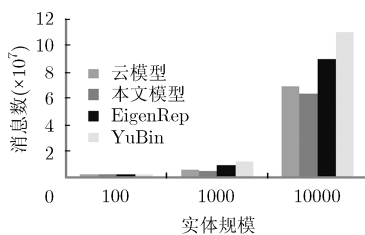


图 6 不同实体规模的网络通信开销

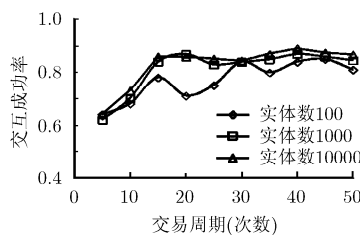


图 7 实体恶意率固定时不同实体规模的曲线

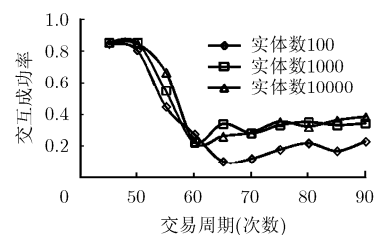


图 8 实体恶意率变化时不同实体规模的曲线

参考文献

- [1] 徐海涓, 齐守青, 卢显良, 等. 一种新的基于概率统计论的 P2P 网络信任模型[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1314-1318. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00179.
- XU H M, QI S Q, LU X L, *et al.* A novel trust model of P2P networks based on theory of probability and statistics[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1314-1318. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00179.
- [2] KAMVAR S D, SCHLOSSER M T, and GARCIA-MOLINA H. The eigentrust algorithm for reputation management in P2P networks[C]. Proceedings of 12th International World Wide Web Conference, Budapest, 2003: 640-651.
- [3] TEACY W T, LUCK M, ROGERS A, *et al.* An efficient and versatile approach to trust and reputation using hierarchical bayesian modeling[J]. *Artificial Intelligence*, 2012, 193: 149-185.
- [4] 张绍武, 林鸿飞, 刘晓霞, 等. 基于概率的信任传播模型[J]. 计算机科学, 2014, 41(8): 90-93.
- ZHANG S W, LIN H F, LIU X X, *et al.* Trust propagation based on probability[J]. *Computer Science*, 2014, 41(8): 90-93.
- [5] CERUTTI F, TONIOLO A, OREN N, *et al.* Subjective logic operators in trust assessment: an empirical study[J]. *Information Systems Frontiers*, 2015, 17(4): 743-762.
- [6] 田俊峰, 吴丽娟. 基于多项式主观逻辑的扩展信任传播模型[J]. 通信学报, 2013, 34(5): 12-19.
- TIAN J F and WU L J. Multinomial subjective logic based extended trust propagation model[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(5): 12-19.
- [7] LIU G, YANG Q, WANG H, *et al.* Assessment of Multi-hop interpersonal trust in social networks by three-valued subjective logic[C]. IEEE Conference on Computer Communications, Shanghai, 2014: 1698-1706.
- [8] 李致远, 王汝传. P2P 电子商务环境下的动态安全信任管理模型[J]. 通信学报, 2011, 32(3): 50-59.
- LI Z Y and WANG R C. Dynamic secure trust management model for P2P e-commerce environments[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(3): 50-59.
- [9] 徐晓斌, 张光卫, 王尚广, 等. 基于轻量云模型的 WSN 不确定性信任表示方法[J]. 通信学报, 2014, 35(2): 63-69.
- XU X B, ZHANG G W, WANG S G, *et al.* Representation for uncertainty trust of WSN based on lightweight-cloud[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(2): 63-69.
- [10] YU B and SINGH M P. An evidential model of distributed reputation management[C]. Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems: Part 1. Bologna, 2002: 294-301.
- [11] 田春岐, 邹仕洪, 王文东, 等. 一种新的基于改进型 DS 证据理论的 P2P 信任模型[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1480-1484.
- TIAN C Q, ZOU S H, WANG W D, *et al.* A new trust based on advance D-S evidence theory for P2P networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(6): 1480-1484.
- [12] 蒋黎明, 张宏, 张琨, 等. 开放系统中一种基于模糊修正的证据信任模型[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 1930-1936. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00063.
- JIANG L M, ZHANG H, ZHANG K, *et al.* An evidential trust model with fuzzy adjustment method for open systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(8): 1930-1936. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00063.
- [13] JIANG L, XU J, ZHANG K, *et al.* A new evidential trust model for open distributed systems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(3): 3772-3782.
- [14] XU Z and CAI X. Intuitionistic Fuzzy Information Aggregation[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 4-16.
- [15] 雷英杰, 赵杰, 路艳丽, 等. 直觉模糊集理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 90-95.
- LEI Y J, ZHAO J, LU Y L, *et al.* Theory and Application of Intuitionistic Fuzzy Set[M]. Beijing: Science Press, 2014: 90-95.
- [16] 韩祺祎, 任梦吟, 文红. 基于拓扑势的 P2P 社区推荐信任模型[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1279-1284. doi: 10.11999/JEIT141303.
- HAN Q Y, REN M Y, and WEN H. Topological potential based recommendation trust model for P2P communities system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(6): 1279-1284. doi: 10.11999/JEIT141303.
- [17] YUE Z. Aggregating crisp values into intuitionistic fuzzy number for group decision making[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(11): 2969-2982.
- [18] TZENG G H and HUANG J J. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications[M]. Florida: CRC Press, 2011: 342-366.
- [19] 吴大鹏, 冯誉, 王汝言, 等. 恶意节点容忍的间断连接无线网络消息转发策略[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7): 1591-1597. doi: 10.11999/JEIT141198.
- WU D P, FENG Y, WANG R Y, *et al.* Malicious node tolerant packet forwarding mechanism for intermittently connected wireless network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(7): 1591-1597. doi: 10.11999/JEIT141198.
- [20] The stanford P2P sociology project[OL]. <http://p2p.stanford.edu/www/demos.htm>, 2000.
- 徐 军: 男, 1982 年生, 博士, 讲师, 研究方向为可信计算和模糊决策.
- 钟元生: 男, 1968 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为信任管理、软件工程和电子商务.
- 万树平: 男, 1974 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为管理决策分析、金融工程和信息融合.