

容迟与容断网络路由协议的综合评估模型

张 龙, 周贤伟, 吴启武

(北京科技大学信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对容迟与容断网络路由协议评估中指标信息的灰色性问题, 提出一种容迟与容断网络路由协议的综合评估模型。该模型采用层次分析法确定评估指标的权重, 利用灰色理论建立评估样本矩阵与评估灰类, 获得灰色评估系数与权重矩阵, 将评估路由协议性能的主观因素限制在很小的范围内, 使评估结果更加客观可信。实验结果表明该模型是有效的。

关键词: 容迟与容断网络; 路由协议; 层次分析法; 灰色综合评估

Comprehensive Evaluation Model for Routing Protocol in Delay and Disruption Tolerant Networks

ZHANG Long, ZHOU Xian-wei, WU Qi-wu

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

【Abstract】 Aiming at the grayness issue of evaluation metrics for performance evaluation of routing protocols in Delay and Disruption Tolerant Networks(DTN), this paper proposes a comprehensive evaluation model for routing protocols in DTN. It uses Analytic Hierarchy Process(AHP) to determine the weighting coefficients of evaluation indexes, applies the method of grey theory to construct the evaluation sample matrix and grey ranking to gain the coefficients of the grey evaluation and the weighting matrix. Based on the model, the subjective factors that influence the performance evaluation are restricted greatly and the objectivity of performance evaluation results is improved. Experimental results show that the model is effective.

【Key words】 Delay and Disruption Tolerant Networks(DTN); routing protocol; Analytic Hierarchy Process(AHP); grey comprehensive evaluation

1 概述

传统 Internet 设计采用 TCP/IP 协议簇作为体系结构, 主要基于如下假设:

- (1) 端到端保证持续连接;
- (2) 较低的丢包率、误码率和传输时延;
- (3) 对称的双向数据速率等。

然而, 现有的受限网络(challenged networks), 如深空网络、车辆网络、战场移动 Ad Hoc 网络, 由于受节点的移动、能量消耗、部署密度、资源有限以及障碍物的阻挡等多种因素的影响, 因此并不满足上述假设中的一个或多个, 具有间歇连接、频繁割裂、时延极高、非对称的数据率、较高的误码率与丢包率以及异构互连等特点。为了实现异构受限网络间的互连与互操作以及异步消息的可靠传输, 容迟与容断网络(Delay and Disruption Tolerant Networks, DTN)^[1]作为一种新型的网络体系结构应运而生。DTN 是未来无线网络发展的一个新方向, 在军事、环保、交通、空间等领域具有广泛的应用前景。

路由是 DTN 的一个核心问题, 由于 DTN 频繁断开的特性, 无法保证实时的端到端路由, 其路由协议设计面临新的挑战。随着 DTN 研究的深入, 近年来提出了许多路由协议及算法^[2], 通过性能评估选择合理有效的路由协议对 DTN 的运行至关重要。现有的 DTN 路由协议性能评估主要采用评估指标对比和仿真比较等, 例如, 文献[2]将路由协议分为确定型和随机型 2 类, 以存储空间、链路状态估计、复杂性、节点移动类型等作为评估指标, 并以列表的方式分析和比较了这

2 类路由协议; 文献[3]在最小期望时延(Minimum Expected Delay, MED)路由算法^[4]的基础上, 提出改进的算法 AMED, 解决了 MED 等算法的应用范围小、计算开销大等问题, 通过仿真实验, 对 ED, MED, MED-PC 和 AMED 算法进行了性能比较。本文针对 DTN 路由协议评估指标信息的灰色性问题, 即不确定性和不完全性, 采用灰色理论和层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)^[5], 提出一种综合评估模型, 将评估路由协议性能的主观因素限制在很小的范围内, 使评估结果更加客观可信。

2 路由协议的评估指标体系

DTN 节点的能量资源、计算与处理能力、通信带宽、存储空间都非常有限, 另外, 虽然 DTN 能够在时延极高的条件下保证消息可靠传输, 但消息传输时延的降低仍会使网络整体性能得到改善。因此, DTN 路由协议设计必须以能量有效、低时延为首要素素。设计有效的路由协议来提高通信连接性、降低能量消耗与时延、增加消息传输率(delivery ratio)成为 DTN 的关键问题。

针对 DTN 的间歇连接、时延极高、数据率低、排队时延

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60773074, 60872046, 60872047); 国家“863”计划基金资助项目(2009AA01Z209); 北京市自然科学基金资助项目(4102042)

作者简介: 张 龙(1983—), 男, 博士研究生, 主研方向: 容迟与容断网络, 认知无线电, 空间通信, 未来信息网络; 周贤伟, 教授、博士后、博士生导师; 吴启武, 博士研究生

收稿日期: 2009-11-25 **E-mail:** iceberg206@163.com

高、节点资源与寿命有限、动态拓扑、安全性差和异构互连等基本特征，结合 RFC 2501 关于评估一般路由协议性能的评估标准，本文采用层次分析法对各评估指标按照指标间的相互关联影响以及隶属关系将指标按不同层次聚集组合，建立了一套合理有效的 DTN 路由协议多层次评估指标体系，如图 1 所示。该体系包括实用性、有效性、安全性和扩展性 4 类一级评估指标及 16 种二级评估指标。

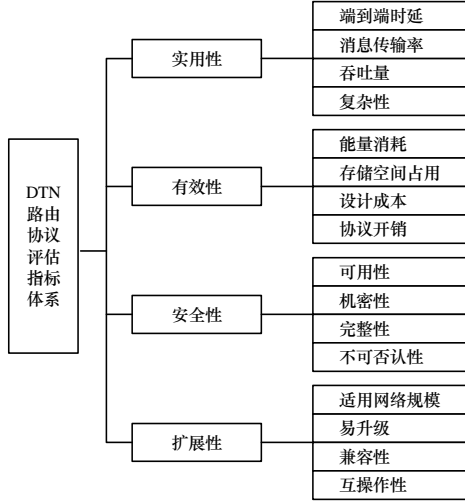


图 1 DTN 路由协议的评估指标体系

(1)实用性是路由协议设计的最基本要求，需要尽可能地降低端到端时延、增加消息传输率和系统吞吐量，进一步降低路由发现、路由选择和路由维护等复杂性要求。

(2)有效性是路由协议必须考虑的一个核心问题，DTN 节点的能量、存储空间、计算与处理能力等都非常有限，因此，路由协议设计要围绕能量消耗、存储空间占用、设计成本和协议开销等进行考虑。

(3)路由协议面临的安全威胁主要有 DoS 攻击、虚假路由信息、确认欺骗、选择性转发等，安全性是路由协议评估的重要指标，包括路由信息的可用性、机密性、完整性和不可否认性等。

(4)针对实际应用情况，路由协议必须能够支持比较大的网络规模，易升级，同时具备兼容性和互操作性等扩展性指标。

3 综合评估模型的设计与实现

由图 1 可知，DTN 路由协议的评估指标是复杂的、多层次的，路由协议的评估很难完全排除主观性和片面性等人为因素的影响，其评估指标信息具有不确定性和不完全性等灰色性特点。本文采用层次分析法确定评估指标的权重，采用灰色理论^[6-7]建立评估样本矩阵与评估灰类，获得灰色评估系数与权矩阵，最终得到 DTN 路由协议的综合评估结果。具体步骤如下：

(1)确定指标集。由图 1 确定一级指标集为 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$ ，其中， $U_i (i=1,2,3,4)$ 表示一级指标；二级指标集为 $V_i = \{V_{i1}, V_{i2}, V_{i3}, V_{i4}\}$ ，其中， $V_{ij} (i,j=1,2,3,4)$ 表示二级指标。

(2)确定二级指标评语集。本文采用 4 级评语集，将评估结果分为“优、良、中、差”，相应的评分分别为 $\{4,3,2,1\}$ ，指标等级介于两相邻等级之间时，相应的评分为 $\{3.5,2.5,1.5\}$ 。

(3)确定 U_i 和 V_{ij} 的权重。权重由 U_i 和 V_{ij} 对 DTN 路由协议性能的重要程度来确定，本文采用层次分析法，通过两两成对的重要性比较建立判断矩阵，通过求解矩阵特征值获得指标的权重。一级指标 U_i 的权重为 a_i ，其权重向量为 $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ ，且满足 $a_i \geq 0$ ， $\sum_{i=1}^4 a_i = 1$ ；二级指标 V_{ij} 的权重为 a_{ij} ，其权重向量为 $A_i = (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4})$ ，且满足 $a_{ij} \geq 0$ ， $\sum_{j=1}^4 a_{ij} = 1$ 。

(4)组织本领域专家或同行对路由协议进行评分。假设有 p 个专家或同行对路由协议按 V_{ij} 的评语集进行评分，第 k 个专家或同行对路由协议评估指标 V_{ij} 的评分为 d_{ijk} 。

(5)建立评估样本矩阵。根据 d_{ijk} 可得评估样本矩阵：

$$D = \begin{bmatrix} d_{111} & d_{112} & \cdots & d_{11p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{141} & d_{142} & \cdots & d_{14p} \\ d_{211} & d_{212} & \cdots & d_{21p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{241} & d_{242} & \cdots & d_{24p} \\ d_{311} & d_{312} & \cdots & d_{31p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{341} & d_{342} & \cdots & d_{34p} \\ d_{411} & d_{412} & \cdots & d_{41p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{441} & d_{442} & \cdots & d_{44p} \end{bmatrix}_{16 \times p}$$

(6)确定评估灰类。本文选取 4 个评估灰类，即“优、良、中、差”4 个等级，记为 $e=1,2,3,4$ ，相应的灰数为：第 1 灰类“优”($e=1$)，灰数 $\otimes_1 \in [4, \infty)$ ；第 2 灰类“良”($e=2$)，灰数 $\otimes_2 \in [0, 3.6]$ ；第 3 灰类“中”($e=3$)，灰数 $\otimes_3 \in [0, 2.4]$ ；第 4 灰类“差”($e=4$)，灰数 $\otimes_4 \in [0, 1.2]$ 。相应的白化权函数 $f_e(d_{ijk})$ 如图 2 所示。

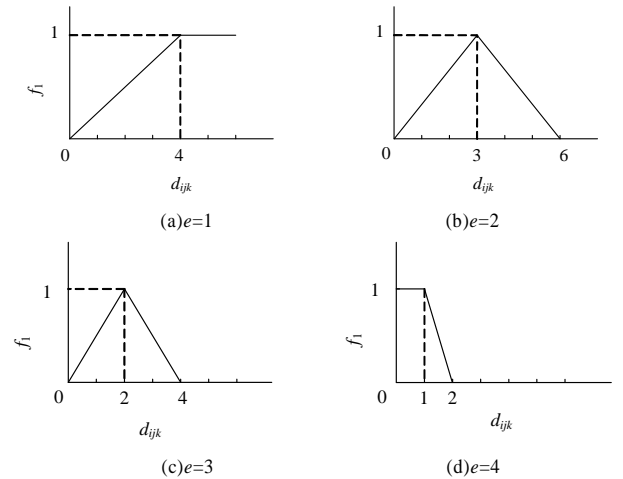


图 2 白化权函数曲线

(7)计算灰色评估系数。对于 V_{ij} ，记路由协议属于第 e 个评估灰类的灰色评估系数为 x_{ije} ，则 $x_{ije} = \sum_{k=1}^p f_e(d_{ijk})$ ；记路由协议属于各评估灰类的总灰色评估系数为 x_{ij} ，则 $x_{ij} = \sum_{e=1}^4 x_{ije}$ 。

(8)计算灰色评估权向量和权矩阵。记路由协议的评估指标 V_{ij} 属于第 e 个评估灰类的灰色评估权为 r_{ije} ，则

$r_{ije} = x_{ije} / x_{ij}$ ；路由协议的评估指标 V_{ij} 属于各评估灰类的灰色评估权向量为 $r_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}, r_{ij4})$ 。综合 V_i 所属指标 V_{ij} 对于各评估灰类的灰色评估权向量，组成灰色评估权矩阵为 $R_i = [r_{i1} \ r_{i2} \ r_{i3} \ r_{i4}]^T$ 。

(9) 计算综合评估值。先对 V_i 进行综合评估，结果记为 $B_i = A_i \cdot R_i = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4})$ 。再对 U 进行综合评估，由 B_i 组成 U 的灰色评估权矩阵： $R = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4]^T$ ，则综合评估结果为 $B = A \cdot R = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ 。最后将评估结果做归一化处理，设定 C 为各评估灰类等级值化向量，即 $C = (4, 3, 2, 1)$ ，则 DTN 路由协议的综合评估值为 $W = B \cdot C^T$ 。根据 W 与灰色评估等级的比较结果，判断该路由协议的性能评估级别，最终获得综合评估结果。

4 实验结果与分析

最小化估计期望时延的 DTN 路由协议——MEED 协议^[8]以端到端时延为度量标准，节点通过滑动历史窗口记录每次接触的连接与断开时间，根据节点的接触历史记录信息，计算期望时延。当节点本地链路状态信息改变时，更新信息以扩散方式传输到所有节点，实现节点间链路状态交换。

本文利用综合评估模型对 MEED 协议进行性能评估，随机选取 10 名本领域专家或同行给予分析评估，统计二级指标评分结果，并在 NS2 仿真平台上验证 MEED 协议各评估指标的有效性，仿真网络大小为 200×200 ，节点数量为 100。根据图 1 的 DTN 路由协议评估指标体系和专家或同行的评分结果，得到仿真网络中 MEED 协议的权重向量以及灰色评估权矩阵：

$$A = (0.40, 0.25, 0.20, 0.15)$$

$$A_1 = (0.45, 0.30, 0.10, 0.15)$$

$$A_2 = (0.32, 0.25, 0.25, 0.18)$$

$$A_3 = (0.42, 0.21, 0.19, 0.18)$$

$$A_4 = (0.26, 0.31, 0.18, 0.25)$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.417 & 0.405 & 0.177 & 0.000 & 0 \\ 0.371 & 0.397 & 0.231 & 0.000 & 0 \\ 0.317 & 0.393 & 0.242 & 0.046 & 2 \\ 0.323 & 0.400 & 0.276 & 0.000 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.428 & 0.420 & 0.151 & 0.000 & 0 \\ 0.301 & 0.355 & 0.272 & 0.071 & 0 \\ 0.241 & 0.321 & 0.413 & 0.023 & 0 \\ 0.297 & 0.381 & 0.274 & 0.045 & 8 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.193 & 0.257 & 0.386 & 0.163 & 7 \\ 0.154 & 0.205 & 0.284 & 0.355 & 7 \\ 0.159 & 0.213 & 0.272 & 0.355 & 0 \\ 0.142 & 0.190 & 0.285 & 0.380 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.297 & 0.365 & 0.337 & 0.000 & 0 \\ 0.307 & 0.379 & 0.390 & 0.023 & 2 \\ 0.272 & 0.363 & 0.318 & 0.045 & 5 \\ 0.287 & 0.367 & 0.321 & 0.023 & 0 \end{bmatrix}$$

由以上结果可得

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 = (0.379 \ 6, 0.400 \ 9, 0.214 \ 9, 0.046 \ 0)$$

同理可得

$$B_2 = (0.326 \ 5, 0.372 \ 4, 0.269 \ 4, 0.031 \ 7)$$

$$B_3 = (0.169 \ 5, 0.226 \ 0, 0.325 \ 0, 0.279 \ 3)$$

$$B_4 = (0.293 \ 5, 0.369 \ 8, 0.315 \ 5, 0.021 \ 1)$$

由 B_i 组成的灰色评估权矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.379 & 0.400 & 0.214 & 0.046 & 0 \\ 0.326 & 0.372 & 0.269 & 0.031 & 7 \\ 0.169 & 0.226 & 0.325 & 0.279 & 3 \\ 0.293 & 0.369 & 0.315 & 0.021 & 1 \end{bmatrix}$$

因此，MEED 协议的综合评估值为

$$W = B \cdot C^T = 2.924 \ 6$$

该结果与 3 接近，所以，评估为“良”。从路由机制上来说，MEED 协议的问题是缺少滑动历史窗口大小的调整机制和安全机制。仿真实验结果表明，MEED 协议能量消耗和复杂性较低，但端到端时延和传输率一般，存储空间占用较大，扩展性和安全性较差，因此，由综合评估模型得到的评估结果与仿真实验结果基本吻合。

5 结束语

本文提出的 DTN 路由协议综合评估模型较好地克服了路由协议评估指标信息的灰色性问题，即不确定性和不完全性，采用灰色理论和层次分析法，将评估路由协议性能的主观因素限制在很小范围内，使评估结果更加客观可信，为 DTN 路由协议的研究提供了一定的基础理论依据和参考。下一步工作是考虑如何量化 DTN 路由协议的评估指标，建立人为干预(如评分)尽可能低乃至非人工干预的高效评估模型，进一步建立 DTN 路由协议的计算机综合评估系统。

参考文献

- [1] Fall K, Farrell S. DTN: An Architectural Retrospective[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(5): 828-836.
- [2] Zhang Zhensheng. Routing in Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks and Delay Tolerant Networks Overview and Challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2006, 8(1): 24-37.
- [3] 陈 飘, 卢汉成, 李津生, 等. 用于延时容忍网络的增强型 MED 路由算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(21): 90-92.
- [4] Jain S, Fall K, Patra R. Routing in a Delay-tolerant Network[C]// Proc. of ACM SIGCOMM'04. Portland, USA: ACM Press, 2004.
- [5] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [6] 胡笙煌. 主观指标评价的多层次灰色评价法[J]. 系统工程理论与实践, 1996, 16(1): 12-20.
- [7] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [8] Jones E P C, Li Lily, Ward P A S. Practical Routing in Delay-tolerant Networks[C]//Proc. of ACM SIGCOMM'05. Philadelphia, USA: ACM Press, 2005.

编辑 张 帆