

# 容忍延迟网络中基于生灭模型的消息控制方法

于海征<sup>1</sup>, 马建峰<sup>1</sup>, 边红<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学计算机网络与信息安全教育部重点实验室 西安 710071; 2. 新疆师范大学数学科学学院 乌鲁木齐 830054)

**【摘要】**提出了在多拷贝传递的基础上增加消息拷贝消除机制,合理地控制了网络中的消息拷贝数。在网络中根据节点相遇时消息拷贝数发生变化的特性,构造了消息拷贝数的离散时间的马尔可夫链,建立生灭模型,进一步验证并得出了平稳分布。通过仿真实验比较,相遇次数与时间基本上是线性关系,与理论模型极为相近。与传染路由比较,采用拷贝消除机制网络中的消息拷贝数有了明显的减少,消息成功传递率达到90%,适当增加延迟时间,能够达到100%。消息拷贝数的平稳分布与仿真实验中基本一致。

**关键词** 生灭模型; 控制; 容忍延迟网络; 路由

**中图分类号** TP393

**文献标识码** A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.01.017

## Message Control Method Based on Birth and Death Model in Delay Tolerant Networks

YU Hai-zheng<sup>1</sup>, MA Jian-feng<sup>1</sup>, and BIAN Hong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Computer Network and Information Security of Ministry of Education, Xidian University Xi'an 710071;

2. School of Mathematical Sciences, Xinjiang Normal University Urumqi 830054)

**Abstract** This paper presents a method of removing copy on the basis of multiple message copies to control message copies reasonably. With the variety characteristic of copies at the encounter of nodes in the networks, we construct the discrete time Markov chain of message copies and set up birth and death model, and then verify and obtain stationary distribution. Simulation result shows that the linear relationship between encounter number and time is almost same with that given by the theory model. In comparison with epidemic routing, the message copies decrease obviously, and the success delivery efficiency of message reaches 90% and even reaches 100% if the delay time is increasing.

**Key words** birth and death model; control; delay tolerant networks; routing

容忍延迟网络(delay tolerant networks, DTN)<sup>[1]</sup>是一种由于节点稀少和节点移动而导致间断性连通的网络。在DTN网络中,源节点与目的节点之间一般不存在端到端的路径,消息的传递往往通过节点存储和移动运载转交给其他移动节点,直到目的节点。这种网络通常延迟比较大,网络拓扑经常发生变化,常应用于星际网络、军事战场网络、野外探索网络、车载网络、水下声纳网络、边远地区通信、灾难恢复及应急响应系统等环境。

在DTN中采用消息多拷贝路由有利于传递的成功率,但是过多的拷贝会引起大量的资源消耗。虽然每条消息都有生存时间(time to live, TTL),但是对于没有先验知识的网络拓扑变化,设置较小的TTL不利于消息的成功传递。本文采用在多拷贝传递的基础上设置消息拷贝消除机制限制网络中的拷

贝数,并获得较高的成功传递率,不但控制了多拷贝导致的冗余,并保证了成功传递。源节点 $S$ 产生要传递到目的节点 $D$ 的消息 $M$ ,在网络中移动,遇见未带有 $M$ 的拷贝的节点 $A$ ,把 $M$ 的拷贝复制后传递给 $A$ ,依次传递,只要带有 $M$ 拷贝的节点遇见未带有 $M$ 拷贝的节点就把 $M$ 再复制传递给对方,这种消息传递方式是传染路由<sup>[2]</sup>的原理,即消息拷贝增长的过程。当带有 $M$ 拷贝的两个节点相遇时,比较获得拷贝的时间先后,先获得消息拷贝的节点删除 $M$ 的拷贝。先得到拷贝的节点先释放,有利于减少拥塞,释放存储空间,即消息拷贝的消除过程。整个过程就是一条消息产生后,消息不断地复制和消除的过程。

本文提出利用一种特殊的马尔可夫链——生灭过程<sup>[3]</sup>具体刻画一条消息产生、被复制转交,网络中消息拷贝数不断增加和消除的过程,建立消息的

收稿日期: 2009-08-18; 修回日期: 2010-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(60702059,60872041,11061035); 中央高校基本科研业务费专项资金(JY10000903001)

作者简介: 于海征(1976-),男,博士生,主要从事移动网络和无线网络安全方面的研究。

生灭过程的数学模型, 并通过仿真实验评估模型的正确性。其特点是: 1) 采用多拷贝转交机制, 利于消息的成功传递; 2) 提出拷贝消除机制, 比较相遇节点的消息拷贝获得时间的先后, 消除早的消息拷贝, 控制网络中的消息拷贝数; 3) 建立消息拷贝数的生灭过程的数学模型, 模型化的分析有利于进一步的研究; 4) 理论模型与实验仿真的比较, 验证了模型的正确性。

## 1 相关工作

传染路由采用所谓的“store-carry-forward”机制, 一个得到消息的节点缓存并移动运载消息传递到相遇的新节点。该新得到消息的节点以同样的方式“传染”其他节点; 最终目标节点首次遇到带有消息的节点, 接收消息, 传递完成。网络中通信量非常低时, 在增加使用缓存空间、带宽和传输能量资源的代价下, 该路由传输延迟最小, 而网络负载增加往往导致链路和存储拥塞。

最近一些基于传染路由的研究被提出, 关于传递延迟和资源消耗之间的开销问题, 如 $K$ -hop机制<sup>[4]</sup>, 为了节省资源, 传递消息必须在 $k$ 跳内到达目的节点, 否则消息被删除; 概率转交<sup>[5]</sup>, 传递消息以到达目的节点的先验知识确定的概率来完成, 相遇节点中超过给定概率阈值, 获得消息; Spray and Wait<sup>[6]</sup>机制, 从源节点发出 $k$ 个消息拷贝到相遇的节点, 然后等待, 直到带有消息拷贝的 $k$ 个节点在网络中移动, 遇到目的节点, 完成消息传递。文献[7]和文献[8]分别针对单拷贝和多拷贝路由机制进行了详细的分析, SMART<sup>[9]</sup>路由协议提出当消息开销被限制在某个界限时可以利用目的节点的伴随节点增加传递机会, 消息源节点在网络中注入固定数量的消息拷贝并传递到目的节点的伴随节点。 $(p, q)$ - Epidemic Routing<sup>[10]</sup>包含了多种形式的DTN路由机制, 如传统的传染路由机制、2-hop转交和概率转交等, 不同的 $(p, q)$ 取值得到不同的机制。Storage routing<sup>[11]</sup>机制利用邻居节点有效的存贮空间存放数据, 当拥塞发生时, Storage routing被激活用于转移一批消息到一组邻居节点存放, 缓解存储压力, 当拥塞减弱时, 收回先前被转移的消息。

传染路由传递消息被形象地称为“传染过程”, 相应的“恢复过程”指的是消息拷贝的消除过程。所提出的消除机制有基于时间器的、设置消息的TTL, 还有基于“疫苗”的, 如anti-packet<sup>[12]</sup>, 目的节点获得消息拷贝后在网络中传播该消息已收到的

信息, 带有该消息拷贝的中间节点遇到anti-packet后删除该消息拷贝。文献[13]采用了两个计数器, 一个用于记录遇到未带消息拷贝的节点, 达到相应设置的阈值, 该节点传递一个消息拷贝给其他节点; 另一个用于记录遇到带有消息拷贝的节点, 达到相应设置的阈值该节点删除消息拷贝, 消息拷贝数得到了控制, 但传递成功率有所下降。

## 2 消息拷贝数的生灭模型

源节点产生一条消息, 通过消息复制传递和拷贝消除, 网络中同一消息拷贝的数量(包括源节点产生的消息)随时间变化, 作为一个随机变量。在某一时刻, 将网络中消息的数量作为一个状态, 如果网络中有 $N$ 个节点, 消息拷贝数最多为 $N$ , 可能的状态就有 $N$ 个, 即 $1, 2, \dots, N$ 。状态的变化发生在节点相遇的时刻, 移动模型影响节点的相遇, 相遇的次数决定了消息拷贝数的状态变化。

假设一对节点相遇后, 交换信息和传播双方的消息拷贝所需要的时间相对于节点移动和传递延迟很小, 在计算中忽略这些时间。相遇时双方在通信范围内能够完成所需要传输的消息。本文研究的模型针对同一条消息及它的拷贝, 对于多个不同的消息作为下一步研究的内容, 文中不做讨论。

### 2.1 移动模型

本文研究DTN路由中节点在移动无线情况下的消息传递, 采用的移动模型是随机路点模型(random waypoint mobility, RWM), 节点按照RWM模型移动有以下几点要求:

- 1) 在网络范围中均匀地选择一个坐标 $X$ ;
- 2) 节点在给定的 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 中随机选择一个速率值, 指向 $X$ 移动;
- 3) 到达 $X$ 时, 随机暂停一段时间 $t$ ,  $t \in [T_{\min}, T_{\max}]$ , 然后转到1)。

尽管该模型在现实环境中有一些问题<sup>[14]</sup>, 但研究DTN过程中仍然被广泛地使用。

### 2.2 节点的相遇模型

消息拷贝数的增加和减少发生在节点的相遇过程, 消息拷贝的复制传递发生在一个带拷贝的节点和一个不带拷贝的节点之间; 消息拷贝的减少发生在两个都带有拷贝的节点之间。文献[15]和[16]分析了在给定移动模型条件下节点的相对速度和相遇率的数学模型。定理1和定理2的证明见文献[16]。通过相对速度和相遇率本文得出相遇次数和时间的关系。

**定义 1** 一对节点的一次相遇是指两个节点从

相互进入信号传输范围开始,直到离开相互信号传输范围的过程。

**定理 1** (相对速度分布)两个节点做直线运动,运动方向随机均匀选择,速率取值于 $[v_{\min}, v_{\max}]$ ,当两个节点的速率分别为 $v_1$ 和 $v_2$ 时,相对速度的概率分布为:

$$P(V \leq v | V_1 = v_1; V_2 = v_2) = \begin{cases} 0 & v \leq |v_1 - v_2| \\ \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{v_1^2 + v_2^2 - v^2}{2v_1v_2}\right) & |v_1 - v_2| < v < v_1 + v_2 \\ 1 & v \geq v_1 + v_2 \end{cases} \quad (1)$$

概率密度函数为:

$$f_V(v | V_1 = v_1; V_2 = v_2) = \begin{cases} \frac{v}{\pi v_1 v_2 \sqrt{1 - \left(\frac{v_1^2 + v_2^2 - v^2}{2v_1v_2}\right)^2}} & |v_1 - v_2| < v < v_1 + v_2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

RWM的平均相对速度的概率密度函数为:

$$f_V(v) = \frac{1}{\ln^2\left(\frac{v_{\max}}{v_{\min}}\right)} \times \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \frac{f_V(v | V_1 = v_1; V_2 = v_2)}{v_1 v_2} dv_1 dv_2 \quad (3)$$

RWM的平均相对速度的期望值为:

$$E[V] = \int_0^{2v_{\max}} f_V(v) dv \quad (4)$$

**定理 2** 一对节点相遇率 $\alpha \approx \frac{2wdE[V]}{A}$ , 其中,

$w$  常量(不同的移动模型有不同的取值);  $d$  节点的传输距离;  $A$  网络范围;  $E[V]$  两个节点的平均相对速度。

**定理 3** 在 $t$ 时间内节点的相遇次数

$\Gamma = \alpha \binom{N}{2} t$ , 其中,  $\binom{N}{2} = \frac{N(N-1)}{2}$ ,  $N$  为节点数。

证明在单位时间内可能发生的所有相遇次数是 $\binom{N}{2}$ , 由定理2中的相遇率可以获知实际发生的相遇次数是 $\alpha \binom{N}{2}$ , 给定时间 $t$ , 可以求出时间 $t$ 内实际发生的相遇次数。

因此, 可知相遇次数 $\Gamma$ 和时间 $t$ 成近似线性关系。如图1所示, 实线为理论模型, 虚线为实验仿真, 仿真环境参考第3节。仿真结果表明实验数据和理论模型的取值极为相似。为了更加直观, 在随后的分

析中用相遇次数取代时间变量。

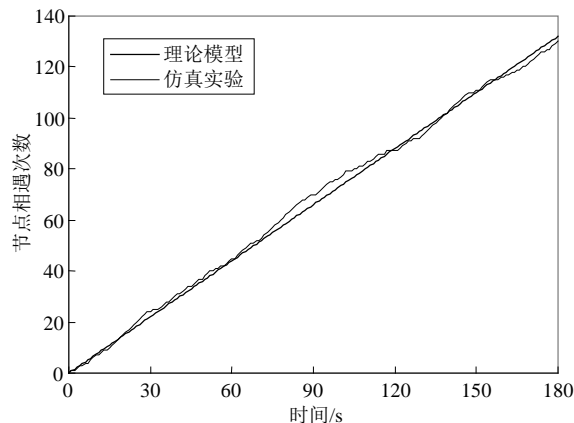


图1 节点相遇次数与时间的关系

### 2.3 生灭过程的模型建立

在网络中, 源节点产生一条消息, 随着传递消息不断复制和消除, 消息拷贝数(包括源节点产生的消息)的变化值作为随机过程中的状态变量, 增加的过程记为“生”的过程, 消除的过程记为“灭”的过程, 整个过程记为“生灭过程”。

#### 2.3.1 生灭过程的基本特性

构造生灭过程满足的基本特性如下:

- 1) 随机过程为一马尔可夫过程;
- 2) 齐次的、非周期的和不可约的;
- 3) 离散时间或连续时间;
- 4) 状态变化发生仅在相邻状态之间;
- 5) 相邻状态的取值变化仅为1, “生”增加1, “灭”减少1, 不发生变化为0;
- 6) 转移概率 $P_{ij}$ 不随时间变化。

本文研究的是离散时间下的有限状态空间的生灭过程, 状态空间为 $\{1, 2, \dots, i, \dots, N\}$ ,  $N$  为网络中的节点数,  $i$  为某时刻消息拷贝数的取值。状态为 $i$ 时, 消息拷贝数为 $i$ , 拷贝数增长过程为传染路由消息传递过程, 带有消息拷贝的节点遇到不带拷贝的节点复制传递一个拷贝, 状态变为 $i+1$ ; 拷贝数的减少过程为两个带有拷贝的节点相遇, 比较消息拷贝获得的时间, 较早的拷贝将被节点消除, 状态变为 $i-1$ ; 如果两个都不带消息拷贝的节点相遇, 状态保持不变, 仍为 $i$ 。

#### 2.3.2 状态转移过程

离散时间随机过程为 $\{X(n) | n \in \mathbb{Z}^+\}$ ,  $X(n) \in \{1, 2, \dots, N\}$ , 状态 $i$ 转移到 $i-1$ 、 $i$ 、 $i+1$ 的概率分别是 $P_{i,i-1} = P(X(m) = i-1 | X(n) = i)$ 、 $P_{i,i} = P(X(m) = i | X(n) = i)$ 、 $P_{i,i+1} = P(X(m) = i+1 | X(n) = i)$ , 为一齐次马尔可夫链, 如图2所示的状态转移图。每个



况, 图中, 实直线为平稳分布均值, 值约为13.3; 上下的虚直线为距离均值的均方差, 值约为2.3。即理论上消息拷贝数概率分布在  $13.3 \pm 2.3$  的范围内。仿真中经过一段时间, 消息拷贝数的值大部分也落在  $13.3 \pm 2.3$  的范围内。

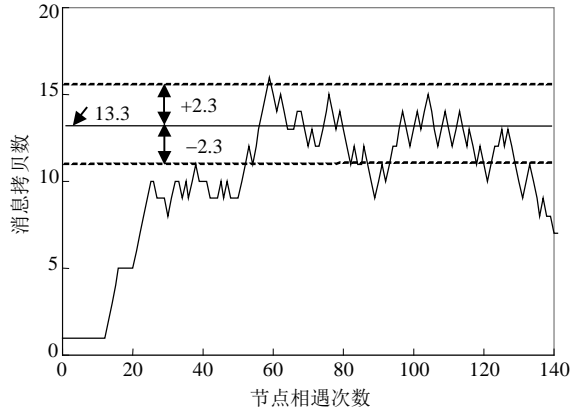


图5 生灭模型平稳分布的均值和均方差与仿真实验比较

## 4 结论

本文在传染路由的基础上提出增加消息拷贝消除机制, 当两个带有同一消息拷贝的节点相遇, 比较拷贝的时间获得的先后, 消除较早的拷贝, 合理地控制了网络中的消息拷贝数。通过消息拷贝数在网络中节点相遇时发生增加或减少的变化, 构造了消息拷贝数的离散时间的马尔可夫链, 并进一步建立了生灭过程模型, 获得了平稳分布。仿真实验中, 相遇次数与时间基本上是线性关系, 与理论模型极为相近。与传染路由比较, 采用拷贝消除机制, 网络中的消息拷贝数有了明显的减少, 虽然消息成功传递率略有下降, 但是适当增加延迟时间, 成功传递率能够恢复。通过模型计算出的消息拷贝数的平稳分布的概率分布区间和仿真实验中消息拷贝数的分布区间基本一致。

### 参考文献

- [1] FALL K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets[C]//Proceedings of ACM SIGCOMM 2003. Karlsruhe, Germany: ACM Press, 2003: 27-34.
- [2] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially connected Ad hoc networks[R]. Duke University, Technical Report CS-200006, 2000.
- [3] WANG Z K, YANG X Q. Birth and death processes and Markov chains[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [4] SHARMA G, MAZUMDAR R, SHROFF N B. Delay and capacity trade-offs in mobile Ad hoc networks: A global perspective[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(5): 981-992.
- [5] HAAS Z J, SMALL T. A new networking model for biological applications of ad hoc sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(1): 27-40.
- [6] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks[C]//Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking. Philadelphia: ACM Press, 2005: 252-259.
- [7] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the single-copy case[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(1): 63-76.
- [8] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multiple-copy case[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(1): 77-90.
- [9] TANG L, ZHENG Q, LIU J, et al. Selective message forwarding in delay tolerant networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2009, 14(4): 387-400.
- [10] MATSUDA T, TAKINE T. (p,q)-epidemic routing for sparsely populated mobile Ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(5): 783-793.
- [11] SELIGMAN M, FALL K, MUNDUR P. Storage routing for DTM congestion control[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2007, 7(10): 1183-1196.
- [12] SMALL T, HAAS Z J. Resource and performance tradeoffs in delay-tolerant wireless networks[C]//Proceedings of 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking. Philadelphia: ACM Press, 2005: 260-267.
- [13] WALKER B D, GLENN J K, CHARLES C T. Analysis of simple counting protocols for delay-tolerant networks[C]//Proceedings of ACM CHANTS. Canada: ACM Press, 2007: 19-26.
- [14] YOON J, LIU M, NOBLE B. Random waypoint considered harmful[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM. USA: IEEE Press, 2003: 1312-1321.
- [15] GROENEVELT R, NAIN P, KOOLE G. The message delay in mobile ad hoc networks[J]. Elsevier Journal of Performance Evaluation, 2005, 62: 210-228.
- [16] GROENEVELT R. Stochastic models for ad hoc networks [D]. France: INRIA Sophia Antipolis, 2005.

编辑 蒋晓