

节点转发消息能力动态估计的缓存替换策略

吴大鹏, 白娜*, 王汝言

(重庆邮电大学 宽带泛在接入技术研究所, 重庆 400065)

(*通信作者电子邮箱 baixiwo68@163.com)

摘要: 机会网络中的节点以“存储-携带-转发”的方式完成消息转发, 消息需要在中继节点缓存较长时间以等待通信机会, 高效的缓存替换策略能够提高有限缓存空间的利用率。提出一种基于节点转发消息能力的自适应缓存替换策略。通过动态地感知当前的消息传输状态, 并根据其在此节点中的停留时间和消息转发状态, 估计节点对该消息的转发能力, 进而调整消息的转发以及删除优先级。结果表明所提出的缓存替换策略能够有效提高消息的成功投递率, 并大幅度地降低网络负载率。

关键词: 机会网络; 移动自组网; 缓存替换; 消息缓存时间; 节点转发能力

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Adaptive cache management strategy with node forwarding ability estimation

WU Dapeng, BAI Na*, WANG Ruyan

(Broadband Ubiquitous Network Research Laboratory, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In the manner of storing-carrying-forwarding, nodes can communicate with each other in opportunistic network, and the messages should be stored at intermediate nodes for a longer time to wait for communication opportunity. As can be seen, the limited buffer should be utilized reasonably with effective buffer management strategy. Based on the estimation method of nodes forwarding ability, an adaptive buffer management strategy was proposed. According to the status of message transmission in the network, the ability of message forwarding of the node can be evaluated by combining the store time of message. Furthermore, the priority on messages forwarding and deleting can be decided dynamically and adaptively. The results show that the proposed buffer management mechanism can effectively improve the delivery probability, and reduce the load ratio greatly.

Key words: opportunistic network; Mobile Ad-Hoc Network (MANET); buffer replacement; messages store time; node forwarding ability

0 引言

移动自组织网络 (Mobile Ad-Hoc Network, MANET) 采用“存储-转发”方式传输消息, 源节点和目的节点之间需要预先获知网络拓扑和节点信息, 并建立完整的端到端路径^[1]。在实际应用过程中, 上述要求往往无法满足。区别于 MANET, 研究人员提出了一种以“存储-携带-转发”方式承载消息的机会网络^[2], 以充分利用节点移动带来的通信机会。机会网络以更加灵活的方式实现了消息转发, 虽然消息传输过程的延迟较大, 但是在诸如普林斯顿大学设计的机会网络系统 ZebraNet^[3]、商业应用 BlueBlitz^[4]、麻省理工大学 (MIT) 开发的一个用于路况监控、环境监测等的车载机会网络 CarTel^[5] 以及 MIT 在印度偏远地区部署的 DakNet^[6] 等场景下, 此种转发方式具有较强的实用性。

此种网络架构下, 节点移动将使网络连接频繁地中断, 消息可能需要长时间存储在本地缓存中以等待通信机会, 使得消息携带节点的存储空间消耗较快。相比传统的 MANET 而言, 其对缓存容量有着更高的要求。此外, 由于机会网络固有的不确定性、网络状态未知以及节点邻居状态变化性极强等特点, 因此, 消息转发方法多采用多副本策略, 但冗余消息副本将节点有限的缓存空间迅速占满, 无法接收将要到达的消

息, 导致网络性能降低。显然, 有效的缓存管理策略对机会网络至关重要。

目前, 研究人员提出了多种缓存管理方法。在文献[7]中, 作者认为消息被转发的次数决定了其被成功投递的概率。当缓存已满时, 根据转发次数决定是否携带消息, 并设定相应的门限值, 优先删除转发次数高于门限值的消息; 但此方法只考虑消息的转发次数, 没有考虑节点转发消息能力对网络性能的影响。在文献[8]中, 作者认为存活时间决定了其被成功投递的概率。因此, 当缓存已满, 优先删除存活时间最长的消息; 但消息是否能够成功投递由多个因素决定, 单独地使用存活时间这一个参数不能准确反映消息状态。结合人类移动模式理论^[9], 即大多数人平时总是频繁往返于少数特定地点, 文献[10]认为若数据项的目标地址在节点频繁往返的若干个地点的范围之内, 则表明节点与数据项的相关度高, 进而, 将此数据项称为该节点的匹配项, 在数据替换时优先保留这样的数据项; 但此方法在野生动物追踪等非人类社区模型下无法体现, 适用范围有限。

显然, 合理地删除冗余消息副本是设计高效机会网络缓存管理的关键问题。本文提出适用于机会网络动态感知节点转发消息能力的自适应缓存管理策略 (Adaptive Cache Management strategy with Forwarding Ability, FA-ACM), 以更加

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2012-12-03。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61001105, 60972069)。

作者简介: 吴大鹏 (1979-), 男, 黑龙江大庆人, 副教授, 博士, CCF 会员, 主要研究方向: 泛在无线网络、社会计算、互联网服务质量控制; 白娜 (1988-), 女, 陕西榆林人, 硕士, 主要研究方向: 机会网络; 王汝言 (1969-), 男, 湖北黄冈人, 教授, 博士, CCF 会员, 主要研究方向: 空间光通信、光网络、光信息处理、通信网络可靠性与故障管理。

有效地利用节点存储空间,提高消息成功投递率,同时达到大幅度地降低网络资源开销的目的。

1 FA-ACM 缓存管理策略

由机会网络的传输原理可知,消息在网络中的副本数越多,则其被成功投递的概率就越大^[11]。多副本路由机制的本质是两节点进入通信范围之后,将对方没有缓存的消息进行复制,以使得消息副本能够通过多个节点转发,从而提高消息成功投递率。但节点缓存容量有限,且消息的副本数过多,易造成节点缓存迅速占满。因此,合理的缓存管理策略需要根据消息状态对缓存进行动态调整。

研究表明,消息的传输状态与携带节点的转发能力直接相关。节点转发该消息能力越强,表明该消息获得转发机会越多,则通过此节点携带的消息成功投递概率越大。由此易知,节点的转发能力直接反映了其所携带消息的成功投递概率。可见,在机会网络中,节点转发消息的能力是影响消息成功投递的关键因素,且过多地对此节点转发概率较低的消息进行存储并携带将严重浪费有限的网络资源。因此,在机会网络的缓存管理策略中,需要充分地考虑节点转发消息的能力,以从宏观上避免拥塞的发生,同时提高机会网络中缓存管理的有效性,进而提高整个网络性能。

1.1 消息状态动态感知

消息在节点缓存中的停留时间是指从接收消息到当前时刻所经历的时间,该参数描述了消息占用缓存的时长,且是评估节点转发该消息能力的关键参数,如式(1)所示。显然,该参数小于消息的生存时间(Time To Live, TTL)。

$$t_{\text{stay}} = t - t_{\text{rece}} \quad (1)$$

其中: t_{stay} 指消息在节点中的停留时间, t_{rece} 指消息的接收时间, t 指当前时刻。

在拓扑结构时变性极强的机会网络中,节点频繁地接收消息。同时,当节点缓存已满时需要按照相关的规则删除冗余消息,因此节点缓存中的消息不断更新。可见,某个消息在节点缓存的停留时间无法准确地衡量节点转发该消息的能力,需要综合考虑多个消息在节点缓存中的平均停留时间。该参数描述了消息占用缓存的平均时长,根据式(1)计算得到的消息在节点缓存中的停留时间,同时结合网络中节点记录的本地信息,消息的平均停留时间如式(2)所示:

$$t_{\text{ave}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{\text{stay}})_i \quad (2)$$

其中: n 指节点中消息个数, $(t_{\text{stay}})_i$ 指消息 i 在节点缓存中的停留时间, t_{ave} 指节点中所有消息的平均停留时间。

消息在节点缓存中的停留时间从某种程度上可以反映消息在网络中的状态,但单纯地以停留时间为参数,难以完全地感知网络中消息状态。因此本文方法还考虑了消息的剩余生存时间,该参数描述了消息在网络中已存活的时间与消息TTL之间的差值。显然,若消息在网络中的剩余存活时间越少,表明消息在网络中的副本数可能越多,消息的成功投递概率越大,则消息在网络中继续缓存的必要性越低。消息剩余生存时间的计算方法如式(3)所示:

$$t_m = t_{\text{TTL}} - (t - t_{\text{gene}}) \quad (3)$$

其中: t_m 指消息在网络中的剩余存活时间, t_{TTL} 指消息的存活时间, t_{gene} 指消息的产生时间, t 指当前时刻。

1.2 缓存替换决策

在稀疏间断连接的机会网络中,利用节点间的相遇机会进行消息的转发,但因链路的生存时间有限,导致某些消息得

不到转发机会。因此,为了获知节点转发消息能力,需要综合考虑消息的转发状态。该参数描述了当前节点是否转发过该消息,很大程度上反映了此节点转发该消息的能力。消息的转发状态用布尔值表示:

$$B_{\text{nofor}}^m = \begin{cases} 1, & \text{节点没有转发过该消息;} \\ 0, & \text{节点转发过该消息} \end{cases} \quad t_{\text{stay}} > t_{\text{ave}} \quad (4)$$

其中 B_{nofor}^m 指节点自身转发消息 m 的状态。显然,若在消息的停留时间大于消息的平均停留时间的条件下,节点没有转发过消息 m , 则从某种程度上表明当前节点转发消息 m 的能力较低。

在动态性极强的机会网络中,当两个节点进入通信范围之后,开始执行消息传输相关操作,受到节点运动方向与通信范围的限制,链路的生存时间有限,若可传输消息的最大值小于所传消息的大小,将导致消息无法成功转发,且重传过程将极大地浪费网络资源。因此,为了更全面地估计此节点转发该消息的能力,需要考虑链路生存时间与消息大小之间的关系。根据式(4)的结果,节点能够获知给定消息的转发状态,若转发状态的值为1,说明该消息的大小超出节点可传输消息的上限,则优先删除这样的消息,为需要接收的消息留出足够的缓存空间。

节点对该消息的转发能力描述了其所携带消息的成功转发概率,本文所提出的消息状态动态感知方法综合考虑了消息扩散状态、消息的转发状态以及消息的大小,进而估计此节点转发该消息的能力。显然,若当前节点转发该消息的能力越低,表明此节点缓存该消息的价值越低,则节点删除该消息的概率就越高。节点转发该消息能力的定义如式(5)所示:

$$P_{\text{ability}}^m = B_{\text{nofor}}^m \cdot \exp\left(-\frac{s_m}{t_m} |t_{\text{stay}}^m - t_{\text{ave}}|\right) \quad (5)$$

其中: P_{ability}^m 指当前节点转发消息 m 的能力, s_m 指消息 m 的大小, t_m 指消息 m 在网络中剩余存活时间, t_{stay}^m 指消息 m 在节点中的停留时间。

通过式(5)可以看出在值为1的情况下,消息在节点缓存中的停留时间和消息的平均停留时间的正差值越大,且消息的大小与消息在网络中的剩余存活时间的比值也越大,则表明节点自身删除该消息的概率越大。一方面是因当前节点遇到的节点都已缓存该消息,所以节点自身不需要转发该消息,则优先删除这样的消息;另一方面是因该消息的大小超出节点可传输消息的最大值,每次转发该消息的过程中,连接将出现中断,导致此消息无法成功转发,则优先删除这些缓存意义较低的消息。此外,对于网络中剩余存活时间即将耗尽的消息,且当前节点转发该消息的能力又较低,意味着缓存该消息的价值降低,则优先删除这样的消息,从而增加了网络中消息的实效性。

1.3 消息队列管理

基于节点转发消息能力的自适应缓存管理策略,主要包括消息转发的优先级与消息携带决策两个方面。机会网络中的节点按照一定的规律进行运动,节点运动过程中将记录自身与其他节点所转发的消息,进而根据历史数据预测节点转发该消息的能力;同时,相应的预测结果需要随着消息状态动态感知所得到的信息以及消息的转发状态进行实时的更新。当两节点相遇之后,节点根据自身转发消息能力的大小将对方没有缓存的消息进行排序,转发能力较大者位于缓存的头部,当节点相遇并传输消息时,头部消息优先获得转发权。与传统的随机交换方式不同,通过这种方式,优先存储有效的消息,提高了缓存利用率。图1中缓存保存了 n 个消息,节点转

发这些消息的能力满足: $P_{ability}^{m_1} < P_{ability}^{m_2} < \dots < P_{ability}^{m_{n-1}} < P_{ability}^{m_n}$ 。

消息携带决策分为两种情况:当缓存中有足够空闲空间,则节点正常地接收并存储来自其他节点的消息;否则,比较节点转发消息的能力,从转发能力最低的消息开始执行删除操作(如图1所示),直到为需要接收的消息留出足够的缓存空间;否则拒绝接收此消息。与传统的缓存替换策略^[12]优先删除队首或者队尾的方式不同,通过这种方式缓存更有价值的消息,充分发挥节点转发消息的能力以及节点的存储能力,提高消息成功投递概率。

Message ₁	Message ₂	...	Message _{n-1}	Message _n
----------------------	----------------------	-----	------------------------	----------------------

图1 消息队列管理

基于节点转发消息能力的自适应缓存替换策略 FA-ACM 算法伪代码如下:

```
// mi 为需要接收的消息
if ( free cache space < mi.size ) {
    // collection 为节点中消息的集合
    for ( m: collection ) {
        if ( m.tstay > tave && BnoForm ) then
            // BnoForm 值为1 指节点没有转发过消息 m
            insert m in Delete_Queue;
            // Delete_Queue 为需要删除消息的队列
        }
        Sort ascending Delete_Queue by Pabilitym;
        // Pabilitym 为当前节点转发消息 m 的能力
        for ( j = n - 1; j >= 0; j-- ) { // n 为 Delete_Queue 的大小
            if ( free cache space < mi.size ) then
                Call deleteMessage ( Delete_Queue.get(j) );
                //按照 Pabilitym 的值从小到大依次删除消息,
                //直到为接收的消息留出足够缓存空间
                freeBuffer += m.size;
            }
        }
        if ( free cache space >= mi.size ) then
            Call MessageReceive( mi );
            //调用函数接收消息 mi
        else
            Refuse to receive mi;
            //拒绝消息 mi, 并结束本次消息的接收
    }
}
```

2 性能与仿真结果分析

本文采用机会网络环境 (Opportunistic Network Environment, ONE)^[13] 对所提出的机制在社区模型^[14]下进行验证。路由协议采用 Epidemic^[15]算法,仿真参数设置如表1。

表1 仿真参数设置

参数	数值	参数	数值
网络大小/(m × m)	4 500 × 3 400	传输范围/m	10
仿真时间/s	43 200	传输速度/(KB · s ⁻¹)	250
节点运动模型	社区模型	消息大小/KB	[200, 300]
节点个数	126	消息生存时间/min	300

本文通过与尾部删除 (Drop_Tail)、头部删除 (Drop_Front) 以及删除缓存中最老的消息 (Drop_Oldest), 在缓存大小和消息产生间隔时间的变化之下, 分别从投递延时、投递率和投递开销这三面进行了比较与分析。本章首先基于节点缓存大小在 2 ~ 10 MB 的情况对 FA-ACM 与其他三种算法的性能进行比较。实验结果数据为运行多次得到的平均值, 其中消息产生时间间隔为 25 ~ 35 s。

消息成功投递率定义为投递成功消息的数量与产生消息总数的比值, 随着缓存容量的增加, 消息被删除的可能性越

小, 消息的成功投递率就会越大。由图2的结果可以看出, 在缓存容量较小的情况下, FA-ACM 的性能更突出。比 Drop_Oldest 高出约 40%, 而远远高于其他两种算法的成功投递率。其主要原因在于本文所提出的缓存替换策略综合考虑了节点转发该消息的能力使消息的删除上选择更加合理, 有效地提高了网络资源的利用效率。

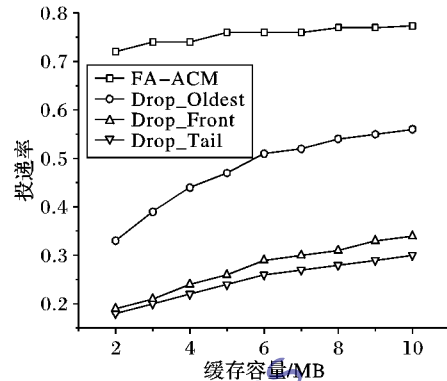


图2 不同缓存容量下的投递率

投递开销定义为节点转发消息中未成功投递消息与成功投递消息的比值。不同删除策略的投递开销如图3所示。由图可知, 随着缓存容量的增加, Drop_Tail 与 Drop_Front 的投递开销越来越小。这是因为缓存容量越大, 消息可以在缓存中保存的时间就会越长, 这样消息中转的次数下降, 投递开销相应地也下降, 而 Drop_Oldest 与 FA-ACM 的投递开销变化比较平稳。同样, 在缓存较小的情况下, 本文提出的方法的性能更突出, 与投递开销最好的 Drop_Oldest 相比, 大幅度地降低了投递开销。

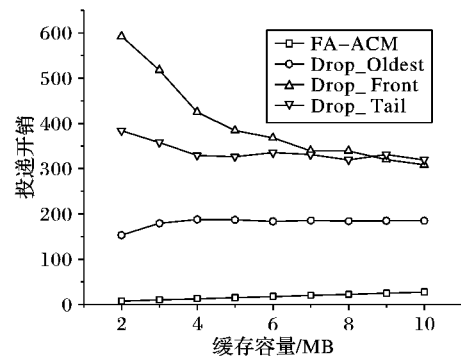


图3 不同缓存容量下的投递开销

平均投递延时定义为从消息产生至消息成功投递到目的节点的时间总和的平均值。图4比较了所提出的缓存替换策略与其他删除策略的消息平均投递延时。由结果可知, 本文提出的缓存替换策略在时延高于与其他三种算法。其主要原因在于所提出的缓存替换策略并没有盲目地删除消息或转发消息, 从而使平均延时明显增大。

另一方面, 基于不同消息产生时间间隔值的情况下对 FA-ACM 与其他三种算法的性能进行比较与分析。实验结果数据为运行多次得到的平均值, 其中节点缓存大小为 10 MB。

图5反映了各种算法在不同消息产生时间间隔值下的消息成功投递率表现, 可以看出各种算法的消息成功投递率随着消息产生时间间隔的增大而表现出一个上升的趋势。其原因是消息产生时间间隔越大可以产生越少的消息, 避免了网络拥塞。因此不同算法的消息成功投递率均有所提高, 而且 FA-ACM 在上升趋势中的表现比其他缓存策略更加优异。

图6在消息平均投递开销方面对所提出的缓存替换策略与其他删除策略进行比较。由图6可知, 在不同消息产生时

间间隔的情况下,本文提出的缓存替换策略的投递开销远远低于其他三种算法。这是因为 FA-ACM 综合考虑了消息在节点中的停留时间与消息的转发状态这两个关键因素的影响。因此,在删除消息的选择上更加具有目的性,存储了重要程度更高的消息;此外,及时替换掉剩余存活时间较短的消息不仅增加了成功投递的消息数量且提高了网络中消息的实效性,同时大幅度地降低了投递开销。

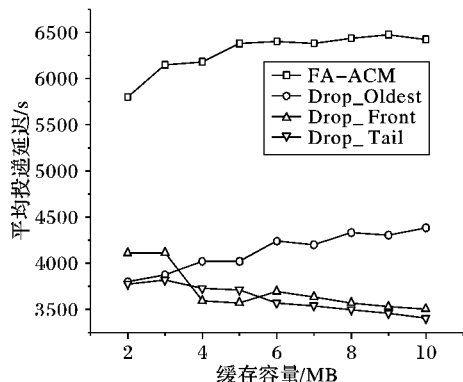


图4 不同缓存容量下的投递延时

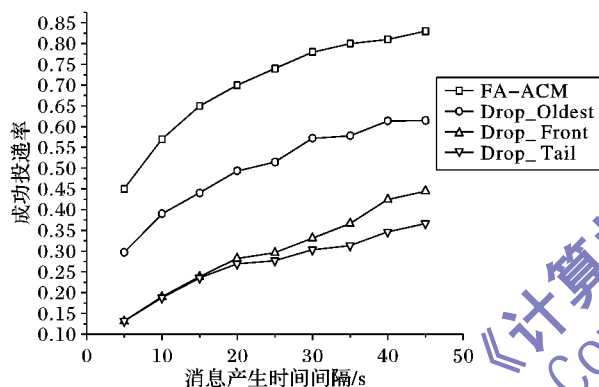


图5 不同消息产生时间间隔时的投递率

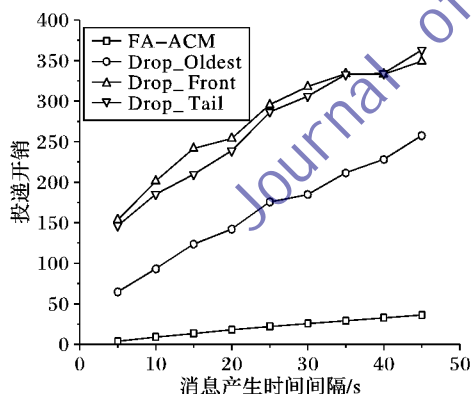


图6 不同消息产生时间间隔时的投递开销

图7反映了各种算法在不同消息产生时间间隔下的平均投递延时。可以看出各种算法的平均投递延时随着消息产生时间间隔的增大而表现出一个下降的趋势。由于网络中存在的消息数量较少,这样消息不仅可以获得更多的转发机会而且避免了网络拥塞,因此所有比较算法的平均投递延时均有所降低。同时可以注意到当消息产生时间间隔较大时,所有比较算法的平均投递延时的变化均趋于平稳。

3 结语

针对缓存管理选择删除消息的盲目性,本文利用节点转发消息的能力,自适应地选择需要删除冗余的消息,缓存更有价值的消息,从而提高了网络资源的利用率,且具有较强的适

应性。仿真结果表明,本文提出的缓存替换策略增加了消息的成功投递率,并大幅度地降低了投递开销。

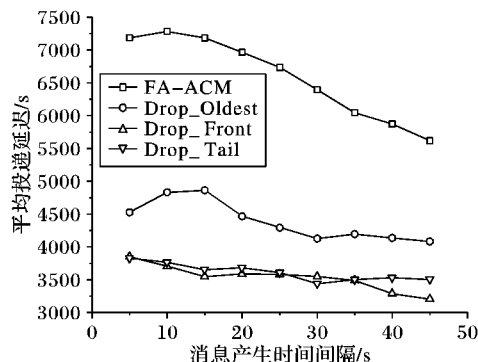


图7 不同消息产生时间间隔时的投递延时

参考文献:

- [1] 田敏, 刘占军, 李云, 等. 一种基于节点度数的 Ad Hoc 网络稳定路由协议[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2007, 19(5): 558-561.
- [2] 熊永平, 孙利民, 牛建伟, 等. 机会网络[J]. 软件学报, 2009, 20(1): 124-137.
- [3] JUANG P, OKI H, WANG Y, et al. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with ZebraNet[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. New York: ACM, 2002: 96-107.
- [4] JUNG S, LEE U, CHANG A, et al. BlueTorrent: cooperative content sharing for Bluetooth users[C]// Proceedings of the 5th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 47-56.
- [5] HULL B, BYCHKOVSKY V, ZHANG Y, et al. CarTel: a distributed mobile sensor computing system[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2006: 125-138.
- [6] PENTLAND A, FLETCHER R, HASSON A. DakNet: rethinking connectivity in developing nations[J]. Computer, 2004, 37(1): 78-83.
- [7] BALASUBRAMANIAN A, LEVINE B, VENKATARAMANI A. DTN routing as a resource allocation problem[C]// Proceedings of the 2007 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. Kyoto: ACM, 2007: 373-384.
- [8] 朱金奇, 刘明, 龚海刚, 等. 延迟容忍移动传感器网络中基于选择复制的数据传输[J]. 软件学报, 2009, 20(8): 2227-2240.
- [9] GONZÁLEZ M C, HIDALGO C A, BARABÁSI A L. Understanding individual human mobility patterns[J]. Nature, 2008, 453: 779-782.
- [10] 叶辉, 陈志刚, 赵明. ON-CRP: 机会网络缓存替换策略研究[J]. 通信学报, 2010, 31(5): 98-107.
- [11] ZHANG Z S. 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.
- [12] TANG S S, LI W. QoS provisioning and queue management in mobile Ad Hoc networks[C]// WCNC 2006: Proceedings of the IEEE Wireless Communication and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2006: 400-405.
- [13] KERÄNEN A, OTT J, KÄRKÄINEN T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques. New York: ACM, 2009: 1-10.
- [14] 吴大鹏, 孔晓龙, 王汝言, 等. 节点重要程度感知的分布式 DTN 结构检测机制[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(7): 2645-2649.
- [15] AMIN V, DAVID B. Epidemic routing for partially connected Ad Hoc networks[R]. Durham NC, USA: Duke University, 2000.