

间断连通移动有组织网络中延时有界的概率路由策略^①

李咸宁^② 安建伟 周贤伟

(北京科技大学信息工程学院通信工程系 北京 100083)

摘 要 针对间断连通移动自组织网络(ICMAN)实际应用中对消息的送达率、发送延时及开销三项重要指标的要求,本文借助于发送延时的概率模型,分析了这三项指标的相互关系,进而提出了一种综合考虑这三种指标的延时有界的概率路由策略(BDPBR),其特点是重视精确的延时指标,而非现有算法关注的消息的平均传输延时,能以给定概率保证消息的端到端发送延时。仿真结果表明,该策略能够通过调整必需发送概率(RDP)和必需传输延时(RDD)来控制消息的实际发送率和发送延时,同时可根据 RDP 和 RDD 来调整系统开销,可按用户设定的送达率与延时指标以相应的代价发送消息,适应不同的服务要求。

关键词 Ad hoc, 路由协议, 延时, 概率

0 引 言

移动自组织网络(mobile Ad hoc network, MANET)在某些特殊应用场景中具有间断连通的特点,如车辆通信等节点移动速度较快的应用以及野外科考等节点分布稀疏的应用。因此,文献[1-3]提出了间断连通移动自组织网络(intermittently connected mobile Ad hoc network, ICMAN)的概念,在 ICMAN 中节点间具有间断连通的特性,且在任意时刻均不存在从源节点到目的节点的多跳路径^[4,5]。在这种情况下,传统的 MANET 路由协议无法正常工作。国内外的一些研究人员已提出了几种基于存储-等待-转发的 ICMAN 路由协议,这些协议大多数以 Epidemic 路由协议^[6]为基础进行改进。Epidemic 路由协议使用泛洪的消息传输方式,借助于节点的移动性,最终将消息送达至目的节点。它能达到最优的消息传输延时,但同时也带来了大量的冗余消息副本,增加了通信开销。为了减少开销,文献[3,7-9]提出了改进的启发式泛洪路由策略,但它们不能灵活地控制通信开销和传输延时,仅能基于经验来调整参数。文献[2]从降低通信开销的角度出发,提出了一种单消息副本的路由算法,但实验结果表明该算法明显增加了传输延时,降低了消息送达率。为

此,Spyropoulos 等人^[10]提出了一种更有效的路由策略,它根据用户所期望的平均传输延时来确定消息副本数,以此来控制总通信开销。文献[11]在此基础上,进一步提高了路由算法的性能,但仍不能保证每次消息发送的传输延时,实际上用户更关注每次消息发送的传输延时,仅提供消息的平均传输延时降低了路由策略的可用性。

本文证明当节点按照随机游走(random waypoint)模型^[12]移动时,端到端的发送延时服从超负指数(hypoexponential)概率分布,基于该结论提出了一种保证每次发送延时指标的路由策略,它以用户设定的概率来保证消息发送的延时指标,并可根据用户所设定的概率及延时指标动态控制通信开销。

1 建模与分析

1.1 模型及问题描述

本文采用的网络模型与文献[13-15]相似,模型中各节点在同一平面中的有限区域内移动,且假设两节点只有在相遇时才可通信。该模型所有节点均符合 uniform 移动模型^[16],它由 random waypoint 模型衍生而来。此外,本文假设节点间的通信量足够小,且缓存队列足够大,这样可保证不发生缓存竞争,同时也可保证当节点相遇时,节点能够在分离之前完

^① 863 计划(2007AA01Z213/2007AA01Z234)和国家自然科学基金(60573050)资助项目。

^② 女,1983 年生,硕士;研究方向:无线移动自组织网,网络安全;联系人,E-mail:kettie@163.com
(收稿日期:2008-01-28)

成消息转发。

该随机网络模型中节点间的相遇时间(meeting time)定义为从节点上次分离到再次相遇的时间间隔,节点 i 和 j 的相遇时间用 τ_{ij} 表示。网络拓扑结构可用赋权无向图 $G(V, E)$ 进行描述,其中 V 为由各个节点组成的节点集, E 为由各节点对组成的边集,节点间相遇时间的期望值为边的权值。

由于 ICMAN 中不存在从源节点到目的节点的连通路经,因此,ICMAN 中普遍采用存储-等待-转发的方式进行消息发送,这增加了消息发送延时。虽然部分应用可以容忍较高的延时,但仍需要一个合理的传输延时上限。由前述网络模型可知,ICMAN 中的传输延时是一个随机变量,因此应使用概率描述形式

$$\Pr\{d \leq d_{\text{bounded}}\} \geq \Phi \quad (1)$$

来描述应用对传输延时的要求,其中 d 为传输延时, d_{bounded} 为最大的传输延时, Φ 为达到延时要求的最小概率。因此,传输延时指标由 d_{bounded} 与 Φ 构成。

本文的研究目标是设计一种可以满足传输延时指标并能有效控制通信开销的 ICMAN 路由策略。

1.2 理论分析

在本模型中借助于相遇时间的统计均值,可以对端到端的传输延时进行有效预测,以便更准确地调整消息传输策略。

本文使用与文献[13,14]类似的网络模型,文献中已证明了节点间的直接传输延时服从指数分布,因此节点间的相遇时间也服从指数分布。设 τ_{ij} 为节点 i 和 j 间的相遇时间,则 τ_{ij} 的概率函数为

$$\Pr\{\tau_{ij} \leq d_{\text{bounded}}\} = 1 - e^{-\lambda_{ij}\tau_{ij}}, d_{\text{bounded}} \geq 0 \quad (2)$$

其中 $\lambda_{ij} = 1/\bar{\tau}_{ij}$, 因而在实际应用中可用相遇时间的统计均值 $\bar{\tau}_{ij}$ 对相遇时间进行预测。

在 ICMAN 中多跳多副本传输能够降低传输延时^[2,11],多跳传输的端到端的延时为传输路径中各相邻节点间相遇时间的总和。

定理 1 设 $\Delta_{k_1 k_n}$ 为消息沿路径 $(k_1, k_2, \dots, k_n)$ 的端到端传输延时, k_1 与 k_n 分别为源节点与目的节点。假设对 $i \neq j$, 有 $\lambda_{k_i k_{i+1}} \neq \lambda_{k_j k_{j+1}}$, 则 $\Delta_{k_1 k_n}$ 服从超负指数分布,其概率函数为

$$\Pr\{\Delta_{k_1 k_n} \leq d_{\text{bounded}}\} =$$

$$\begin{cases} 1 - \sum_{i=1}^{n-1} C_{i, n-1} e^{-\lambda_{k_i k_{i+1}} d_{\text{bounded}}}, & 0 \leq d_{\text{bounded}} < \infty \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

(3)

$$\text{其中 } C_{i, n-1} = \prod_{j \neq i} \frac{\lambda_{k_j k_{j+1}}}{\lambda_{k_i k_{i+1}} - \lambda_{k_j k_{j+1}}}。$$

证明 如上所述, $\Delta_{k_1 k_n} = \sum_{i=1}^{n-1} \tau_{k_i k_{i+1}}$, 其中是节点 k_i 与 k_{i+1} 的相遇时间,则 $\tau_{k_i k_{i+1}}$ 服从参数为 $\lambda_{k_i k_{i+1}}$ 的指数分布,由文献[17]可得, $\Delta_{k_1 k_n}$ 服从超负指数分布。(证毕)

由式(3)可知,单一消息副本的单路传输不能满足较小的传输延时与较大的传输概率,因此,需要多副本多路传输来降低传输延时和提高传输概率。假设多个消息副本的传输相互独立,则由基本概率理论可得式

$$\Pr\{\Delta_{st} \leq d_{\text{bounded}}\} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \Pr\{\Delta_{p_i} \leq d_{p_i}\}) \quad (4)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, n$; d_{p_i} 为节点 s 将消息副本转发给 k_i 时,最大传输延时的实时值。

如图 1 所示,设由节点 s 到 t 的消息 m 共创建了 n 个副本,且分别沿 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 共 n 条独立路径进行传输,则由 s 到 t 的最大传输延时为 d_{bounded} 的概率可用式(4)表示。

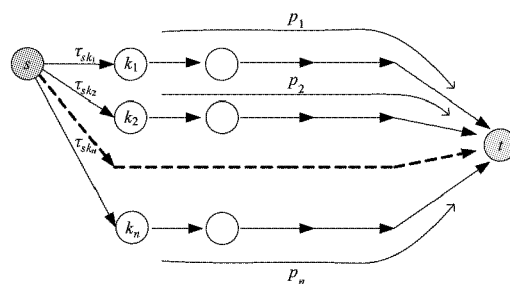


图 1 多路径传输

由上可知,当确定消息的传输路径后,即可预测多副本多路传输的延时指标,但在实际中,当 s 遇到 k_i 时,并不能确定 p_i 。本文假设 p_i 为 k_i 与 t 间的最短路径,最短路径可由 1.1 节中的网络拓扑图 $G(V, E)$ 得到。

2 延时有界的概率路由策略(BDPBR)

在本节,我们将根据前一节中对传输延时的概率描述,提出一种延时有界的概率路由策略(bounded-delay probability-based routing, BDPBR)。其目标是在达到传输延时指标的前提下,对消息的扩散与转发进行控制,以降低通信开销。我们在消息头中增加了必需送达概率(required delivery probability, RDP)

和必需送达时间(required arrival time, RAT)字段,同时为了方便分析比较,我们引入必需传输延时(required delivery delay, RDD),若某一时刻为 $CURRENT_TIME$,则 $RDD = RAT - CURRENT_TIME$ 。另外,我们引入消息有效性的概念。当且仅当消息的 RAT 大于当前时刻值时,我们称该消息在当前时刻是有效的。

如图 2 所示,当携带有效消息的节点与其它未收到该消息的非目的节点相遇时,将按照 BDPBR 策略进行消息的转发;若遇到已收到该消息的其他节点,则无需转发;若遇到目的节点,则直接进行消息传输。假设携带有效消息 m 的节点 i 与未收到过该消息的节点 j 相遇,且 m 的目的节点不为 j ,则 i 将按照下述步骤进行处理:

步骤 1:根据公式(2)计算直接传输的概率 p_{dt} ,若 p_{dt} 小于该消息 m 的 RDP 指标 p_m ,则创建 m 的待发送消息副本 m' ,并转入步骤 2,否则不向 j 转发消息,并结束本次处理过程;

步骤 2:由 Dijkstra 最短路算法得到从相遇节点到目的节点的最短路,并根据公式(3)计算沿该路的传输概率 p_{est} ;

步骤 3:计算消息 m' 的 RDP 指标 $p_{m'}$,其中 $p_{m'} = \min\{(p_m - p_{dt})/(1 - p_{dt}), p_{est}\}$;

步骤 4:将 m' 转发给 j ;

步骤 5:更新消息 m 的 RDP 指标 p_m ,其中 $p_m = (p_m - p_{m'})/(1 - p_{m'})$ 。

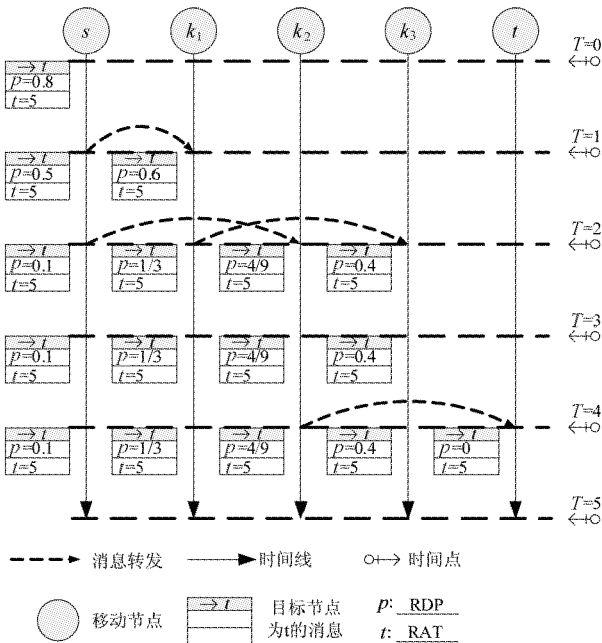


图 2 BDPBR 中消息传输过程

步骤 1 中,若 p_m 为 0,则不创建转发用的消息副本,但仍然进行消息的直接发送,即仅当消息携带节点与消息目标节点相遇时才发送消息。下面以图 2 中 $T=1$ 时刻为例对步骤 2 至步骤 5 进行说明,假设步骤 1 得到直接传输的概率 $p_{dt} = 0.15$ 。步骤 2 对转发节点到目的节点的消息传输概率进行估计, s 将根据公式(3)估计消息沿 k_1 到目的节点 t 的最短路径发送的传输概率,得到 $p_{est} = 0.6$;步骤 3 假设消息沿 s 直接传输,并据此计算消息沿 k_1 发送应需达到的传输概率为 0.76, m' 的 RDP 指标 $p_{m'}$ 无需大于该概率值,因此步骤 3 选择沿 k_1 传输的估计概率值与应达传输概率中的较小值 0.6 做为 m' 的 RDP 指标;当确定 m' 的 RDP 指标后,步骤 4 完成消息的转发;成功转发后,步骤 5 依据 m' 的 RDP 指标更新 m 的 RDP 指标为 0.5。

由上可知,BDPBR 在消息传输过程中不断调整 RDP 值,RAT 在传输过程中保持不变,此外,本文假设各节点有足够的存储空间,因此这里不对消息缓存队列的替换策略进行研究。

3 仿真性能分析

我们设计并实现了一个轻量级模拟器来对 BDPBR 进行性能评估。所模拟的网络环境与 1.1 节所述网络模型略有不同,下面将介绍模拟实验环境以及实验结果,并依此对 BDPBR 进行性能分析与评价。

3.1 实验模型

模拟实验对 1.1 节所述网络模型进行了简化,使用更易于分析与实现的单元划分(cell partitioned)网络模型^[16],该网络模型反映了节点在街区移动的运动特征。

它将节点的运动区域划分为一系列互不重叠的单元格,节点的通信范围限制在单元格内。此外,对节点的移动进行了离散化处理,即节点在离散的时间点从某一单元格移动至相邻单元格,而在其它时间段内保持静止。具体的移动过程与文献[7]类似,节点随机选择一个目的地单元格,并在接下来的一系列时间点向目的地移动,当到达目的地后重新随机选择新的目的地,并重复以上移动过程。

3.2 参数设置

模拟网络环境由 20×20 的单元格阵列构成,共有 9 个节点在阵列中随机移动,另有 1 个节点固定于阵列中心的单元格。每次实验产生的消息任务数

限制为 2000, 每个节点以 5% 的概率产生并发送消息, 若所有 2000 个消息全部发送完毕或无效时, 则实验结束。

Epidemic 路由算法可以达到最优的发送延时与送达率。因此在评价 BDPBR 的性能及效率时, 我们将它与 Epidemic 路由算法进行比较。这里主要使用了两种性能指标来对 BDPBR 进行评价, 分别为总消息副本数与消息送达率。

总消息副本数, 是由所有节点所创建的消息副本的总和, 其中包括目的节点在接收时所创建的消息副本。借助于总消息副本数可以对 BDPBR 的通信开销进行评价。

消息送达率, 是成功完成的消息任务数与消息任务总数的比值。消息送达率是衡量 BDPBR 路由性能的重要指标。

本文通过比较在不同的 RDP 与 RDD 指标下的总消息副本数与消息送达率来分析 BDPBR 特性, 并进行评价。

3.3 结果与分析

分别固定 RDD 与 RDP 来分析 RDP 及 RDD 的变化对 BDPBR 的影响。以下的实验结果为 5 次模拟实验结果的均值。

1) RDP

BDPBR 的设计目标是期望能够通过 RDP 来控制消息的送达率, 以此来满足不同应用等级的需求。为此, 固定 RDD 为 200, 并以 0.1 为步长, 从 0 到 1 设置 11 组不同 RDP 值来分析 BDPBR 的消息送达率及总消息副本数与 RDP 之间的关系。

实验结果如图 3 和图 4 所示, 其中图 3 描述了消息送达率与 RDP 之间的关系。Epidemic 路由算法达到了最优的消息送达率, 约为 0.94, 而直接传输的消息送达率则最低, 约为 0.41。BDPBR 呈现出消息送达率随 RDP 线性增长的特点。但在 RDP 较小

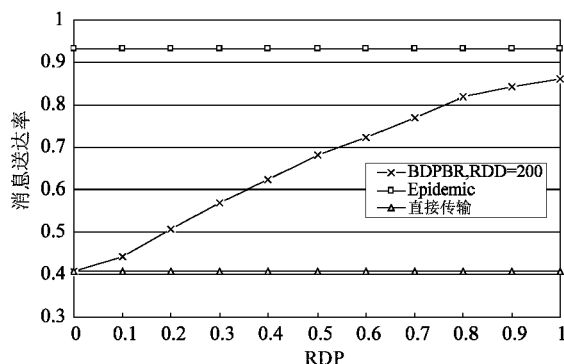


图 3 RDP 对消息送达率的影响

时, 消息送达率明显高于设定的 RDP 值。这是因为当 RDP 较小时, 特别当 RDP 为 0 时, BDPBR 将退变为直接传输, 而直接传输仍然可以达到 0.41 的消息发送率。此外, 当 RDP 较大时, 消息发送率明显低于设定的 RDP 值。这是因为最优的消息送达率为 0.94, 因此消息发送率不能随 RDP 无限制的增大。

图 4 描述了总消息副本数与 RDP 之间的关系。可见直接传输的开销最小, 但不能达到较大的消息送达率, 而 Epidemic 路由算法虽然实现了最优的消息送达率, 但同时带来较大的开销。BDPBR 可通过调整 RDP 来平衡消息送达率与开销的关系。

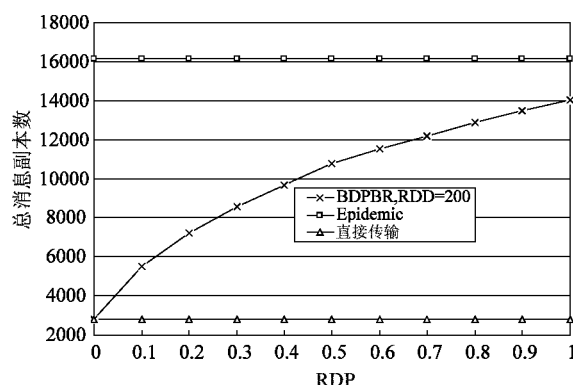


图 4 RDP 对消息总副本数的影响

2) RDD

在 BDPBR 中的 RDP 对消息送达率及总消息副本数起主要作用, 但不同的 RDD 值也会产生一定的影响。为此, 固定 RDP 为 0.55, 并以 10 为步长, 从 100 到 250 设置 16 组不同 RDD 值来分析消息送达率及总消息副本数与 RDD 之间的关系。

图 5 中 BDPBR, Epidemic 以及直接传输路由算法的消息送达率均随 RDD 呈上升趋势, 这是因为较大的 RDD 可以增加消息副本在节点的存在时间, 即

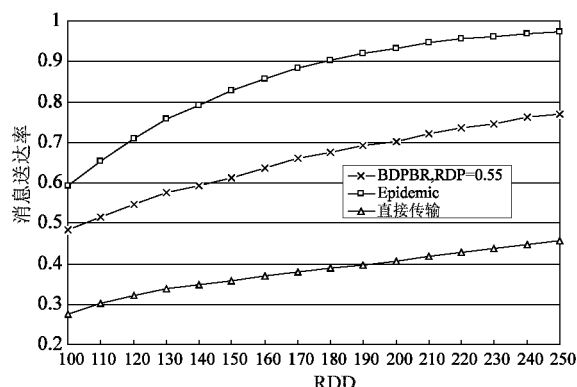


图 5 RDD 对消息送达率的影响

增加转发及与目的节点相遇的机会,提高了消息送达率。由图 5 可见,BDPBR 的送达率限制在 0.48 至 0.77 之间,这是由于 RDP 设定为 0.55,较好的控制了消息副本的创建数量。如图 6 所示,BDPBR 的总消息副本数的增加随着 RDD 的增加而变缓。

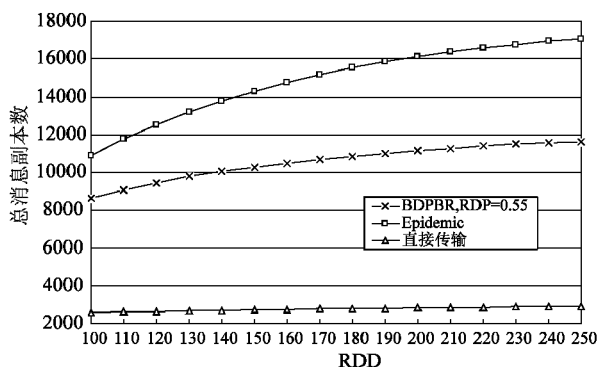


图 6 RDD 对消息总副本数的影响

4 结 论

现有 ICMAN 路由算法关注于消息的平均传输延时,然而在实际应用中需要更加精确的延时指标要求。为此,本文建立了 ICMAN 的随机网络模型,并证明经多跳转发的消息传输延时服从超负指数分布,进而提出了一种延时有界的概率路由策略 BDPBR。它通过引入必需送达概率 RDP 与必需传输延时 RDD 指标,可为用户提供更为精确而灵活的消息发送控制方式,并能更好地权衡性能与通信开销之间的关系。模拟实验结果表明,BDPBR 能够通过调整 RDP 与 RDD 来控制消息的实际送达率与发送延时,同时可根据 RDP 与 RDD 来调整系统开销,非常适合具有不同 QoS 要求的 ICMAN 应用场景。

参考文献

- [1] Zhang Z S. Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2006, 8 (1): 24-37
- [2] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Single-copy routing in intermittently connected mobile networks. In: Proceedings of the 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Network, Santa Clara, CA, USA, 2004. 235-244
- [3] Nguyen H A, Giordano S, Puiatti A. Probabilistic routing protocol for intermittently connected mobile ad hoc network (PROPICMAN). In: Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM'2007), Helsinki, Finland, 2007. 1-6
- [4] Jones E P, Li L, Ward P A. Practical routing in delay-tolerant networks. In: Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking, Pennsylvania, USA, 2005. 237-243
- [5] Musolesi M, Hailes S, Mascolo C. Adaptive routing for intermittently connected mobile ad hoc networks. In: Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM'2005), Giardini Naxos, Italy, 2005. 183-189
- [6] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks: [technical report]. Durham: Department of Computer Science, Duke University, 2000
- [7] Tan K, Zhang Q, Zhu W W. Shortest path routing in partially connected ad hoc networks. In: Proceedings of IEEE 2003 Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'03), San Francisco, CA, USA, 2003. 1038-1042
- [8] Lindgren A, Doria A, Schel O. Probabilistic routing in intermittently connected networks. In: Proceedings of the 1st International Workshop on Service Assurance with Partial and Intermittent Resources (SAPIR'2004), Fortaleza, Brazil, 2004. 239-254
- [9] 程慧卿, 史杏荣. 间断移动自组织网络下的路由协议分析与增强. *计算机工程与应用*, 2007, 43(25): 150-152
- [10] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In: Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2005. 252-259
- [11] Spyropoulos T. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: The multiple-copy case. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2007, 16
- [12] Johnson D B, Maltz D A. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. Netherlands: Mobile Computing, Kluwer Academic Publishers, 1996. 153-181
- [13] Moraes R M, Sadjadpour H R, Garcia-Luna-Aceves J J. Throughput-delay analysis of mobile ad-hoc networks with a multi-copy relaying strategy. In: Proceedings of the 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Network (SECON'2004), Santa Clara, CA, USA, 2004. 200-209
- [14] Perevalov E, Blum R. Delay limited capacity of ad hoc networks: asymptotically optimal transmission and relaying strategy. In: Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFO-

- COM'2003), San Francisco, CA, USA, 2003. 1575-1582
- [15] Grossglauser M, Tse D N C. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2002, 10(4): 477-486
- [16] Bansal N, Zhen L. Capacity, delay and mobility in wireless ad-hoc networks. In: Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'2003), San Francisco, CA, USA, 2003. 1553-1562
- [17] Ross M. Introduction to Probability Models. UK: Harcourt, 2000

Bounded-delay probability-based routing in intermittently connected mobile ad hoc networks

Li Xianning, An Jianwei, Zhou Xianwei

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

Abstract

In intermittently connected mobile ad hoc networks (ICMAN), message delivery rate, delay and cost are the three crucial factors. Based on the analysis of the relationship among the three factors and by means of the probabilistic model of delivery delay, this paper proposes a novel routing scheme for ICMAN, i.e., the bounded delay probability-based routing (BDPBR) scheme which attaches importance to accurate delay target. The scheme can guarantee the bounded delivery delay target with a certain probability. The simulation results show that the scheme can control information delivery ratio and delivery delay and adjust system cost by adjust require delivery probability (RDP) and required delivery delay (RDD). Meanwhile, our routing scheme can provide diverse qualities of delivery service based on the different setting of users.

Key words: Ad hoc networks, routing protocols, delays, probability