

文章编号:1000-582X(2013)02-134-07

消息重要程度感知的机会网络自适应队列管理策略

吴大鹏,周建二,王汝言,张普宁

(重庆邮电大学 宽带设在接入技术研究所,重庆 400065)

摘要:机会网络中节点存储资源有限,为了提高机会网络中节点存储资源的使用效率,本文首先提出一种准确的节点活跃程度估计方法,并用于衡量消息的重要程度,进而,根据评估结果设计了适用于机会网络的自适应队列管理策略,确定节点队列内部消息优先级以及携带决策。该策略根据节点与其他节点相遇的次数估计节点活跃程度。节点活跃程度与消息成功传输直接相关,可用于衡量消息的重要程度。仿真结果表明,所提出的节点活跃度估计方法比较准确,误差小于 5%,同时消息重要程度感知的自适应队列管理策略策略能有效提高消息成功投递率,降低网络平均时延和网络负载率。

关键词:无线网络;机会网络;队列管理;节点活跃程度

中图分类号:TP393.04

文献标志码:A

Message-importance aware adaptive queue management mechanism in opportunistic networks

WU Dapeng, ZHOU Jianer, WANG Ruyan, ZHANG Puning

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

Abstract: The network resources are limited in opportunistic networks. For improving the effectiveness of nodes' storage resources, this paper proposes a proper method to estimate node's activity degree. Based on the node's activity degree, we estimate the messages' importance degree, and then design a message importance degree aware adaptive queue management mechanism (MAQM) by the importance of message. This mechanism estimate node's activity degree by its meeting times with other nodes, and estimate messages' importance degree by node's activity degree. Simulation results show that the method to evaluate node's activity degree is accurate. Deviation is less than 5%. Compared with other cache management mechanisms, MAQM can improve message delivery rate effectively, while reducing latency and overhead ratio.

Key words: wireless networks; opportunistic networks; queue management; node activity degree

移动自组织网络 (mobile ad hoc network, MANET) 中,节点转发数据之前需要建立确定的端到端路径^[1-2]。区别于 MANET 的存储-转发通信

模式,机会网络以更加灵活的存储-携带-转发模式实现互连互通、移动计算。机会网络中的节点在转发数据之前,并不需要建立端到端路径,而是利用节

收稿日期:2012-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60772109,61001105),重庆市教委科学技术资助项目(KJ100521)

作者简介:吴大鹏(1979-),男,重庆邮电大学副教授,博士,主要从事无线网络服务质量管理方向研究,(Tel) 13752980824;(E-mail) wudp@cqupt.edu.cn。

点之间的相遇机会进行数据转发,直至到达目的节点。整个过程中,多个节点将对需要转发的消息进行保存,显然,对于节点处理能力、存储能力等比较有限的情况下,有效的节点队列管理机制将能够直接提高存储空间利用率,进而改善网络性能。

目前,国内外研究人员针对机会网络中的节点队列管理方法进行了相关研究。文献[3]中,作者按照预先定义的重要程度,给每个消息分配一个“重要因子”,在取舍2个消息时,删除重要因子较小者。文献[4]以消息生存时间为参数,在取舍两个消息时,删除生存时间长者。文献[5]在估计网络现状的条件下,从理论上推导最大消息传输率和最小延迟需满足的条件,并制定了相应的消息删除方法。根据人类移动模型具有“小世界”的特性,文献[6]利用队列消息与节点的相关度设计了相应的缓存替换管理策略。

研究表明,节点活动能力越强,则该节点与其他节点相遇的机会将随之增加,进而传递和存储的消息也就越多。网络中的消息被此种类型的节点存储后,其成功投递的机会显著增加^[7]。由此易知,节点的活跃程度直接反映了其所携带消息的成功投递概率。机会网络中,节点相遇之后需要交换彼此队列中的存储状态,经过多个活跃节点携带的消息成功投递率较高,可见,过多地对其进行存储以及转发将严重浪费网络资源,也就是说,此种消息的重要程度下降。因此,在设计队列管理策略时,应充分考虑节点活跃程度之间的差异,以有效地管理节点队列中的消息,达到合理利用网络资源的目的。文献[3-6]中所提出的队列管理方法均没有考虑节点的活跃程度,也没有将节点的活跃程度反映到消息上,可见,这些机制存在一定程度的局限性。

提出一种节点活跃程度评估方法,节点根据相遇情况的历史信息,估计当前网络状态下的节点活跃程度,进而,评估给定消息的重要程度。最后,提出一种消息重要程度感知的自适应队列管理机制(message importance aware adaptive queue management mechanism, MAQM)。

1 消息重要程度估计方法

本部分首先介绍所提出的节点活跃程度评估方法,进而利用相应的结果估计消息重要程度。

1.1 节点活跃程度估计方法

如前所述,给定节点与网络中其他节点的相遇

次数越多,则通过给定节点将消息成功投递的概率越高。因此,给定节点与网络中其他节点的相遇次数是评估节点活跃程度的关键参数。将给定节点与网络中其他节点的相遇次数称为该节点的相遇次数,定义为 M ,其大小在 $[M_{\min}, M_{\max}]$ 内。各个节点进入其他节点通信范围的总次数定义为节点相遇总次数 M_{total} ,各个节点进入其他节点通信范围的平均次数定义为节点平均相遇次数 M_{avr} 。显然,若获得节点相遇总次数和节点平均相遇次数,则可以通过与其他节点活跃状态进行比较,从而衡量其活跃程度。给定节点与网络中其他节点的相遇次数由本地记录信息获知,因此,根据上述节点活跃度估计原理,首先需要估计在 T 时间段内,网络中各个节点的总体相遇状态。

令节点相遇间隔(node meeting interval, NM)参数表示从节点 i 离开某一节点的通信范围到节点 i 再次进入任一节点通信范围的时间间隔,节点首次相遇时间(node first meeting time, NFM)参数表示两个节点从静止开始到第一次相遇(各自进入通信范围)经过的时间^[8]。

在 $T=0$ 时,若节点 i, j 的随机运动参数已经确定,则可获得节点首次相遇时间,如式(1)所示

$$\text{NFM} = \min_T \{T: \|R_i(T) - R_j(T)\| \leq K\}, \quad (1)$$

其中 $R_i(T)$ 为节点在 T 时刻的坐标, K 为节点的传输范围。对于广泛应用的Random Way Point移动模型^[9]来说,NFM可由式(2)进行估计

$$\text{NFM}_{\text{rwp}} = \frac{1}{p_m \hat{v}_{\text{rwp}} + 2(1 - p_m)} \times \frac{N}{2KL} (\bar{T} + \bar{T}_{\text{stop}}), \quad (2)$$

其中 $\hat{v} \approx 1.75$,为RWP模型的节点运动相对速度。 L 为节点到目标节点的距离, \bar{L} 为 L 的预计平均值,在一个 $\sqrt{N} \times \sqrt{N}$ 大小的RWP网络模型中 $\bar{L} = 0.5214 \sqrt{N}$ 。 \bar{T}_{stop} 为平均停留时间, $\bar{T} = \frac{\bar{L}}{v}$, \bar{v} 为节点的平均速度, K 为节点传输范围。 $p_m = \frac{\bar{T}}{(\bar{T} + \bar{T}_{\text{stop}})}$,表示节点在单位时间内处于运动状态的时间^[10]。

机会网络中的节点采用存储-携带-转发的方式进行通信,同一个消息可能在网络中存在多个备份。若当前网络中某个消息有 L 个备份,且消息的路由方式为直接投递,即节点只有遇到目标节点才转发

消息。可知,消息成功传递到目的节点的延迟(expected delay, ED)如式(3)所示

$$ED = \frac{NFM_{\text{rwp}}}{L}, \quad (3)$$

若当 n 个节点组成的网络中有 $n-1$ 个备份,则此消息到目的节点的延迟即为节点访问间隔 NM , 如式(4)所示

$$NM = ED = \frac{NFM_{\text{rwp}}}{n-1}. \quad (4)$$

可见, T 时间段内,节点访问间隔 NM 与时间 T 的比值即为某个节点与其他节点相遇的平均次数,那么所有节点之间总相遇次数如式(5)所示

$$M_{\text{total}} = \frac{T \times n \times (n-1)}{NFM_{\text{rwp}}}. \quad (5)$$

进而,可以获得节点在 T 时间段内与其他节点的平均相遇次数如式(6)所示

$$M_{\text{avr}} = \frac{M_{\text{total}}}{n} = \frac{T \times (n-1)}{NFM_{\text{rwp}}}. \quad (6)$$

数值分析部分将 M_{total} 的估计数值与仿真过程中获得的实际 M_{total} 数值进行了比较,结果表明两者误差不超过 5%,可见,所提出的网络总体相遇状态估计方法比较准确。

根据节点活跃程度估计原理,不同节点之间的差异无法通过单个节点的相遇状态体现,采用均匀量化的方法衡量网络中的节点活跃度。

令 X 表示节点活跃程度的权值,其大小定义在 $[X_{\min}, X_{\max}]$ 内,若令当前网络状态下,中等活跃程度的节点相遇次数为 M_{med} ,则可根据 M_{med} 和给定节点的相遇次数,获知节点活跃程度之间的差异,进而计算权重数值。可见, M_{med} 数值的准确程度与节点活跃程度估计方法的有效性直接相关。机会网络以分布式方式运行,节点无法获取整个网络范围内其他节点的状态信息,采用 M_{avr} 的估计数值作为 M_{med} 的近似数值,即 $M_{\text{med}} \approx M_{\text{avr}}$,仿真结果表明两者的误差不超过 5%,因此,可将 M_{avr} 近似地作为 M_{med} 的数值。

显然,若给定节点的相遇次数等于 M_{avr} ,那么此节点的权值 X 也应该是 $[X_{\min}, X_{\max}]$ 的中间值 X_{med} 。如果某个节点的相遇次数比 M_{med} 大,那么其权值需要相应地增加,反之降低。

为了更合理有效地反映相遇状态差异与权重差值之间的映射关系,文中选取 X 的范围 $[X_{\min}, X_{\max}]$ 为 $[0, 10]$,针对节点活跃程度的均匀量化计算方法

如式(7)所示

$$X_i = X_{\text{med}} + (M_i - M_{\text{med}}) \cdot \Delta \quad (7)$$

其中 Δ 为量化间隔, $\Delta = \frac{X_{\text{med}}}{M_{\text{max}} - M_{\text{med}}}$ 。

1.2 消息重要程度估计方法

在 T 时刻,存储过给定消息的所有节点活跃程度权值总和为 $A(T)$

$$A(T) = \sum X_i. \quad (8)$$

网络实际运行过程中,消息被节点存储的状态动态改变,即 $A(T) \in [A_{\min}, A_{\max}]$,显然,若给定消息的 $A(T)$ 为 A_{\max} ,则表明此消息已成功投递。由此,可得消息已成功投递的概率 $P(T)$,如式(9)所示

$$P(T) = \frac{A(T)}{A_{\max}}, \quad (9)$$

其中, $A(T)$ 数值可由节点本地记录信息得到。所提出的机制中,节点相遇之后需要比较彼此的 A 参数数值,网络运行稳定之后,各个节点均可获得当前网络中的 A_{\max} 。

活跃度较高的节点与其他节点相遇的概率较大,通过该节点携带并转发消息备份将显著地提高消息成功投递概率。因此,携带给定消息备份的活跃节点数量越多,其被成功投递的概率也越大,反映到式(9)就是 $A(T)$ 越大, $P(T)$ 也越大,反之 $P(T)$ 越小。

利用消息成功投递状态,可为每个消息设计相应的权重数值,此权重反映消息在网络中继续转发的重要程度

$$Q(T) = 1 - P(T). \quad (10)$$

携带给定消息的活跃节点数量越多,其 $A(T)$ 越大,表明已被成功投递的概率也随之上升,继续携带此消息的意义也相应地下降,其在网络中的重要程度也就降低,反映到式(10)就是 $A(T)$ 越大, $Q(T)$ 越小。由此易知,权重 $Q(T)$ 越小的消息其重要程度越小,反之越大。根据这个基本原理,当节点缓存完全填充之后,可以删除节点中权重较小的消息,存储后续到达的权重较大消息。采用这种方式可以将更多网络资源预留给权重较高的消息,有效利用节点有限的缓存空间,提高网络性能。

如式(10)中所示,节点可以根据当前网络状态动态地估计 $A(T)$ 和 A_{\max} 数值,因此,对于网络状态时变性较强的机会网络来说,所提出的权重 $Q(T)$ 计算方法能够自适应地反映消息在网络中的重要程

度,进而用于设计高效的队列管理策略。

2 MAQM 基本原理

消息重要程度感知的自适应的队列管理策略主要包括出队列操作和入队列操作 2 个方面。

出队列操作主要解决队列内部消息优先级问题,机会网络中,2 个节点相遇之后,需要彼此交换队列状态以及队列中所保存的消息。根据消息重要程度,节点将其在队列中按照权重由大到小进行排列。权值较大者位于队列头部,当节点相遇并传输消息时,队头消息获得优先发送权。与传统的随机交换方式不同,通过这种方式,有限的存储资源将被预留给重要程度较高的消息,有效地避免了节点缓存完全填充后,重要程度较高的消息无法及时转发的问题,提高了缓存利用率。

图 1 中队列保存了 n 个消息,其权重满足 $Q_n(T) < Q_{n-1}(T) < Q_{n-2}(T) \ll \dots \ll Q_1(T)$

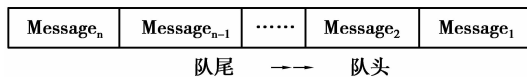


图 1 消息在队列中的排队方式

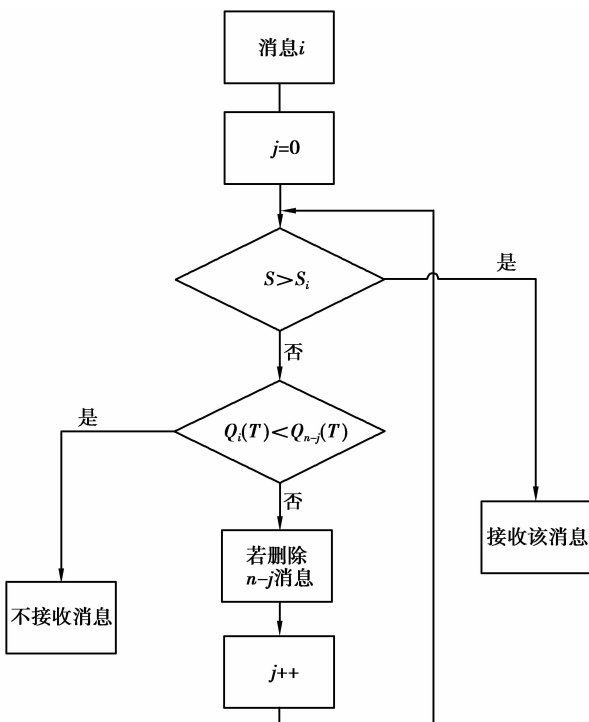


图 2 消息的接收流程图

列中有足够空闲空间,则节点正常地接收并存储来自其他节点的消息,否则,比较消息权重关系,从权重最小的消息开始执行删除操作,直到为需要接收的消息留出足够的队列空间,否则拒绝此消息。与传统的先删除队尾或者队头的队列管理方式不同,通过这种方式节点能携带更有效的数据,充分发挥节点与其他节点相遇的机会和节点的存储能力,提高消息成功投递概率,同时删除有可能已经成功投递的冗余消息备份,减少了不必要的数据传输。具体流程如图 2 所示,其中 S 表示节点的空闲存储空间, S_i 表示消息 i 的大小, $Q_i(T)$ 表示当前网络状态下消息 i 的权重。

3 仿真验证及数值分析

本部分首先验证所提出的节点活跃度估计方法的准确程度,然后分析基于消息重要程度的自适应队列管理机制(MAQM)的性能。

采用 ONE (opportunistic network environment) 仿真平台^[11-15]对相关性能进行验证,路由协议为基于免疫的传染病路由算法^[11](epidemic immunity),各个节点在本地维护一张向量表,保存已到达目的节点的消息序号。当 2 节点相遇时,交换彼此缓存中没有的消息,并更新各自的向量表,若节点存储有向量表中对应的消息,则将其删除。仿真参数如表 1。

表 1 仿真参数设置

参数	数值
仿真时间/s	9 600
网络大小/m×m	800×800
节点运动模型	Random Way Point
节点个数	150
节点通信方式	Bluetooth
节点运动速度 m/s	0.5—1.5
传输范围/m	10
传输数率/Mbps	2
消息大小/kB	250—500
消息产生间隔/s	5—15
消息产生时间/s	0—7 200
消息生存时间(TTL)/s	2 400

入队列操作主要解决数据携带决策问题。当队

3.1 节点活跃度估计方法的准确性

对于各种尺度的网络场景来说,利用所提出方法得到的估计数值与实际数值之间的差别如图 3 和图 4 所示,其中网络场景为正方形区域,衡量的指标主要包含节点相遇总次数 M_{total} 和节点相遇次数中间值 M_{med} 2 个方面。

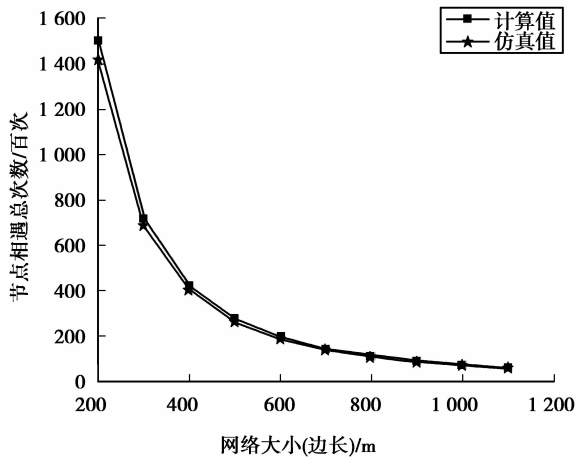


图 3 节点相遇总次数估计误差

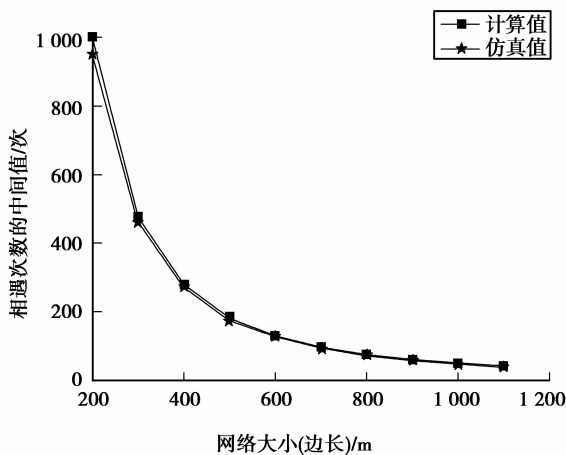


图 4 节点平均相遇次数估计误差

从图中可知,采用所提出的节点相遇总次数估计方法得到的数值与仿真中获得的实际数值基本吻合,总体误差为 5%,特别是在网络规模较大时,估计误差将会进一步降低,如当网络边长超过 600 m 后,误差降低为 1%。另外,采用节点平均相遇次数估计数值 M_{avr} 作为节点相遇次数中间值 M_{med} 的近似值比较合理。

3.2 MAQM 性能

针对节点缓存容量不同的情况下,本部分将

MAQM 方法与传统的 Tail-delete、Front-delete^[12] 以及文献[4]中提出的 Oldest_delete 队列管理方法进行了比较。其中 Oldest_delete、Tail-delete 和 Front-delete 队列管理方案分别为先删除存活时间最长的消息、先删除队列尾部的消息和先删除队列头部的消息。为了保证 A_{max} 收敛,实验数据在消息的一个生存周期(TTL=2 400 s)后开始统计。为了减小随机性,以下实验结果均是 20 次独立实验结果的均值。

消息成功传输率如图 5 所示。从结果中可以发现,与其他三种算法相比,MAQM 的总体消息成功投递率有 18%~40% 的提高。当缓存容量小于 12.5 M 时,比 Oldest_delete 提高 18%~20%,比 Tail-delete 和 Front-delete 提高 28%~40%。但当缓存容量大于 12.5 M 时,MAQM 与其他 3 种算法相比,消息成功率的增幅减小,为 20%~23%。

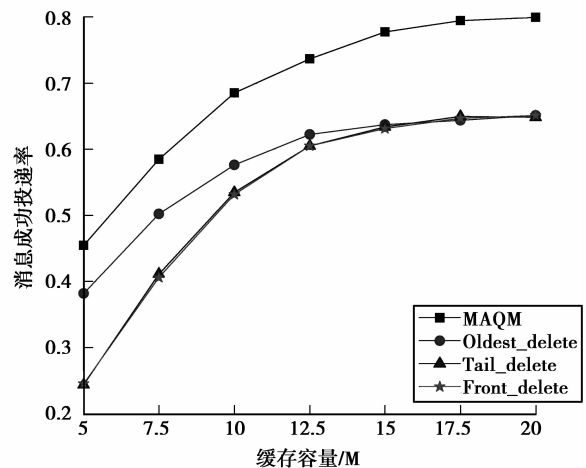


图 5 不同缓存方法的消息成功投递率

网络平均时延的性能如图 6 所示。可知,缓存容量小于 7.5 M 时,MAQM 的时延要高出 Tail-delete 和 Front-delete 算法 5%。但缓存容量大于 7.5 M 后,其他 3 种算法的时延迅速增长,MAQM 却平稳增长,并在缓存容量大于 10 M 后趋于平稳,此时,MAQM 的时延相比其他 3 种算法降低了 8%~9%。

网络负载率定义为:(转发的消息数-成功投递的消息数)/成功投递的消息数,其反映的是每成功投递一个消息所需要转发消息的次数。不同算法的网络负载率比较见图 7。从图中可知,在缓存容量

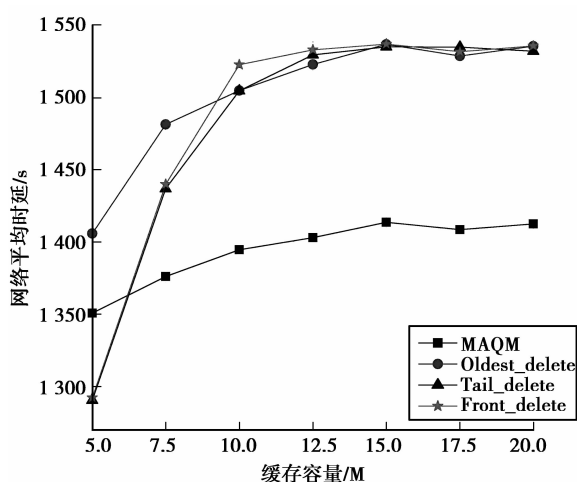


图 6 不同缓存方法的网络平均时延

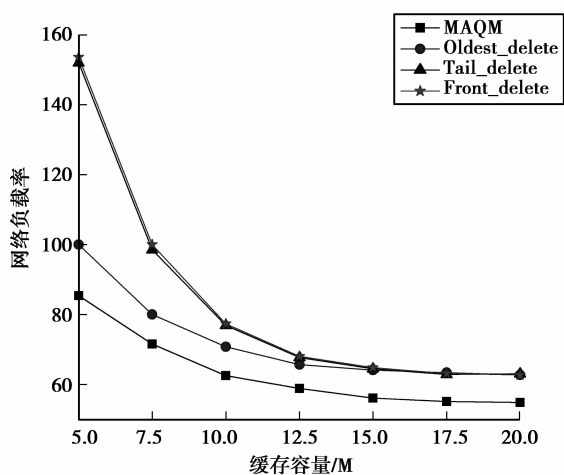


图 7 不同缓存方法的网络负载率

小于 10M 时, MAQM 的网络负载率要远优于其他 3 种算法, 大约降低了 35%~19%。当大于 10 M 时, 四种算法的网络负载率都趋于平稳, 但 MAQM 算法的网络负载率还是要优于其他 3 种算法, 大约降低了 9%~15%。

4 结 语

为了有效地利用有限的缓存资源, 提高网络性能, 首先提出节点活跃程度估计方法, 进而利用节点活跃程度感知消息重要程度, 并提出了一种适用于机会网络的消息重要程度感知的自适应队列管理策略。仿真结果表明, 与其它传统缓存管理方法相比, 此方法能有效提高消息成功投递率, 降低网络平均时延和网络负载率。由于消息权重的计算能根据网

络的变动而改变, 真实地反映网络动态, 所以此队列管理策略具有较强的自适应性, 满足机会网络动态时变的特性。

参考文献:

- [1] 熊永平, 孙利民, 牛建伟, 等. 机会网络[J]. 软件学报, 2009, 20(1):124-137.
XIONG Yongping, SUN Limin, NIU Jianwei, et al. Opportunistic networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(1): 124-137.
- [2] 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, 597.
TIAN Min, LIU Zhanjun, LI Yun, et al. A Stable Ad Hoc routing protocol based on node degree[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Nature Science Edition, 2007, 19(5):558-561, 597.
- [3] 孙利民, 熊永平, 马建. 机会移动传感网络中的自适应数据收集机制[J]. 通信学报, 2008, 29(11):186-193.
SUN Limin, XIONG Yongping, MA Jian. Adaptive data gathering mechanism in opportunistic mobile sensor networks [J]. Journal on Communications, 2008, 29(11): 186-193.
- [4] 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.
ZHU Jinqi, LIU Ming, GONG Haigang, et al. Selective replication-based data delivery for delay tolerant mobile sensor networks [J]. Journal of Software, 2009, 20(8):2227-2240.
- [5] Krifa A, Baraka C, Spyropoulos T. Optimal buffer management policies for delay tolerant networks[C]// Proceedings of the 5th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, June 16-20, 2008, San Francisco, CA. Piscataway: IEEE, 2008. 260-268.
- [6] 叶晖, 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(5):98-107.
YE Hui, CHEN Zhigang, ZHAO Ming. ON-CRP: cache replacement policy for opportunistic networks[J]. Journal on Communications, 2010(5):98-107.
- [7] Hyytia E, Lassila P, Virtamo J. Spatial node distribution of the random waypoint mobility model with applications[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6): 680-694.
- [8] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multiple-copy case [J]. IEEE Transactions on Networking, 2008, 16(1):77-90.
- [9] Bettstetter C, Resta G, Santi P. The node distribution

- of the random waypoint mobility model for wireless Ad Hoc networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, 2(3): 257-269.
- [10] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Performance analysis of mobility-assisted routing [C]// Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, May 22-25, 2006, Florence, Italy. New York, USA: ACM, 2006: 49-60.
- [11] Mundur P, Seligman M, Lee G. Epidemic routing with immunity in delay tolerant networks[C]// Proceedings of the 2008 IEEE Military Communications Conference, November 16-19, 2008, San Diego, CA. Piscataway: IEEE, 2008: 1-7.
- [12] Tang S S, Li W. QoS provisioning and queue management in mobile Ad Hoc networks [C]// Proceedings of the 2006 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, April 3-6, 2006, Las Vegas, NV. Piscataway: IEEE, 2006, 1: 400-405.
- [13] Keränen A, Ott J, Kärkkäinen T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation [C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques, March 2-6, Rome, Italy. New York, USA: ACM, 2009: 1-10.
- [14] Thompson N, Nelson S C, Bakht M, et al. Retiring replicants: congestion control for intermittently-connected networks[C]// Proceedings of the 2010 IEEE INFOCOM, March 14-19, 2010, San Diego, USA. Piscataway: IEEE, 2010: 1-9.
- [15] Soares V N G J, Farahmand F, Rodrigues J J P C. Impact of vehicle movement models on VDTN routing strategies for rural connectivity [J]. International Journal of Mobile Network Design and Innovation, 2009, 3(2): 103-111.

(编辑 侯 湘)

~~~~~

(上接第 120 页)

- [9] 马迅, 周红妮, 陈莎. 发动机飞轮的动态优化设计[J]. 机械设计与制造, 2004(5):63-65.  
MA Xun, ZHOU Hongni, CHEN Sha. Dynamic optimized design of a internal combustion engine flywheel [J]. Machinery Design & Manufacture, 2004(5):63-65.
- [10] Tongele T, Mohammed A. Experimental stress measurement using photostress-plus: engine flywheel case-study [C]// Proceedings of the ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE2008, August 3-6, 2008, Brooklyn, NY, USA. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2008: 851-854.
- [11] 谢贵君. 四缸内燃机曲轴-飞轮组结构模态分析[J]. 机械管理开发, 2009, 24(4):3-4.  
XIE Guijun. Structural modal analysis for the crankshaft/flywheel component of a 4-cylinder IC engine [J]. Mechanical Management and Development, 2009, 24(4):3-4.
- [12] Ren Z Y, Liu J N, Li Q F, et al. Finite element analysis of composite flywheel with two-layer pre-stressed rotor structure[J]. Advances in Fracture and Damage Mechanics X, 2012, 488/489: 134-137.
- [13] 慈铁军. 汽轮机启动和超速试验对转子脆性裂纹影响的分析[J]. 机械研究与应用, 2006, 19(1):43-44.  
CI Tiejun. Analysis of turbine start-up and over-speed experimentation influencing rotor brittleness crack[J]. Mechanical Research & Application, 2006, 19(1): 43-44.
- [14] 唐勇, 张志强, 唐胜利, 等. 双渐开线齿轮的模态与振动响应[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(10): 61-64.  
TANG Yong, ZHANG Zhiqiang, TANG Shengli, et al. The mode and vibration response of the double involute gear [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(10): 61-64.
- [15] Zhang J P, Zhao X H, Suo Z G, et al. A finite element method for transient analysis of concurrent large deformation and mass transport in gels[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(9): 093-522.
- [16] Wang Sicheng. Review and trend of solar photovoltaic technology[J]. International Power, 1997(4):21-23.

(编辑 张小强)