

基于马尔可夫链的轻量级机会路由转发策略

李峰¹, 司亚利^{2,3}, 陈真², 申利民²

(1. 东北大学秦皇岛分校计算机与通信工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 3. 燕山大学里仁学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 提出了一种基于马尔可夫链的轻量级机会路由转发策略 (MOR), 该方法将网络运行划分为多个等距的时间周期, 利用活跃度描述节点每个周期的随机相遇状态, 多个连续周期的状态序列构成一个离散的马尔可夫链, 将节点活跃度评估转换为状态预测问题, 利用马尔可夫模型预测相遇节点后续周期的状态, 有效地提高了节点活跃度评估的准确性。构建了基于节点活跃度和平均相遇间隔的综合效用评估方法, 作为消息转发决策的依据, 节点只需维护前一周期的状态和状态转移概率矩阵, 以及记录与其他节点平均相遇间隔的向量表, 算法简单高效, 时空复杂度低。建立了多指标的最优消息副本设置方法, 有效地均衡了网络资源的使用率。实验结果表明, 与已有算法相比, MOR 算法能够有效地提高消息传递的成功率, 降低平均转发时延, 且具有较低的网络交付代价。

关键词: 机会网络; 马尔可夫链; 活跃度; 平均相遇间隔; 消息副本

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Lightweight opportunistic routing forwarding strategy based on Markov chain

LI Feng¹, SI Ya-li^{2,3}, CHEN Zhen², SHEN Li-min²

(1. School of Computer and Communication Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;

2. School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

3. LiRen College, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A lightweight opportunistic routing forwarding strategy (MOR) was proposed based on Markov chain. In the scheme, the execute process of network was divided into a plurality of equal time period, and the random encounter state of node in each time period was represented by activity degree. The state sequence of a plurality of continuous time period constitutes a discrete Markov chain. The activity degree of encounter node was estimated by Markov model to predict its state of future time period, which can enhance the accuracy of activity degree estimation. Then, the method of comprehensive evaluating forwarding utility was designed based on the activity degree of node and the average encounter interval. MOR used the utility of node for making a routing forwarding decision. Each node only maintained a state of last time period and a state transition probability matrix, and a vector recording the average encounter interval of nodes. So, the routing forwarding decision algorithm was simple and efficient, low time and space complexity. Furthermore, the method was proposed to set optimal number of the message copy based on multiple factors, which can effectively balance the utilization of network resources. Results show that compared with existing algorithms, MOR algorithm can effectively increase the delivery ratio and reduce the delivery delay, and lower routing overhead ratio.

Key words: opportunistic network, Markov chain, activity degree, average encounter interval, message copy

收稿日期: 2016-04-12; 修回日期: 2017-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61300193, No.61272125, No.61602100, No.61601107); 河北省自然科学基金资助项目 (No.F2015501105, No.F2017203307, No.F2015501122); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.N120323012)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61300193, No.61272125, No.61602100, No.61601107), The Natural Science Foundation of Hebei Province (No.F2015501105, No.F2017203307, No.F2015501122), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.N120323012)

1 引言

随着大量低成本、具备短距离无线通信能力的便捷式智能设备的发展,出现了一种新型的移动自组织网络——机会网络 (opportunistic network)。机会网络提供机会通信和信息共享服务,在野外动物追踪、空间网络、手持设备组网和车载网络等特定领域中得到了广泛应用^[1,2]。机会网络具有典型的拓扑结构不稳定性、节点稀疏性和连接间断性等特征,在绝大部分缺乏完整的点到点连通链路状态的情况下,采用“存储—携带—转发”机制,依靠节点移动带来的相遇机会协作传递消息,实现网络通信^[3,4]。然而,在这类复杂和挑战性的网络环境中,由于节点传输速率较低以及2个节点相遇间隙较短等因素,在有限的相遇机会出现时路由决策成为了影响网络性能的关键要素。因此,为了提高消息传递成功率和最小时延等网络性能,如何在消息投递过程中选择最合适的下一跳转发节点和转发时机,成为当前机会网络路由决策研究亟待解决的关键问题。

现有机会路由转发方法中,为了提高消息投递的成功率一般采用多副本消息转发策略,源节点将消息副本复制给不同的转发节点,利用注入的大量冗余消息分组的多路径并行传输来解决目标节点的最优发现问题。按照消息拷贝数量的不同分为传染转发和有限副本转发机制,传染转发采用类似于泛洪机制的传播策略,将携带的消息拷贝给所有遇到的新节点,消息的副本数不受任何限制,典型代表为 Epidemic 算法^[5],这种转发方法的优点是策略比较简单,从理论上能达到最高的消息投递成功率和最小时延,但是网络消息数呈指数级增长,对于缓存空间有限的机会网络来说,网络拥塞和缓存不足将导致性能急剧下降。为此,本文提出了基于节点效用评估的路由转发方法,利用网络中节点的状态信息和历史相遇行为采用效用函数给每个节点赋予转发效用值作为决策下跳节点的凭证,效用函数一般使用相遇预测、链路状态和上下文信息等不同参数来评估节点转发消息的能力,在传输过程中将每个消息副本由效用值低的节点转发到效用值高的节点^[1],代表算法为 Prophet^[6]和 MaxProp,解决了 Epidemic 算法转发的盲目性,但是网络消息传输代价仍然较高。有限副本转发则是一种利用票数严格控制消息副本数的策略,每条消息只允许在限制的副本数内被复制转发,比较典型的有 Spray and

Wait (SAW) 和 EBR 算法^[7],这种方法相对于传染机制大大降低了网络消息的副本数量和网络传输代价,但还存在以下问题。

1) 如何确定网络中消息的最优副本数,消息副本数的多少对网络性能有重要影响,如果副本数过多,由于节点缓存空间的限制则会导致大量的消息在成功转发前被丢弃,而消息副本数较少则使大量节点缓存空间被浪费,这2种方式都将导致网络消息投递成功率的降低。

2) 转发节点的效用评估准确性较低,目前,大部分路由方法只考虑与目标节点的相遇行为作为选择下一跳转发节点的决策依据,并没有考虑转发节点在网络中的活跃程度,而活跃节点类似于网络的主干线路具有较强的消息携带和传播能力。

3) 算法的开销较大,已有转发方法在相遇概率计算和路由表的维护方面需要付出较大的时空开销,而计算能力、缓存空间和能量有限的机会网络,需要一种轻量级的路由转发策略,以最大化地实现网络数据的共享和传递功能。

针对上述问题,本文提出了一种基于马尔可夫链的轻量级机会路由转发策略 (MOR),所谓轻量级是指处理的存储代价和复杂度较低,即占用较小的存储空间和网络带宽,算法复杂度低,运行速度快。该方法将系统的执行划分为多个大小相等的时间周期,节点在每个系统时间周期内与其他节点的相遇次数看作一个随机变量,对应于节点状态空间中的某一具体状态,每个时间周期节点的状态只与上一时间周期的状态有关,多个连续时间周期的节点状态序列构成了一个离散的马尔可夫链,将节点活跃度评估问题转换为节点状态预测问题,利用马尔可夫模型预测相遇节点下一周期的状态,作为评估节点活跃度的依据。然后,结合相遇节点与目标节点的平均相遇周期,综合决策转发节点携带消息到达目标节点的能力,每个节点只需要维护上一时间周期的状态和状态转移概率矩阵,以及一个一维向量表记录与其他节点的相遇时刻,算法简单,时空复杂度较低,并且有较高的投递成功率和较小时延。基于节点缓存空间大小、消息生存周期大小、网络中消息产生速度、网络节点数量等多项指标建立了消息副本数最优的设置方法,有效提高了网络性能。

2 相关工作

目前,研究者在机会路由决策、消息转发和副

本控制方面提出了一些解决方案。2009 年, Nelson 等^[7]提出了一种基于节点间历史平均相遇值进行消息转发决策的方法 ERB, 该算法的每个节点只需要维护一个相遇值表和当前窗口节点相遇次数表, 每隔一个窗口周期对相遇值表进行更新, 在消息转发过程中利用 2 个节点相遇值的比例实现消息副本数的分割, 算法简单易实现、节点能耗开销较小, 但是由于消息转发策略考虑的因素过少导致路由性能提高有限。2015 年, Shou^[8]针对消息副本数对网络性能影响, 提出了一种基于消息副本控制的机会路由决策方法, 该方法在转发过程中根据网络的拥塞情况动态调整消息的副本数, 有效降低了网络负载, 提高了消息转发效率; 同时针对消息多副本冗余传输所导致的某一消息副本传递成功后, 剩余消息副本变成垃圾消息造成网络传输浪费问题, 给出一种基于概率预测的垃圾消息副本清理方法, 该方法相对于传统的基于反馈列表的清除方法付出的网络代价较小。2015 年, Cao^[9]提出了一种基于地理位置信息的机会路由转发决策方案 GSaR, 该方案通过在每个节点内部记录节点历史游走的地理位置, 依据历史位置信息分析和预测目标节点未来可能移动的范围和区域, 在消息转发决策过程中将消息的副本都投向这个区域, 从而提高消息传递的成功率, 降低转发延时, 但是该方法需要每个节点都配置记录位置信息的传感器如 GPS, 导致节点的能耗开销较大, 很难适用于节点能量有限的机会网络。2013 年, 文献[10]提出了一种基于节点运动预测的高效路由算法 CS-DTN, 该算法根据节点之间的相遇概率和社会关系将节点分成不同的簇, 属于同一簇的节点相遇时根据相遇概率限制消息的副本数实现簇内转发, 不同簇的节点相遇时根据对节点的运动规律预测将消息转发到更接近于目的节点的中继节点中, 有效解决了不必要的消息转发带来的资源浪费问题。文献[11]提出一种基于最优停止理论的路由决策方法 OSDR, 该方法将每个时隙上所遇节点和目标节点的平均相遇时间看作一个随机变量, 根据该随机变量的统计特性得到一个停止观察、复制消息的规则, 其优点是可以在较小的相遇间隔和等待成本之间进行折衷, 能够实现数学期望意义上的最小消息投递延迟目标。2015 年, Andreea^[12]提出了一个标准的机会网络性能分析模型 DTN-Meteo, 该模型能够从数学的角度对已有机会路由算法的性能和最优化问题进行理论分析, 利用该数学分析工具有助于

实现对路由算法的优化和改进。2015 年, Lee^[13]针对机会网络中路由、消息复制和链路调度联合最优问题, 提出了一个在线近似最优的资源分配算法 (DMC), 该算法只依据节点当前观察到的可利用信息, 作为链路调度、转发节点选择和消息复制的决策依据, 有效解决了消息转发的盲目性和网络资源分配的均衡性问题。文献[14]提出了一种基于社会特征周期演化的机会移动网络路由转发策略, 利用消息生存周期 (TTL) 社区检测和中心性估计, 来预测节点在消息生存期内与其他节点相遇概率, 以此作为消息转发决策的依据, 优点是具有较低的消息交付代价。文献[15]提出了一种带有编码冗余控制的机会网络数据转发机制, 该方法利用分布式的感知数据编码机会, 以此确定转发数据分组的优先级, 在转发过程中通过估计每次相遇的持续时间和链路传输容量, 来控制要转发数据分组的数量, 其优点是在每次相遇机会出现时考虑了优先级较高的数据分组进行传输, 有效提高了消息转发的成功率。

3 网络模型

采用与文献[8]类似的网络模型, 整个网络是由 n 个移动节点构成的集合 V , 所有节点在有限的区域内移动, 利用无线射频装置收发数据, 其射频范围和通信带宽大小固定, 只有 2 个节点进入射频范围内才能够通过单跳无线链路进行数据交换。网络中的每个节点都具有全局唯一的 ID 标识 N_i , 以及大小相同容量有限的缓存空间 B , 任意节点均可产生相同尺寸大小的消息, 消息的目标节点可以是网络中其他任何一个节点。消息发送过程采用 Bundle 协议, 每个消息都具有唯一的 ID 标识 M_j , 除了消息的内容和 ID 外, Bundle 中用于消息控制的字段包括发送节点和目标节点的 ID、消息产生的时间戳 t 、消息生存周期 TTL 以及消息的副本数 nc 等属性, 为了让消息在时间维度上具有一致性, 假设所有节点时钟同步。节点在每个时隙检测所携带消息的生存时间内, 从缓存中丢弃生存时间已超时的消息, 当收到一个新的消息转发请求时, 如果剩余空间不足, 则丢弃缓存中最早接收的消息, 以腾出足够的空闲空间存储新消息。

4 基于马尔可夫链的路由转发策略

4.1 路由决策问题

机会网络路由的主要目标是如何最小延时地

将消息成功投递到目标节点，最理想的状态是能够准确预测到与目标节点的相遇时刻，但是在非周期性不规则移动网络中这种方法几乎不可能实现。文献[16]已证实了在机会网络中 2 个节点的相遇时间间隔服从幂律分布特性，利用节点间的历史相遇频率和平均相遇时间间隔可以有效预测节点的相遇概率，同时依据信息传播的规律，即网络中越活跃的节点传播信息的能力越强的特点，利用活跃节点携带转发消息能有效提升消息传播的广度和速度。因此，本文的机会路由转发策略是评估相遇节点的活跃度和与目标节点的平均相遇间隔，以此作为选择合适一跳转发节点的综合决策依据。

活跃度与时间周期相关，本文给出节点活跃度的定义：指单位时间周期内与其他节点的相遇状态，设节点的活跃度有 k 个等级，其等级空间 $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_{k-1}, s_k\}$ ， $s_l = l, 1 \leq l \leq k$ 。系统的执行分为多个等距的时间周期 $t = 0, 1, 2, \dots$ ，观察每个时间周期内节点活跃度的变化趋势，如图 1 所示，其中， t_i 表示系统的第 i 个时间周期， $q_i \in S$ 是第 i 个时间周期节点的活跃度。当 2 个节点在第 i 时间周期相遇时，只有将消息转发给第 $i+1$ 时间周期活跃度较大的节点才能提高消息投递成功率，这个问题可以通过观察的前 i 个时间周期节点活跃度序列建模，对第 $i+1$ 个时间周期活跃度进行的评估。

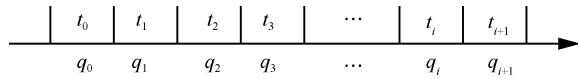


图 1 节点活跃度的变化趋势

由于机会网络的特征和节点的移动性，在每个周期与其他节点的相遇次数受多个因素影响，主要包括周期的长短、节点移动的速度、移动的方式、移动的区域以及其他节点在该区域的移动情况，其中，周期越长，节点的相遇次数就越多，由于网络中所有节点的周期大小都相同，所以周期因素对任意节点的影响都是相同的。节点的移动速度和移动方式主要决定节点在每个周期移动范围的大小，如果移动范围越大那么相遇次数就可能越多，最重要的影响因素是移动区域和其他节点在该周期内到达这个区域的情况，如果在该周期内其他节点到达这个区域的越多那么相遇次数就可能越多。然而，由于节点的移动速度和移动方式是随机的，如野外动物追踪网络中动物的移动速度、城市车辆网络中车辆的移动速度等，因此，该因素决定节点在每个

周期的状态是一个独立的随机变量。由于网络中其他节点也是随机移动的，所以在该周期内出现在节点所在区域的节点数量是一个随机数，因此，这个因素也决定了节点在每个周期的状态是一个独立的随机变量。但是，由于相邻周期节点的移动区域是连续的，所以相邻 2 个周期节点的相遇次数又具有一定的依赖性。因此，节点在每个时间周期的活跃度 q_i 是一个随机状态，多个连续时间周期的活跃度序列构成了一个离散事件的随机过程，并且节点 $i+1$ 周期的活跃状态分布依赖于与当前 i 周期的状态，独立于 $i-1$ 周期之前的活跃状态，从而该随机过程构成了一个离散的马尔可夫链，将节点活跃度评估问题转换为节点状态预测问题，利用马尔可夫模型预测相遇节点下一周期的状态。

4.2 基于马尔可夫链的节点活跃度预测

网络运行过程中，为了能够获取节点在每个时间周期的活跃度，节点需要在每个时间周期尾部统计在该周期内与其他节点的相遇次数，依据相遇次数来计算该周期的活跃度等级，并将其保存在活跃度状态链表中。

设节点 N_x 在第 i 个时间周期与网络中其他节点的相遇次数为 $n_i < n_{\max}$ ，则其活跃度等级 $q_i = s_l \in S$ ，必须满足

$$(l-1)n_{\text{avg}} \leq n_i < ln_{\text{avg}} \quad (1)$$

其中， $n_{\text{avg}} > 0$ 表示活跃度等级的宽度， $n_{\text{avg}} = \left\lfloor \frac{n_{\max}}{k} \right\rfloor$ ， n_{\max} 是从训练样本中获得的所有网络节点间的最大相遇次数，基于定义的活跃度等级级数 k 求解，该值与网络具体规模、节点密度和节点的移动模型密切相关。

由式(1)可推理得到 $l-1 \leq \frac{n_i}{n_{\text{avg}}} < l$ ，对其进行求解得到节点活跃度等级为

$$l = \begin{cases} \left\lfloor \frac{n_i}{n_{\text{avg}}} \right\rfloor + 1, & n_i < n_{\max} \\ k, & n_i \geq n_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

由于 n_{\max} 是训练样本值，网络在实际运行过程中，如果节点与其他节点相遇次数大于或等于 n_{\max} 时，则将该节点活跃度设置为最高等级 s_k ，这是因为训练值与真实值有可能存在不一致的情况。

节点多个连续周期的活跃度序列构成了一阶

马尔可夫链,由马尔可夫性质可知,节点在第 $i+1$ 周期活跃度的状态,只与第 i 周期的状态有关,即

$$\begin{aligned} &P(q_{i+1} = s_h | q_i = s_l, q_{i-1} = s_x, \dots) \\ &= P(q_{i+1} = s_h | q_i = s_l) \end{aligned} \quad (3)$$

因此,节点 N_x 在第 i 周期状态为 s_l 时,则在第 $i+1$ 周期状态等于 s_h 的概率为

$$P(q_{i+1} = s_h | q_i = s_l) = a_{l,h}, 1 \leq l, h \leq k \quad (4)$$

其中, $a_{l,h}$ 表示节点 N_x 的活跃度由状态 s_l 转移到状态 s_h 概率,满足 $a_{l,h} \geq 0$, 且 $\sum_{l=1}^k a_{l,h} = 1$ 。

节点 N_x 多个状态转移概率 $a_{l,h}$ 构成了二维的状态转移矩阵 $\mathbf{Q} = \{a_{l,h}\}_{k \times k}$, 描述节点在相邻周期活跃度状态的转移情况,可以通过大量训练集中的状态转移样本计算得到,假设 N_x 有 n 个活跃度序列的样本空间 $q'_1, q'_2, q'_3, \dots, q'_{n-1}, q'_n$, $q'_t \in S, 1 \leq t \leq n$, 则

$$a_{l,h} = \frac{\sum_{t=1}^{n-1} \delta(q'_t, s_l) \delta(q'_{t+1}, s_h)}{\sum_{t=1}^{n-1} \delta(q'_t, s_l)} \quad (5)$$

其中, δ 表示状态值对比函数,用于统计样本空间中相同状态的数量,计算式为

$$\delta(x, y) = \begin{cases} 1, & x = y \\ 0, & x \neq y \end{cases} \quad (6)$$

由式(4)和式(5)可知,在已知节点 N_x 活跃度状态转移概率矩阵 \mathbf{Q} 和上一周期活跃度状态的条件,就可以利用马尔可夫模型预测当前周期和以后多个周期节点最可能的活跃度状态,因为节点 N_x 在当前周期结束前无法准确获得该周期的活跃状态,只能依靠先前状态预测得出。

假设已知节点 N_x 在第 i 周期的状态为 s_l , 设 $\gamma_{i+j}(w)$ 表示节点 N_x 在第 $i+j$ 周期活跃度状态为 s_w 的概率,其中, $j \geq 1$, 则由马尔可夫链的性质可得

$$\gamma_{i+j}(w) = \sum_{l_o=1}^k \gamma_{i+j-1}(l_o) a_{l_o,w} \quad (7)$$

显然,在初始时刻 $j=1$ 时,由于 N_x 在第 i 周期的状态为 $q_i = s_l$, 可知 $\gamma_i(l) = 1$, $\gamma_i(l_o) = 0, l_o \in S \cap l_o \neq l$, 所以在第 $i+1$ 周期 N_x 活跃度为 s_h 的概率 $\gamma_{i+1}(h) = a_{l,h}$, 因此可以得出第 $i+1$ 周期 N_x 处于不同状态的概率为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\gamma}_{i+j} &= (\gamma_{i+j}(1), \gamma_{i+j}(2), \gamma_{i+j}(3), \dots, \gamma_{i+j}(k)) \\ &= (a_{l,1}, a_{l,2}, a_{l,3}, \dots, a_{l,k}) \end{aligned}$$

利用式(7)经过 j 次迭代计算即可得到任意 $i+j$ 周期 N_x 活跃度处于各个状态的概率向量 $\boldsymbol{\gamma}_{i+1} = (\gamma_{i+1}(1), \gamma_{i+1}(2), \gamma_{i+1}(3), \dots, \gamma_{i+1}(k))$ 。

在求得状态向量 $\boldsymbol{\gamma}_{i+j}$ 之后,就可以得到节点 N_x 在第 $i+j$ 周期活跃度处于不同活跃状态的概率值,其中,处于概率值最大的那个活跃状态则是节点 N_x 在第 $i+j$ 周期最可能的状态,即在第 $i+j$ 周期存在一个状态 $m \in S$, 使 $\gamma_{i+j}(m) = \max_{1 \leq x \leq k} \gamma_{i+j}(x)$, 则认为节点 N_x 在第 $i+j$ 周期最可能的状态为 $q_{i+j} = m$ 。因此,利用上述方法即可预测出第 i 周期后节点 N_x 在未来 j 个周期的状态 $q_{N_x}^j = (q_{i+1}, q_{i+2}, \dots, q_{i+j})$, 状态 m 的等级越高说明节点在第 $i+j$ 周期越活跃,具有更强的消息传播能力。因此,在消息转发过程中以状态 m 作为决策节点转发消息的依据或策略,将有助于提高网络转发的效率。

算法 1 节点活跃度预测算法

初始化: 设置系统时间周期 T ;

利用样本计算 $\mathbf{Q} = \{a_{l,h}\}_{k \times k}$; $q_{N_x}^j = \phi$;

设置预测的后续周期数 $j = \left\lceil \frac{TTL}{T} \right\rceil$;

if 第 i 周期结束 then

 统计该周期与其他节点的相遇次数 n_i ;

 利用式(2)计算节点的活跃度等级 q_i ;

end

for $g \leq j$ do

 利用式(7)计算向量

$\boldsymbol{\gamma}_{i+g} = (\gamma_{i+g}(1), \gamma_{i+g}(2), \gamma_{i+g}(3), \dots, \gamma_{i+g}(k))$;

 利用 $\gamma_{i+g}(m) = \max_{1 \leq x \leq k} \gamma_{i+g}(x)$ 计算第 $i+g$ 周期的活跃度 $q_{i+g} = m$;

$q_{N_x}^j = q_{N_x}^j \cup \{q_{i+g}\}$;

end

return $q_{N_x}^j$;

该算法进行节点活跃度预测只需要保存前一周期的状态和状态转移概率矩阵,假设每个字段占用 2B , 其存储空间只占用 $2(1+k^2)\text{B}$, 因此对缓存空间的要求较低。在计算后续 j 个周期的活跃度时,由于需要对每个周期的状态向量进行迭代计算,其时间复杂度最大为 $O(jk^2)$, j 表示消息最长生存的

系统周期数，其取值与消息的生存周期 TTL 和系统时间周期 T 有关，在预测节点活跃度状态时只考虑消息生存周期内节点的状态情况，即 $j = \left\lceil \frac{TTL}{T} \right\rceil$ 。

由此可知，该算法的复杂度与活跃度等级划分有关，而在实际网络应用中活跃度等级划分的层次一般比较小，如 $k = 10, j = 5$ ，则存储空间要求 202 B，时间复杂度为 $O(500)$ ，所以该算法具有较好的执行效率。

算法预测准确度与状态转移概率密切相关，由于状态转移概率是从大量实际网络样本中获得，所以与实际网络运行情况一致，只要保证算法每次预测的结果发生的概率最大，即可在理论上验证算法具有较好的预测效果，而该算法在进行预测时通过多次迭代得到发生概率最大的状态，如节点在第 i 周期状态为 $q_i = s_i$ ，利用该算法则可得节点在第 $i + j$ 周期的状态 $q_{i+j} = m$ ，且满足条件 $\gamma_{i+j}(m) = \max_{1 \leq x \leq k} \gamma_{i+j}(x)$ ，可知在第 $i + j$ 周期状态为 m 发生的概率相对于其他状态是最大，理论上 $\gamma_{i+j}(m) \times 100\%$ 的准确率，因此，与实际运行情况相比，能够保证预测到某个周期最可能发生的状态。

4.3 节点的平均相遇间隔

节点之间的平均相遇间隔对消息转发策略同样具有重要的影响，在消息转发决策过程中利用该指标可以预测与目标节点的相遇频率，平均相遇间隔越小说明 2 个节点间的相遇频率越高，也就是说 2 个节点能够再次相遇的时间就越短，在消息转发过程中选择这类节点作为转发节点，则将能够进一步降低消息转发延时和提高转发成功率。

任意节点对 (N_x, N_y) 在时间轴上存在一个相遇序列，如图 2 所示，其中， T_{N_x, N_y}^m 表示 N_x 与 N_y 第 m 次相遇的时刻， $J_{N_x, N_y}^m = T_{N_x, N_y}^{m+1} - T_{N_x, N_y}^m$ 表示 N_x 和 N_y 在第 m 和 $m+1$ 连续 2 次相遇的时间间隔，多次连续相遇间隔构成序列 $J_{N_x, N_y}^1, J_{N_x, N_y}^2, \dots, J_{N_x, N_y}^{m-1}, J_{N_x, N_y}^m, \dots, J_{N_x, N_y}^n$ ，因此，其平均相遇间隔 $\overline{J_{N_x, N_y}} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n J_{N_x, N_y}^m$ 。

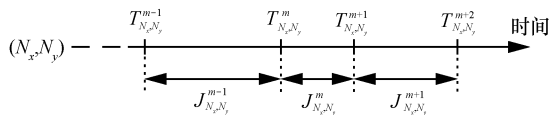


图 2 节点对的相遇间隔序列

网络中的每个节点 $N_x \in V$ 都维护一个 n 维向量 $\overline{J_{N_x}} = (\overline{J_{N_x, N_1}}, \overline{J_{N_x, N_2}}, \overline{J_{N_x, N_3}}, \dots, \overline{J_{N_x, N_n}})$ ，记录与其他节点的平均相遇间隔。当 2 个节点出现相遇机会建立网络链接后，首先请求相遇节点的平均间隔向量作为消息转发决策的依据，由于节点间的平均间隔是一个依据相遇情况动态变化的量，更新比较快，在每次消息转发决策时都需要最新的平均间隔向量，因此，为了保证平均间隔向量的时效性以及尽量节省存储空间，当 2 个节点断开网络链接后，则及时删除相遇节点的平均间隔向量，这样，每个节点只需要存储自身维护的平均间隔向量，假设向量中每个字段占 2 B，则节点的平均间隔向量 $\overline{J_{N_x}}$ 只需占用 $2n$ B，在交换平均向量数据分组时不需要过多的网络带宽，并且对节点存储空间的要求也较低。

4.4 路由转发策略

MOR 路由算法采用有限消息副本转发策略，每条消息的副本数最多有 L 个，消息由消息头和消息内容 2 部分组成，如图 3 所示，消息头字段 mid 、 N_0 、 N_k 、 t 、 TTL 、 nc 、 sig_{N_0} 分别表示消息 ID、源节点 ID、目的节点 ID、消息生成时间戳、消息的生存周期、消息剩余副本数以及源节点对消息的签名证据信息，消息内容 C 是加密数据，由源节点利用目的节点的公钥加密生成 $E_{N_kpk}(H(N_0 | t | N_k | C))$ ， $H(*)$ 是消息属性和内容的散列函数用于对消息进行验证。

消息头							消息内容	
消息	mid	N_0	N_k	t	TTL	nc	sig_{N_0}	$E_{N_kpk}(H(N_0 t N_k C))$

图 3 消息格式

消息携带节点在移动过程中依据相遇节点在后续周期的状态以及与目标节点的平均相遇间隔，综合决策是否将相遇节点作为消息转发节点。当节点 N_x 在移动过程中遇到节点 N_y 建立网络链接后，则首先向节点 N_y 请求后续 j 周期的状态集和平均间隔向量为 $N_x \leftarrow (q_{N_y}^j, \overline{J_{N_y}})$ ，然后查找缓存空间 B 中携带的消息集 M ，检测消息集中每条消息 $m \in M$ ，获取消息的目标节点 N_k 、时间戳 t 和剩余副本数 nc ，按照如下转发策略进行决策。

- 1) 计算消息 m 剩余的生存周期数 $rm = \left\lceil \frac{t_{cur} - t}{T} \right\rceil$ ， t_{cur} 为系统的当前时间。

2) 利用预测状态集 $q_{N_x}^j$ 、 $q_{N_y}^j$ 分别计算消息剩余生存时间内 N_x 和 N_y 的总体活跃度状态, 如果 $rn \leq j$, 则考虑消息生成周期内节点的状态, 即 $\overline{q_{N_x}} = \sum_{g=1}^m q_{i+g}$, $\overline{q_{N_y}} = \sum_{g=1}^m q_{i+g}$, 否则考虑未来 j 个周期节点的总体状态, 即 $\overline{q_{N_x}} = \sum_{g=1}^j q_{i+g}$, $\overline{q_{N_y}} = \sum_{g=1}^j q_{i+g}$ 。

3) 从平均间隔向量 $\overline{J_{N_x}}$ 和 $\overline{J_{N_y}}$ 中获取节点 N_x 和节点 N_y 与目标节点 N_k 的平均间隔 $\overline{J_{N_x, N_k}}$ 和 $\overline{J_{N_y, N_k}}$ 。

4) 如果 $f(\overline{q_{N_y}}, \overline{J_{N_y, N_k}}) \geq f(\overline{q_{N_x}}, \overline{J_{N_x, N_k}})$, 则 N_x 将具有 $\frac{nc}{2}$ 副本数的消息 m 传递给 N_y , 同时将 N_x 携带的消息 m 的剩余副本数改为 $nc - \frac{nc}{2}$, 否则, N_x 继续携带消息 m 直到遇到合适的转发节点。其中, $f(\ast)$ 表示消息转发决策效用函数, 依据节点未来周期的活跃状态和与目标节点的平均间隔综合决策节点的效用值, 效用值越大表示节点转发消息的能力越强, 如式(8)所示。

$$f(x, y) = \alpha(1 - e^{-\lambda x}) + \beta e^{-\eta y} \quad (8)$$

其中, 将活跃度和平均相遇间隔进行了归一化, $(1 - e^{-\lambda x})$ 是单调递增函数, 表示节点活跃度对消息转发能力的效用值, 活跃度等级越高说明节点与其他节点相遇机会越多, 消息传播能力就越强, 参数 λ 是调节活跃度效用值变化速度的因子。 $e^{-\eta y}$ 是单调递减函数, 表示节点平均相遇间隔对消息转发能力的效用值, 平均相遇间隔越大说明与目标节点相遇概率越低, 消息转发能力就越弱, 参数 η 是调节相遇间隔效用值变化速度的因子。 α 和 β 表示活跃度效用和平均相遇间隔效用的权重因子, $\alpha + \beta = 1$ 。

算法 2 基于 MOR 的路由算法

初始化: 对新产生的消息设置 $nc = L$;

if N_x 在第 i 周期与 N_y 建立链接 then

N_x 获取 N_y 预测的状态集和平均间隔向量

$$N_x \leftarrow (q_{N_y}^j, \overline{J_{N_y}});$$

if $B_m \neq \emptyset$ then

将需要转发的消息添加到集合 M 中;

end if

for $\forall m \in M$ do

从 m 中得到消息的目标节点 N_k 、时间戳 t 和剩余副本数 nc ;

$$\text{计算 } m \text{ 剩余的生存周期数 } rn = \left\lceil \frac{t_{\text{cur}} - t}{T} \right\rceil;$$

if $rn \leq j$ then

$$\text{计算 } N_x \text{ 后续周期总状态 } \overline{q_{N_x}} = \sum_{g=1}^m q_{i+g};$$

$$\text{计算 } N_y \text{ 后续周期总状态 } \overline{q_{N_y}} = \sum_{g=1}^m q_{i+g};$$

else

$$\text{计算 } N_x \text{ 后续周期总状态 } \overline{q_{N_x}} = \sum_{g=1}^j q_{i+g};$$

$$\text{计算 } N_y \text{ 后续周期总状态 } \overline{q_{N_y}} = \sum_{g=1}^j q_{i+g};$$

end if

获取 N_x 、 N_y 与 N_k 的间隔 $\overline{J_{N_x, N_k}}$ 、 $\overline{J_{N_y, N_k}}$;

if $f(\overline{q_{N_y}}, \overline{J_{N_y, N_k}}) \geq f(\overline{q_{N_x}}, \overline{J_{N_x, N_k}})$ then

N_x 将消息 m 的副本传递给 N_y , 其剩

余副本改为 $\frac{nc}{2}$;

将 N_x 携带的消息 m 的剩余副本数改

为 $nc - \frac{nc}{2}$;

else

N_x 将继续携带消息 m ;

end if

end for

end if

该路由算法每次节点相遇时交换状态信息和平均间隔向量, 需要传递 $2(j+n)B$ 的数据, 而在消息转发决策时, 只需要循环检测每条消息和迭代计算节点的总体状态, 其时间复杂度最大为 $O(|M|j)$, 因此具有较好的决策效率。其次, 该算法消息沿着节点效用值递增的方向传递, 效用值越高的节点具有越好的消息传播广度和速度, 使消息被转发到目标节点的概率越来越高, 从而有效提高了消息转发的成功率和降低了转发延时。

MOR 算法是一种轻量级的机会路由转发方法, 与传统基于状态和相遇概率预测方法相比, 如 Prophet、MaxProp 等, 在存储代价、网络带宽占用、复杂度和运行速度方面具有一定优势, 如表 1 所示。MOR 算法由于只存储状态转移概率矩阵、平均间

隔向量和前一周期的状态，因此占用存储空间较小，为 $2(1+k^2+n)$ B，状态转移概率不需要在运行时更新，大大节省了节点的计算资源，提高了运行速度，预测节点状态算法的复杂度仅为 $O(jk^2)$ 。而 Prophet 算法由于采用相遇概率预测方法，每个节点维护一个向量表记录与其他节点的相遇概率，占用 $2n$ B 的存储空间，但是节点每次相遇时都需要互相交换向量表，需要网络传输 $2n$ B 数据，并对向量表进行更新，更新频率较高，浪费了节点大量的计算资源，算法时间复杂度为 $O(n^2)$ ，运行效率较低。MaxProp 同样采用相遇概率预测方法，但是每个节点维护一个概率矩阵记录网络中节点间的历史相遇信息，占用存储空间为 $2n^2$ B，每次节点相遇时互相交换更新后的概率矩阵，需要在网络中交换 $2n^2$ B 的数据，频繁更新浪费大量计算资源，其算法更新的复杂度为 $O(n^2)$ 。

表 1 与非轻量级算法性能对比

算法	存储代价/B	网络带宽/B	复杂度	是否更新
MOR	$2(1+k^2+n)$	$2(j+n)$	$O(jk^2)$	否
Prophet	$2n$	$2n$	$O(n^2)$	是
MaxProp	$2n^2$	$2n^2$	$O(n^2)$	是

5 仿真实验

为了验证 MOR 路由算法的性能和有效性，在 ONE(opportunistic network environment)模拟器上仿真运行了该路由算法。ONE 模拟器是由芬兰赫尔辛基理工大学专门为 DTN 网络和机会网络开发的仿真平台，提供了多种节点移动模型和仿真场景，且实现了如 Epidemic、Spray and Wait、Prophet 等经典算法，为体现 MOR 路由算法的优势，与这几种路由算法进行了对比分析。

5.1 实验环境设置及性能指标

利用 ONE 模拟器自带的赫尔辛基城市地图作为仿真场景，整个网络的节点数设置为 200，所有移动节点都按照地图的最短路径移动模型和地图路由模型进行游走，节点移动范围设置为 $4\ 500\text{ m} \times 3\ 400\text{ m}$ 。仿真时间设置为 24 h，每个节点的移动速度为 $0.5\sim 1.5\text{ m/s}$ ，设置消息事件产生器每隔 $25\sim 35\text{ s}$ 生成一个消息，消息的源节点和目标节点从节点集合中随机选取，整个模拟过程共产生 2 900 条消息，每条消息的尺寸设置为 512 KB，消息的生存周期 TTL 设置为 $30\sim 240\text{ min}$ ，节点缓存空间 B 的大小

设置为 $5\sim 60\text{ MB}$ ，仿真时间周期 T 为 $10\sim 80\text{ min}$ 。通过多次实验分析得出节点在 1 000 s (17 min 左右)时系统的性能最优，而当时间周期为 1 000 s 时，节点在每个周期的相遇次数基本分布在 $0\sim 120$ ，且大于 90 的很少，所以将节点活跃度等级空间 k 设为 10。活跃度效用因子 $\alpha = 0.6$ ，时间间隔效用因子 $\beta = 0.4$ ，在这 2 个参数设置下网络性能表现最好。其他路由算法参数设置为：Prophet 路由算法概率变化参数 P_INIT 设置为 0.75，时间衰减参数 Gamma 设为 0.98；SAW 算法每条消息最大副本数为 10，节点相遇时采用副本均分策略。具体仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真环境参数设置

参数	取值
节点数	200 个
网络区域	$4\ 500\text{ m} \times 3\ 400\text{ m}$
节点通信半径	10 m
消息生存周期	$30\sim 240\text{ min}$
交付/接收消息速度	250 KB/s
节点缓存空间	$5\sim 60\text{ MB}$
节点到达目的节点后停留时间	$0\sim 120\text{ s}$
数据分组大小	512 KB
系统时间周期	$10\sim 80\text{ min}$
节点缓冲区管理	随机
节点产生消息周期	$25\sim 35\text{ s}$
移动模型预热运动时间	100 s

评价消息转发路由算法性能优劣的主要指标包括消息传递成功率、消息平均转发时延以及消息交付代价，消息传递成功率越高说明在转发消息时选择的转发节点越准确，设 d_prob 为消息传递成功率，则

$$d_prob = \frac{Num_d}{Num_c} \quad (9)$$

其中， Num_d 为整个网络成功传递的消息数， Num_c 为网络总共产生的消息数。

设 l_avg 为消息平均转发时延，是网络中所有消息从源节点产生到成功传递到目标节点平均延迟的时间，该指标值越小表示消息传递速度越快，说明路由算法的转发效率就越高， l_avg 的定义如式(10)所示。

$$l_avg = \frac{1}{|M_d|} \sum_{m \in M_d} lT_m \quad (10)$$

其中, M_d 表示成功传递的消息集合, IT_m 表示消息 m 传递到目标节点的延迟时间。

设 o_ratio 为消息交付代价, 是消息被传递的总次数与成功传递的消息数差, 与成功传递的消息数的比例, 该指标评估网络的开销情况, 传递总数越大, 网络开销比率越大, 成功到达数目越大, 网络开销比率越小表示网络性能越优。

$$o_ratio = \frac{Num_r - Num_d}{Num_d} \quad (11)$$

其中, Num_r 为所有消息被传递的总次数, Num_d 表示成功传递的消息数。

5.2 仿真结果与分析

实验 1 消息副本数对网络系统的影响

实验设置消息生存周期为 60 min, 考察消息副本数的变化对网络系统的影响以及给出消息副本数最优化的计算方法。图 4 给出了在缓存分别为 5 MB、10 MB、20 MB 条件下随着消息副本数的增加 MOR 算法性能指标的变化情况。由图 4(a)可以看出, 随着消息副本数的增加, 3 种缓存条件下的消息传递成功率都呈现出由低升高再缓慢降低的趋势, 并且缓存空间越多大消息传递成功率越高, 缓存为 5 MB 时消息副本数在 20 左右时消息传递成功率达到峰值, 缓存为 10 MB 时消息副本数为 30 左右时消息传递成功率达到了峰值, 而缓存为 20 MB 时消息副本数为 70 左右时消息传递成功率才达到峰值, 可以看出缓存越大要求的消息副本数越多, 这是由于节点缓存空间的限制而导致的, 如果副本数过多则由于节点缓存空间无法存储过多的消息副本致使大量的消息在被成功转发前丢弃, 而消息副本数较少则使大量节点缓存空间被浪费, 这 2 种情况导致消息传递成功率达不到最优。

由图 4(b)可以看出随着消息副本数的增加, 3 种缓存条件下的消息平均转发延时都明显呈现下降趋势, 并且缓存越大, 消息平均转发延时越高, 这是因为在统计消息转发延迟时间时只考虑成功传递的消息, 对那些由于缓存空间限制而被删除的消息未考虑, 因此, 传递成功的消息其副本数越多, 转发延时就越短。而缓存越大节点携带的消息就越多, 由于节点相遇时间和带宽的限制, 每次相遇过程转发的消息数受限, 缓存越大需要越多的相遇机会才能将消息转发出去, 导致消息转发延时相对于小的缓存较高。由图 4(c)可以看出, 随着消息副本

数的增加, 3 种缓存条件下的消息交付代价都明显呈现上升趋势, 并且 3 种缓存条件消息交付代价比较接近, 这是因为副本数越多消息被传递的总次数就越大导致网络开销增大, 而 3 种缓存条件由于缓存越大被删除的消息就越少, 所以成功传递的消息数和传递的总次数都比小的缓存多, 因此消息交付代价比较接近。

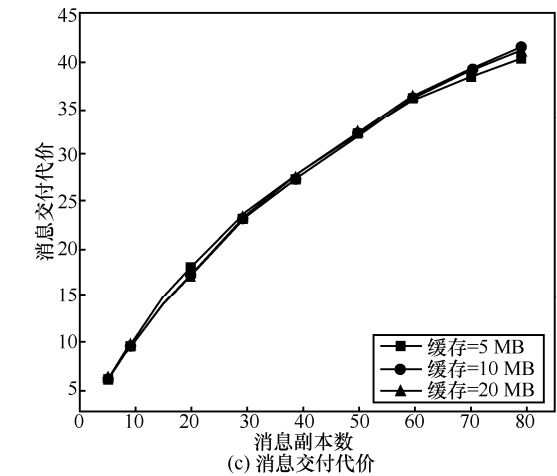
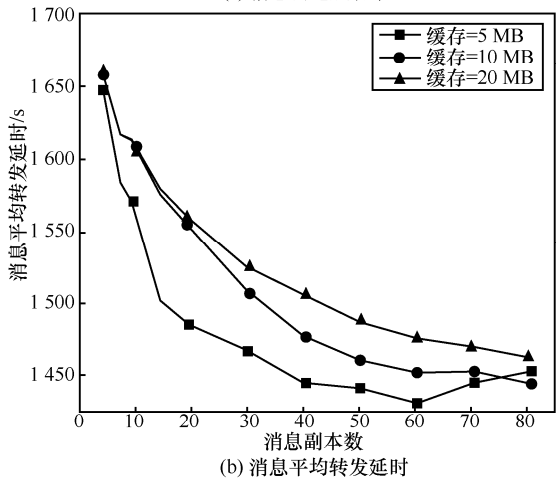
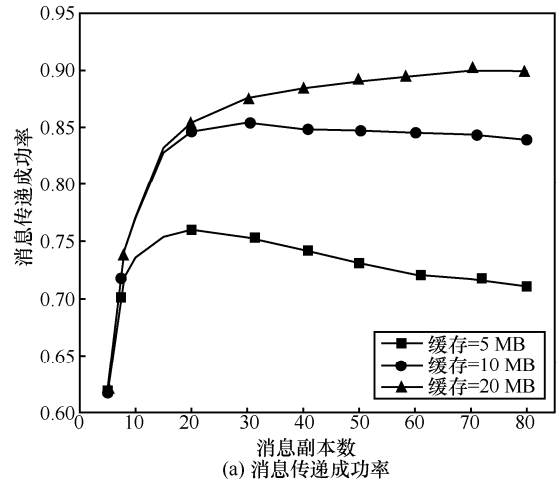


图 4 消息副本数对网络性能的影响

由上述实验结果可知，消息副本数的大小对消息传递成功率有重要影响，而最优消息副本数的设置与节点缓存 B 、消息尺寸 s_m 、消息生存周期 TTL 、消息产生速度 r_m 、网络节点数 n 等参数相关，只有当整个网络正好能够容纳消息生存周期内产生的所有消息副本数时，才能使消息传递成功率达到峰值，这样缓存空间即不浪费也不会删除过多的消息副本，此时消息副本数则是最优的，基于该原理建立消息副本数最优的设置方法，如式(12)所示。

$$\frac{60TTL}{r_m}L = n\frac{B}{s_m} \quad (12)$$

由式(12)可得消息副本数 $L = \frac{nBr_m}{60s_mTTL}$ ，如实验

参数 $n = 200, r_m = 30 \text{ s}, s_m = 512 \text{ KB}, TTL = 60 \text{ min}$ ，当缓存为 5 MB 时， $L \approx 16.7$ ，缓存为 10 MB 时， $L \approx 33.3$ ，缓存为 20 MB 时， $L \approx 66.7$ ，该理论计算结果与实验结果非常接近，说明消息副本数最优设置方法有效。

实验 2 系统周期对网络系统的影响

实验设置消息生存周期 TTL 为 60 min、缓存空间为 5 MB，消息副本数 L 为 20，考察系统周期大小对网络性能的影响。图 5 给出了随着系统周期大小的调整 3 种性能指标的变化情况。由图 5(a)可以明显看出消息传递成功率呈现先升后降的趋势，大概在 17 min 左右时消息传递成功率达到了峰值，这是因为当系统周期较小时，多数节点在一个周期内与其他节点的相遇次数较少，致使多数节点的活跃度相同，而系统周期较大时，多数节点在一个周期内与其他节点的相遇次数超过了预定义的最大相遇次数，致使多数节点的活跃度均为最大状态 10，导致在决策时很难依据活跃状态区分节点的转发能力。而系统周期为 17 min 时，恰好能够区分节点的活跃度状态，可以提供有效的决策依据。由图 5(b)可以看出消息平均转发延时呈现出先下降后升高的趋势，在 15~17 min 时平均转发延时最低，这是因为系统周期在这个范围时能够有效地区分节点的传播能力，将消息转发到了传播能力更大的节点中，从而降低了消息转发延时。由图 5(c)可以看出消息交付代价基本没有变化，这主要是由于当系统周期较大或较小时成功传递的消息数减少，但是消息被转发的总次数也减少，而系统周期设置合理时

虽然成功传递的消息数较多，但消息转发的总次数也增多，导致网络的消息交付代价没有变化。

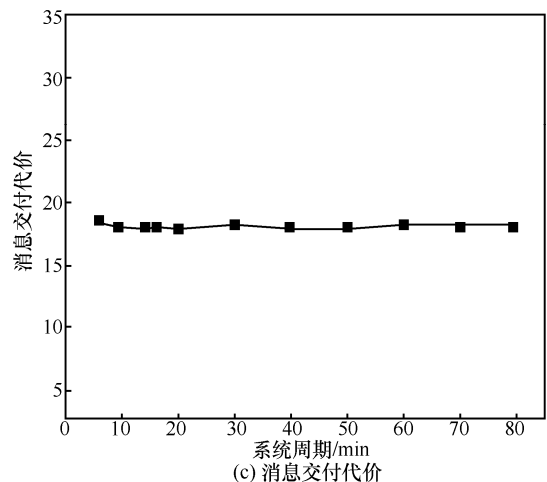
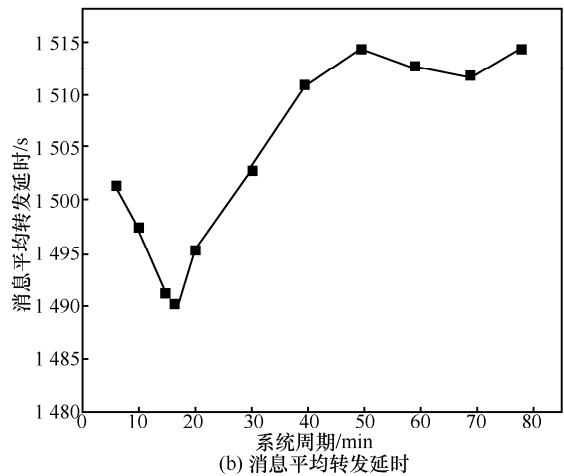
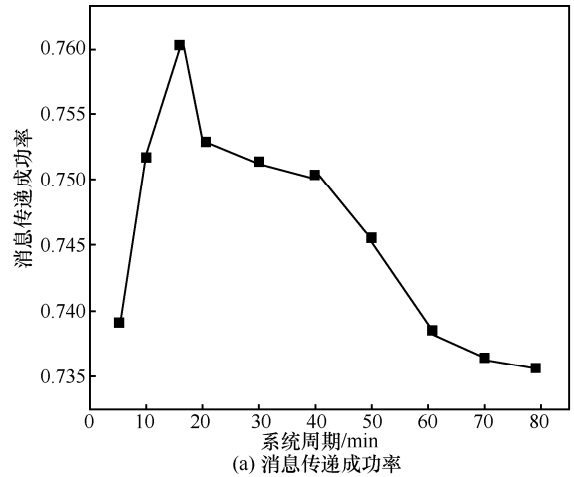
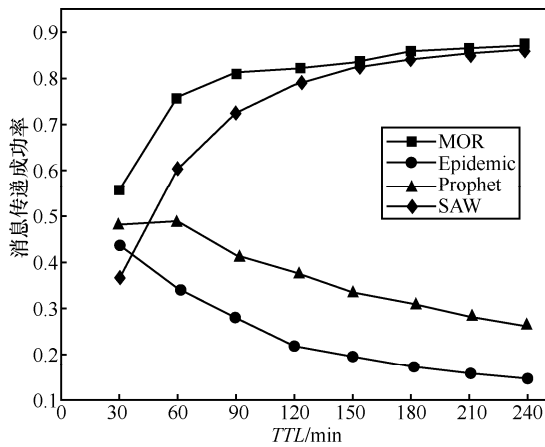


图 5 系统周期对网络性能的影响 ($TTL=60 \text{ min}$, 缓存=5 MB)

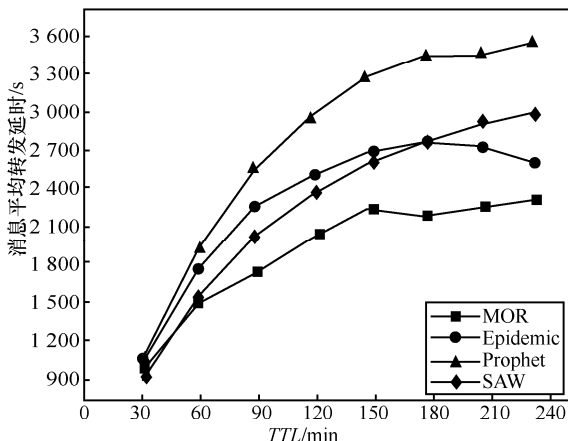
实验 3 消息生存周期对网络性能的影响

实验设置节点缓存大小为 5 MB，系统周期为 17 min，基于 TTL 的大小利用式(12)计算最优消息副本数，考察消息生存周期 TTL 的变化对网络性能

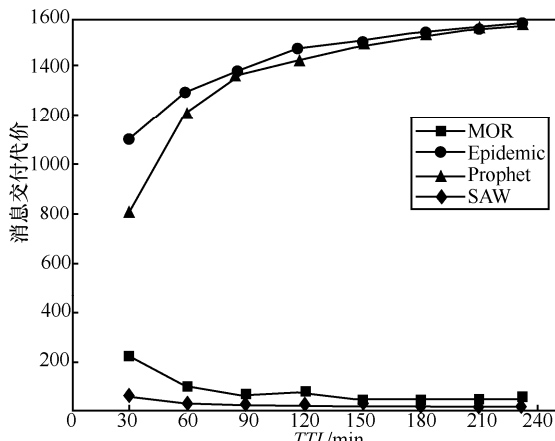
的影响。图 6 给出了随着消息生成周期增加 4 种路由算法网络性能指标的变化情况。由图 6(a)可以看出 MOR 算法和 SAW 算法均呈现明显上升趋势，MOR 算法较其他几种算法有一定的优势，尤其是在消息生存周期较小时更加明显，当 TTL 为 90 min 时其成功率达到 82%左右，之后上升趋势比较缓慢，说明 MOR 算法受 TTL 的影响较小，这是因为



(a) 消息传递成功率



(b) 消息平均转发延时



(c) 消息交付代价

图 6 消息生存周期对网络性能的影响

MOR 算法采用了节点活跃度和平均相遇间隔相结合的转发策略以及根据网络资源配置动态计算消息副本数，从而有效提高了消息传递成功率。Epidemic 和 Prophet 算法随着 TTL 的增加其消息传递成功率呈现出了下降趋势，这是因为这 2 种算法采用了无限副本转发策略，当 TTL 增加时，由于消息无法及时传递到目标节点，在网络中产生了大量的消息副本，超出了节点缓存的存储能力，致使节点为了容纳新消息不得不删除没有被转发的消息，从而降低了消息传递成功率。由图 6(b)可以看出随着消息生成周期的增加，4 种算法的平均转发延时都呈现上升趋势，MOR 算法具有明显的优势，在 TTL 为 240 min 时 MOR 的平均转发延时为 2 300 s 左右，而 Prophet 算法和 SAW 算法分别高达 3 600 s 和 3 000 s 左右，说明 MOR 算法利用活跃度和平均相遇间隔能够找到一条延时较短的转发路径。由图 6(c)可以看出 MOR 和 SAW 算法的消息交付代价比 Epidemic 和 Prophet 算法有较明显的优势，而 MOR 算法的消息交付代价略高于 SAW 算法，这是因为 SAW 算法采用 Spray and Wait 策略消息的副本数和传递次数较少的原因，MOR 算法消息沿着活跃度递增的梯度传递使消息被传递的总次数也较少，从而具有较小的消息交付代价。

实验 4 考察缓存空间对网络性能的影响

实验设置 TTL 为 90 min，系统周期为 17 min，基于缓存空间的大小利用式(12)动态计算最优消息副本数，通过调整缓存大小考察各种算法性能指标的变化情况。由图 7(a)可以看出 MOR 算法较其他几种算法在消息传递成功率方面有较大的优势，当缓存为 30 MB 时其成功率达到了 96.5%左右，之后趋于稳定状态，这说明 MOR 算法只需要较小的节点缓存空间，因此该算法比较适用于缓存有限的机会网络，而 SAW 算法由于在转发过程中产生较少的消息副本，使该算法几乎不受节点缓存空间的影响，Epidemic 和 Prophet 这 2 种算法随着缓存空间的增加其传递成功率呈上升趋势，当缓存空间为 60 MB 时 Prophet 算法的传递成功率才接近于 MOR 算法，这是因为节点缓存空间的增大能够携带更多的消息副本，从而增加了消息转发机会，使消息传递成功率增加，说明这 2 种算法对缓存空间的要求较高，很难适用于缓存有限的网络。由图 7(b)可以看出 MOR 和 SAW 算法的消息平均转发延时基本维持在一个稳定状态，MOR 算法消息平均转发延时维持在

1 620 s 左右，而 SAW 算法维持在 2 050 s 左右，这是因为这 2 种算法对缓存要求较低所致，当缓存增大时 SAW 算法由于消息副本数较少导致缓存浪费，使平均转发延时不变，而 MOR 算法，当缓存增大时消息副本数也随之增加，使该算法能够充分利用节点缓存空间，并且由于 MOR 算法采用活跃度和平均相遇间隔相结合的转发策略，使消息由源节点

传递到目标节点只需要较短的跳数，因此缓存增大对平均转发延时影响较小，在缓存增加到 30 MB 之后处于一个稳定状态。由图 7(c)可以看出 MOR 算法随着缓存空间的增加消息交付代价升高，在缓存为 30 MB 之后消息交付代价基本稳定在 38 左右，这是因为缓存越大消息的副本数越多，使消息被转发的总次数增多，所以消息交付代价升高，当缓存增加到 30 MB 之后网络中消息被转发的总次数不再增加，使消息交付代价处于一个稳定状态。SAW 算法由于消息被转发的总次数较少使消息交付代价稳定在 5.4 左右，而 Epidemic 和 Prophet 算法虽然呈现先上升后下降的趋势但其消息交付代价仍远远高于 MOR 和 SAW 算法。由此可知，MOR 算法相对于其他 3 种算法具有一定的优势，对网络缓存空间要求较低。

6 结束语

本文提出了一种基于马尔可夫链的轻量级的机会路由转发方法，该方法将节点活跃度评估问题转换成节点状态预测问题，把节点在每个周期与其他节点的相遇次数看作一个随机变量，转换成状态空间中的某一活跃状态，使多个连续时间周期的节点状态序列构成一个离散的马尔可夫链，利用马尔可夫模型分析和预测节点后续周期的状态，有效提高了节点活跃状态评估的准确性和高效性。构建了基于节点活跃度和平均相遇间隔的综合效用评估方法，作为消息转发策略决策的主要依据，该方法充分考虑了相遇节点未来的活跃状况以及与目标节点的历史相遇情况，算法简单高效，时空复杂度较低，大大提高了消息转发的成功率、减小了消息转发时延，比较适用于缓存空间有限的机会网络。给出了基于网络资源配置的最优消息副本数的设置方法，解决了消息副本数设置的盲目性问题，有效均衡了网络资源的使用率。

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 Y P, SUN L M, NIU J W, et al. Opportunistic networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(1):124-137.
 [2] 苏金树, 胡乔林, 赵宝康, 等. 容延容断网络路由技术[J]. 软件学报, 2010, 21(1): 119-132.
 SU J S, HU Q L, ZHAO B K, et al. Routing techniques on delay/disruption tolerant networks[J]. Journal of Software, 2010, 21(1):119-132.
 [3] CHAKCHOUK N. A survey on opportunistic routing in wireless

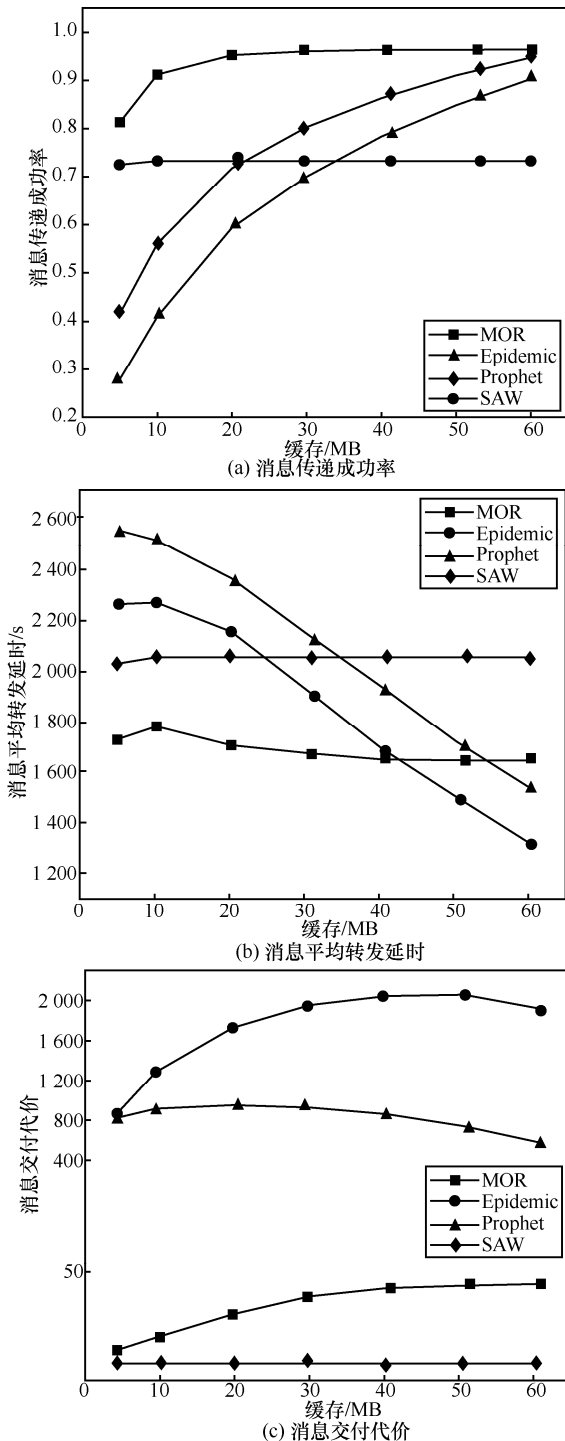


图 7 缓存空间对网络性能的影响

- communication networks[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2015, 17(4): 2214-2241.
- [4] KAIMIN W, XIAO L, KE X. A survey of social-aware routing protocols in delay tolerant networks: applications, taxonomy and design-related issues[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1):556-578.
- [5] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks[R]. Duke University, Cs-2000-06, 2000.
- [6] LINDGREN A, DORIA A, SCHELEN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. ACM Sigmobile Mobile Compute, 2003, 7(3): 19-20.
- [7] NELSON S C, BAKHT M, KRAVETS R, et al. Encounter based routing in DTNs[J]. ACM Sigmobile Mobile Computing and Communications Review, 2009, 13(1): 56-59.
- [8] LO S C, TSAI C C, LAI Y H. Quota-control routing in delay-tolerant networks[J]. Ad Hoc Networks, 2015, 25: 393-405.
- [9] CAO Y, SUN Z, WANG N, et al. Geographic-based spray-and-relay (GSaR): an efficient routing scheme for DTNs[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(4): 1548-1564.
- [10] 张振京, 金志刚, 舒炎泰. 基于节点运动预测的社会性 DTN 高效路由. 计算机学报, 2013, 36(3): 626-635.
ZHANG Z J, JIN Z G, SHU Y T. Efficient routing in social DTN based on nodes' movement prediction[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(3): 626-635.
- [11] 张三峰, 黄迪, 陈州, 等. 一种面向机会网络路由的最优停止决策方法[J]. 软件学报, 2014, 25(6):1291-1300.
ZHANG S F, HUANG D, CHEN Z, et al. Optimal stopping decision method for routing of opportunistic networks[J]. Journal of Software, 2014, 25(6): 1291-1300.
- [12] PICU A, SPYROPOULOS T. DTN-meteo: forecasting the performance of dtn protocols under heterogeneous mobility[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2015, 23(2): 587-602.
- [13] LEE K, JEONG J, YI Y, et al. Max contribution: an online approximation of optimal resource allocation in delay tolerant networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(3): 592-605.
- [14] 黄永锋, 董永强, 张三峰. 基于社会特征周期演化的机会移动网络路由转发策略[J]. 通信学报, 2015, 36(3): 2015055.
HUANG Y F, DONG Y Q, ZHANG S F. Message forwarding based on periodically evolving social characteristics in opportunistic mobile networks[J]. Journal on Communications, 2015, 36(3): 2015055.
- [15] 吴大鹏, 楼芃雯, 刘乔寿, 等. 带有编码冗余控制的机会网络数据转发机制[J]. 通信学报, 2015, 36(3): 5-2015059.

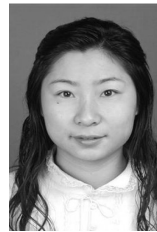
WU D P, LOU P W, LIU Q S, et al. Coding redundancy controlled data forwarding mechanism in opportunistic networks[J]. Journal on Communications, 2015, 36(3): 5-2015059.

- [16] CHAINTREAU A, HUI P, CROWCROFT J, et al. Impact of human mobility on opportunistic forwarding algorithms[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(6):606-62.

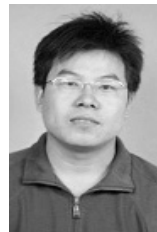
作者简介:



李峰 (1978-), 男, 山东德州人, 博士, 东北大学讲师, 主要研究方向为机会网络和信任关系建模技术。



司亚利 (1981-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 燕山大学副教授, 主要研究方向为移动推荐。



陈真 (1987-), 男, 陕西宝鸡人, 燕山大学博士生, 主要研究方向为 Web 服务评估和机会网络。



申利民 (1962-), 男, 黑龙江佳木斯人, 博士, 燕山大学教授、博士生导师, 主要研究方向为软件工程和可信计算。