

机会网络中能量有效的副本分布状态感知路由机制

吴大鹏, 樊思龙, 张普宁, 吕翊, 王汝言

(重庆邮电大学 宽带泛在接入技术研究所, 重庆 400065)

摘要: 针对机会网络中的节点能耗与消息扩散程度之间存在矛盾, 基于节点能耗与副本状态感知的路由机制可以显著地改善资源受限场景的网络性能, 综合考虑消息扩散程度与节点剩余能量, 并结合节点相遇概率预测方法, 提出能量有效的副本分布状态感知路由机制, 为消息分布式地选择合理的中继节点。仿真结果表明, 所提出的路由机制能够有效降低网络负载, 并大幅改善消息投递率和平均时延性能。

关键词: 机会网络; 扩散程度; 能量有效; 相遇概率

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)07-0049-10

Energy efficient copy distributing status aware routing mechanism in opportunistic network

WU Da-peng, FAN Si-long, ZHANG Pu-ning, LV Yi, WANG Ru-yan

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

Abstract: In opportunistic network, the relation between the node energy and message spreading degree is tradeoff. As a result, the network performance can be dramatically improved in limited resource scenarios by an effective routing mechanism considering the node energy and copy status. Both the message spreading degree and node residual energy were taken into consideration, and then combined with the encounter probability predicting methods, an energy efficient copy distributing status aware routing mechanism was proposed, which could be used to choose the relay nodes reasonably. Numerical results show that the overhead can be reduced efficiently, and the message delivery ratio and latency can also be optimized.

Key words: opportunistic network; spreading degree; energy efficient; encounter probability

1 引言

随着大量低成本、具备短距离通信能力的智能设备逐渐普及, 移动自组网(MANET, mobile ad hoc network)^[1] 相关应用得到了快速发展。传统的 MANET 路由协议要求源节点和目标节点之间至少存在一条完整的路径, 但在许多实际环境中, 由于节点移动、网络稀疏等原因, 导致节点之间无法建立端到端路径以实现有效通信^[2,3]。机会网络利用节点移动形成的相遇机会, 以更加灵活的“存储—携带—转发”方式逐跳实现节点间通信^[4,5], 受到了国内外研究人员的广泛关注。

显然, 对于动态性极强的机会网络来说, 设计合理的路由机制是其关键问题之一。针对机会网络的特性, 国内外研究人员提出了多种路由机制。文献[6]提出了 Epidemic 路由机制, 该机制采用泛洪的方式向网络中扩散消息的副本, 在节点缓存与带宽无限的场景下可达到较好的网络性能, 但在资源受限的机会网络中, 泛洪机制所产生的开销较大。为提高资源受限场景下的消息转发效率, 文献[7]提出了基于概率预测的 PROPHET 机制, 该机制根据节点运动过程的历史信息, 利用概率传递性对任意节点之间的相遇状态进行估计, 进而选择与目的节点相遇概率较高的节点作为中继节点。文献[8]

收稿日期: 2012-07-04; 修回日期: 2012-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61001105); 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2013jjB40001, cstc2013jjB40006)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61001105); The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2013jjB40001, cstc2013jjB40006)

利用主动移动的节点实现消息的收集和转发,解决了稀疏网络中的消息转发问题,但需要特殊节点支持,应用范围相对有限。文献[9]根据机会网络拓扑随时间动态演进的特性,提出一种时间演进图模型,该模型采用马尔可夫链和生灭过程描述拓扑演进过程的时间相关性,结果表明,所提机制能够准确反映机会网络消息传输路径的演进特性,但是时间演进图模型的建立和更新需要较多的节点计算资源。机会网络中的节点通信范围有限且以较大概率处于运动状态,节点之间的链路持续较短。文献[10]提出基于通信容量的消息转发机制。通过估计节点相遇持续时间和传输带宽对通信容量进行预测,并定义相应的效用函数描述消息的重要程度,进而根据通信容量预测结果优先转发重要程度较高的消息。

根据机会网络的工作原理,数据转发过程需多个中继节点辅助。机会网络中节点能量、缓存等多种资源受限,若节点频繁地进行数据转发,将导致其能量快速消耗直至节点死亡,而节点死亡率过高将引起网络连通度极度恶化,因此,中继节点的选取需考虑节点当前的能量消耗状态,以达到延长网络寿命、提高网络性能的目的。

此外,在连通度较差的机会网络中,消息的转发过程需要向网络中扩散多个副本,以提高消息的成功投递率,降低平均时延,当节点有限的缓存空间占满时,需要执行缓存管理操作,以提高网络的运行效率。针对机会网络缓存资源有限的特性,研究人员提出了多种缓存管理方法。文献[11]根据消息的紧迫性,在消息产生之后由源节点为其赋予相应的效用值,效用值越高的消息其转发优先级也越高,然而,该方法假设消息在传播过程中效用值恒定,对网络状态动态变化的适应性较弱。文献[12]定义了消息与节点的相关度参数,并在此基础上设计了相应的缓存替换管理策略。文献[13]将边际效用递减规律引入到机会网络中,并提出了综合考虑消息副本数与副本传输速率的缓存替换策略。文献[14]从理论上推导了最大消息投递率和最小延迟需满足的条件,并制定了相应的消息删除策略。文献[15]提出一种基于消息重要性的缓存管理策略,以消息副本在网络中的分布状态和生存时间来确定消息的重要程度,当缓存空间不足时,优先删除重要性较低的消息。可见,对于动态性较强的机会网络来说,消息扩散程度与转发必要性之间存在直接

关系,消息的扩散程度越高,则表明该消息已经成功投递的概率越高,其继续转发的必要性也就越低。因此,数据转发机制及缓存管理方法需要充分考虑给定消息在网络中的分布状态。

本文提出了能量有效的副本分布状态感知路由机制(EECDR, energy efficient copy distributing status aware routing mechanism),节点以分布式的方式估计消息的扩散程度,进而确定其重要程度,同时,综合考虑节点能量和节点相遇概率参数评估相遇节点的转发能力,从而合理地选择下一跳中继节点。

2 消息扩散程度估计方法

实际测量结果表明,机会网络呈现出“大世界小世界”现象^[16]。通常,按照节点的聚集程度,网络拓扑结构从逻辑上可以划分为若干个社区,且网络中的每个节点对应唯一的归属社区。节点以较大的概率在本地社区内随机运动,以较小的概率漫游到其他社区,同时,社区内部的节点在活跃度方面存在差异,中心节点相对普通节点较为活跃,在各个社区之间漫游的频率较高^[17~19]。因此,网络模型可以近似地定义如下。

- 1) 网络中每个节点属于且仅属于一个社区,即归属社区。
- 2) 在归属社区内,节点移动过程服从(RWP, random way point)模型。
- 3) 社区内节点按照一定的概率离开其归属社区,漫游至其他社区。
- 4) 离开归属社区的节点将在目标社区内随机选取一个位置作为目的地。
- 5) 节点到达目的地后将随机停留一段时间,然后选择下一个目的地继续移动。

机会网络中节点采用多拷贝方法提高消息成功投递率、降低传输时延,此外,节点移动过程的期望相遇时间(EMT, expected meeting time)近似服从指数分布^[20,21],且网络中的各个节点运动过程服从独立同分布,则处于同一深度的节点将以相同的概率作出消息的转发决策,因此,副本数量将呈现出指数增长的规律。消息在网络中的传播过程如图 1 所示。

由图 1 可知,消息的传播过程可用树形结构描述,称之为传播树。显然,其传播范围与传播深度之间存在直接关系。

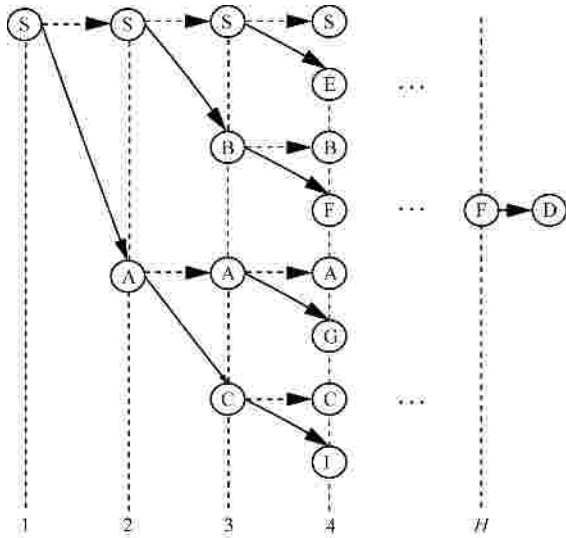


图 1 消息传播过程

定义 1 传播深度。传播树的层次数量，用 H 来表示。新消息产生后，其初始传播深度 $H=1$ ，每次中继节点转发该消息之后，其传播深度 H 就相应地增加 1。

从图 1 中可以看出，当传播深度增加 1，消息在网络中的副本数 n_c 将增加 1 倍。可见，随着传播深度的增加，消息的副本数将按以 2 为底的指数函数增加。因此，当消息的传播深度为 H 时，该消息在网络中的副本数可以用式(1)表示。

$$n_c = 2^{H-1} \quad (1)$$

3 节点能量估计方法

机会网络中节点的能耗主要集中在数据传输、信号处理和硬件操作等环节，其中，数据传输环节的能耗最高，本部分综合考虑扫描能耗、数据转发能耗和数据接收能耗 3 个方面对数据传输能耗进行建模。

节点扫描能耗是指节点扫描信道所消耗的能量。令节点单次扫描所消耗的能量为 e_s ，节点的扫描周期为 T ，则节点的扫描能耗 E_s 可表示为

$$E_s = e_s \times \frac{t}{T} \quad (2)$$

其中， t 为节点工作时间长度。

节点的数据发送能耗与节点转发的数据量成正比，节点转发的数据量越多，节点的数据发送能耗越大，令节点转发单位数据消耗的能量为 e_t ，节点转发的数据量为 S_t ，则节点的发送能耗 E_t 可表示为

$$E_t = e_t \times S_t \quad (3)$$

同理，数据的接收能耗与节点接收的数据量成正比，令节点接收单位数据消耗的能量为 e_r ，节点接收的数据量为 S_r ，则节点的接收能耗 E_r 可表示为

$$E_r = e_r \times S_r \quad (4)$$

综上所述，节点的总能耗 E_c 和当前的剩余能量 E_{cur} 为

$$\begin{cases} E_c = E_t + E_r + E_s \\ E_{cur} = E_{init} - E_c \end{cases} \quad (5)$$

4 非均匀量化方法

机会网络中消息转发过程受到多个因素影响，路由机制的设计需要综合考虑多个因素，而表征各种因素的数值范围可能相差较大，因此，需要采用适当的量化方法对各种参数数值进行处理，从而使其在整个区间内呈现出相对均匀的分布状态。根据 A 律 13 折线编码中的非均匀量化方法^[22]，本部分提出一种归一化非均匀量化方法。

归一化区间[0,1]包含 13 段，分段点分别为 0、1/128、1/64、1/32、1/16、1/8、1/4、3/4、7/8、15/16、31/32、63/64、127/128，其中，各个分段点记为 d_j ，进而，在每一段内进行二次划分，均匀分为 16 小段，其最小量化间隔 $D=1/2048$ 。各参数的对应关系如表 1 所示。

表 1 非均匀量化中各参数的对应关系

段号(j)	段范围	段起始位置(D_j)	段量化间隔(D_j)
1	0~16	0	1
2	16~32	16	1
3	32~64	32	2
4	64~128	64	4
5	128~256	128	8
6	256~512	256	16
7	512~1 536	512	32
8	1 536~1 792	1 536	16
9	1 792~1 920	1 792	8
10	1 920~1 984	1 920	4
11	1 984~2 016	1 984	2
12	2 016~2 032	2 016	1
13	2 032~2 048	2 032	1

假设变量 $x \in [X_{min}, X_{max}]$ ，则最小量化间隔为 $(X_{max} - X_{min})/2048$ 。归一化非均匀量化过程如下。

1) 计算变量 x 在区间[0,2048]的映射值 $f(x)$ ，

如式(6)所示。

$$f(x) = X_{\min} + \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{2048} \times x \quad (6)$$

2) 对应表 1 确定 $f(x)$ 的所属区间。例如 $f(x)=48$ ，则位于第 3 段。

3) 根据段内均匀量化的性质，得到 x 在归一化区间 $[0, 1]$ 的映射值 $v(x)$ ，如式(7)所示。

$$v(x) = d_j + \frac{(f(x) - D_j)}{D_j} \times \frac{d_{j+1} - d_j}{16} \quad (7)$$

5 能量有效的副本分布状态感知路由机制

5.1 消息效用值

对于机会网络来说，节点之间的消息传输需要多个中间节点辅助，可见，给定消息的扩散程度直接决定了消息的投递状态。

消息 M 在网络中的副本数 n_c 最小为 0，最大为网络中的节点数 N ，即网络中每个节点都有消息 M 的副本。通过归一化非均匀量化方法所得到的消息 M 副本数为其在网络中的扩散程度，即 P_M 。可见，网络中消息 M 的副本越多， P_M 就越大；反之越小。

根据机会网络中所采用的消息传输机制，消息在网络中扩散程度越大，消息已被成功传递的概率就越大，其占用存储资源的必要性就越小，即效用值越小。考虑到节点计算能力有限，因此，为在不影响计算精度的情况下尽量降低节点的计算开销，定义消息 M 的效用值 U_M 为

$$U_M = 1 - P_M \quad (8)$$

可见，通过式(8)所得到的消息效用值将随着消息的扩散程度而逐渐变化，以动态地反映消息在网络的情况。

5.2 节点效用值

机会网络中各个节点之间的相遇概率并不相同，选择与目的节点相遇概率较高的节点作为中继节点将有助于提高消息的成功投递率，但是，活跃程度较高的节点将频繁地为其他节点转发数据，造成能量消耗过快，最终导致节点死亡，从而严重影响网络的可靠性。因此，中继节点选择应综合考虑相遇概率和剩余能量。

1) 节点的相遇概率

节点在运动过程中记录与其他节点相遇的概率，如表 2 所示，且每个表项均设定与之关联的定时器。当节点 i 和节点 j 相遇时，相遇概率 $P(i, j)$ 按

式(9)更新。

$$P(i, j)_{\text{new}} = P(i, j)_{\text{old}} + (1 - P(i, j)_{\text{old}})P_{\text{init}} \quad (9)$$

节点记录相应表项的最后更新时间，若节点之间的相遇间隔时间超过定时器设定的数值，则表明该段时间内，2 个节点的相遇概率 $P(i, j)$ 较低，则按式(10)更新对应表项。

$$P(i, j)_{\text{new}} = P(i, j)_{\text{old}} \times b \quad (10)$$

表 2		相遇信息
相遇节点	相遇概率	最后更新时间
N_1	P_{N1}	t_1
N_2	P_{N2}	T_2
...

2) 节点的剩余能量

显然，剩余能量和相遇概率估计值的所属区间范围不同，因此，根据所提出的归一化非均匀量化方法，节点将剩余能量 E_{cur} 数值转换为归一化剩余能量 E_u 。

综合考虑节点的相遇概率和归一化剩余能量，节点 i 的效用值 $U_i(M)$ 如式(11)所示。

$$U_i(M) = a \times P(i, d) + (1 - a) \times E_u \quad (11)$$

其中， a 为权重因子， $P(i, d)$ 为节点 i 与消息 M 的目的节点 d 的相遇概率。

5.3 消息转发机制

如前所述，多副本路由策略有利于提高机会网络消息的成功投递率，但是，此种方法也将极大地消耗网络资源。合理的副本控制策略能够实现网络资源开销以及网络性能提升之间的平衡，因此，本文采用“多副本+控制”的策略进行消息的传输，即以分布式的方式控制消息的复制转发过程，达到增加消息副本数，提高消息成功投递率的目的；同时，满足网络资源受限的约束。节点相遇之后交换彼此保存的控制信息，并计算效用数值，进而将所保存的消息副本转发给效用值较大的节点。

具体操作如下。

- 1) 双方交换消息概要向量。
- 2) 双方交换相遇概率和剩余能量信息。
- 3) 向对方请求本地节点未保存的消息。
- 4) 当节点 i 向节点 j 转发消息 M 时，节点 i 估算节点 j 和自己对于消息 M 的效用值 $U_i(M)$ 和 $U_j(M)$ 。

5) 当 $U_i(M) < U_j(M)$ 时, 节点将消息 M 复制转发给节点 j , 否则, 不转发。

5.4 缓存管理机制

机会网络中的链路呈现间断连接特性, 消息可能需要长期保存在节点缓存中以等待通信机会。可见, 在多副本路由机制中, 中继节点需缓存多个消息。由于节点缓存资源的有限性, 过多的消息将可能导致缓存溢出。此外, 当消息被成功投递至目的节点时, 该消息在其他节点上的副本将成为冗余消息, 若无法及时删除此种消息, 则其将在网络中继续传播, 导致大量的缓存资源浪费。为了更加合理地利用有限的缓存资源, 避免效用值较高的消息溢出, 影响网络的性能, 本文提出了一种简单、高效的缓存管理机制。

本文的缓存管理机制如下。

1) 新生成的消息初始化 TTL 数值, 当消息的 TTL 减小至零时, 则删除该消息。

2) 按照消息的效用值对消息进行排序, 当节点缓存被填满时, 优先删除消息效用值小的消息。

3) 目的节点收到消息时, 向邻居节点广播相应的 ACK 消息, 邻居节点根据收到的 ACK 消息管理本地缓存, 并将 ACK 消息继续向邻居节点转发。本文所提缓存管理机制的伪代码如图 2 所示。其中, S 、 $N.freeBuffer$ 、 U 、 $N.usablefreeBuffer$ 分别是指消息的大小、节点 N 的空余缓存空间大小、消息的效用值以及节点 N 可用的缓存空间。

6 性能及仿真结果分析

本部分从 4 个方面对所提出机制的有效性进行验证, 其中, 包括节点能量消耗情况、投递率、负载率及平均延迟。网络负载率定义为消息的冗余投递次数与成功投递的消息数之间的比值关系, 如式 (12) 所示, OR 为网络负载率, N_r 为转发消息的总次数, n_s 为成功投递到目标节点的消息数。该参数反映了路由机制的运行效率, 可见, 转发次数越多, 则网络负载率越大, 表明路由机制的运行效率越低。

$$OR = (N_r - n_s) / n_s \quad (12)$$

6.1 仿真参数设置

本部分采用机会网络仿真平台 (ONE, opportunistic network environment)^[23] 对所提出的路由机制进行性能评估, 并与机会网络中经典路由机制 Epidemic 和 PROPHET 作比较, 仿真参数设置如表 3 所示。

```

Message M to node N
if N == destination node of M then
    N receive M
    broadcast ACK for M
else
    for m from tail of queue to top of queue do
        if m.TTL == 0
            delete m
        end if
    if N.freeBuffer > S_M then
        N receive M
    else
        sort all messages in queue according to utility of message
        N.usableBuffer=N.freeBuffer
        for m from tail of queue to top of queue do
            if U_M > U_m then
                N.usableBuffer+=S_m
                if N.usableBuffer > S_M then
                    break
                end if
            end if
        end for
    if N.usableBuffer > S_M then
        for m from tail of queue to top of queue do
            delete m
            N.freeBuffer+=S_m
            if N.freeBuffer > S_M then
                break
            end if
        end for
    receive M
    else refuse to receive M
    end if
end if
end if
    
```

图 2 节点接收消息流程

表 3 仿真参数设置

参数	数值
仿真时间/h	12
网络大小/m ²	4 500×3 400
节点通信方式	Bluetooth
传输范围/m	10
消息产生时间/s	1 000~42 000
节点数	120
移动速度/(m·s ⁻¹)	0.5~1.5
消息大小/KB	200~300
传输速度/kbit/s	250
初始能耗/J	1 000
扫描能耗 e _s /J·次 ⁻¹	0.02
接收能耗 e _r /J·bit ⁻¹	2.4×10 ⁻⁷
发送能耗 e _t /J·bit ⁻¹	3.3×10 ⁻⁷
P _{init}	0.75
b	0.98

本文利用自定义的社区模型对 EECDR、Epidemic、PROPHET 进行性能验证。社区模型相对于其他移动模型，可以更好地模拟机会网络中节点移动的非随机性，从而以更加贴近实际应用场景的角度来验证路由机制的性能。

6.2 消息扩散程度估计方法性能验证

消息扩散程度估计方法的准确性直接影响路由机制的有效性，根据本文所提出的副本数估计方法，估计值与实际值之间的差异如图 3 所示。

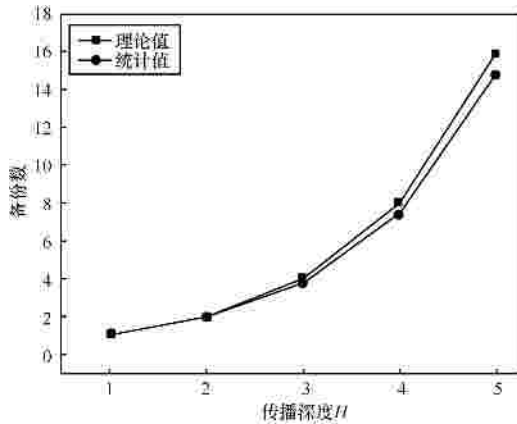


图 3 副本数估计方法误差

从图中的结果可知，在消息传播深度较小的情况下，估计结果不存在误差，但当传播深度增加时，误差也就随之出现，但最大误差不超过 7.1%。由此可知，本文所提出的消息扩散程度估计方法较为准确。

6.3 节点能量消耗情况比较

机会网络中的节点资源有限，中继节点在为其他节点转发数据过程中需要消耗自身的能量，能量耗尽将导致节点死亡，如前所述，节点在网络中的分布较为稀疏，节点死亡将进一步降低网络的连通性，使节点之间的连接概率下降。各种路由机制所导致的节点能量消耗情况如图 4 所示。

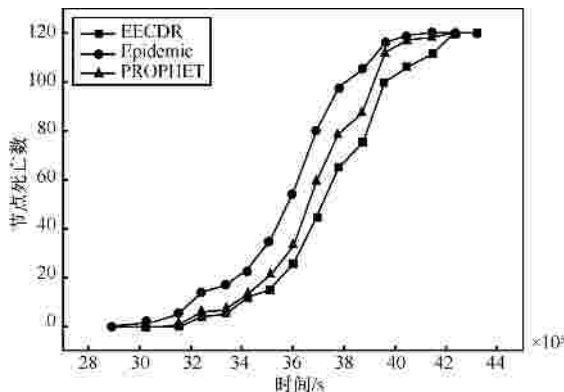


图 4 节点死亡数量比较

由于本文所提出的 EECDR 机制在中继节点选择过程中充分地考虑了节点能耗，因此，EECDR 机制的节点死亡速度较慢，与 Epidemic 机制相比较，EECDR 机制的节点死亡速率慢 40%，与 PROPHET 机制相比较，EECDR 机制的节点死亡速率慢 18%。

6.4 节点缓存对网络性能的影响

节点缓存对消息投递率的影响如图 5 所示。随着节点缓存的增大，中继节点携带消息的时间变长，消息投递率也随之升高。但是，节点的能量消耗速度也随之增长，此种情况下，EECDR 机制充分地考虑了能量消耗以及副本扩散程度，其投递率要优于其他 2 种机制，且性能增益随缓存容量增加逐渐变大。与 Epidemic 相比，EECDR 的投递率提高了 16%；与 PROPHET 相比，投递率提高了 9%。

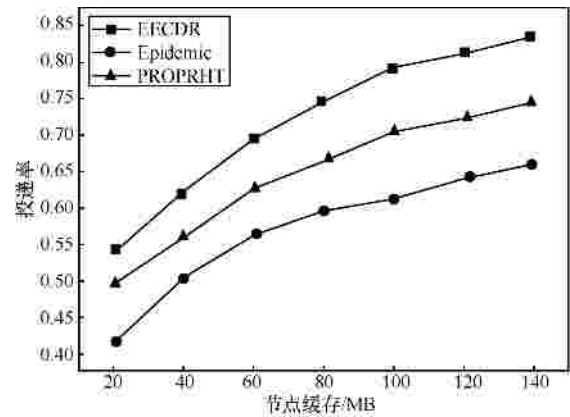


图 5 不同节点缓存下的投递率

节点缓存对网络负载率的影响如图 6 所示。可见，消息成功投递数量随着节点缓存的逐渐增加而上升。通过合理地选择中继节点，EECDR 机制有效地控制了消息副本数，同时，采用合理的缓存管理机制，已成功投递的消息可以及时地从缓存中删除，有效地降低了网络负载。统计结果表明，EECDR 的负载率比 Epidemic 降低了 29%，比 PROPHET 降低了 15%。

节点缓存对消息平均传输时延的影响如图 7 所示。显然，随着节点缓存逐渐增大，中继节点将以更长的时间携带消息直至遇见更合适的下一跳中继节点，此种方式将导致消息的平均传输时延增大。当节点缓存较小时，EECDR 的平均传输时延略大于 Epidemic 和 PROPHET。随着节点缓存的增大，节点的能量消耗速度变快，相比于不考虑节点

能量的 Epidemic 和 PROPHET, EECDR 机制在后期可获得中继节点转发的机会更多,使平均时延得到了有效的改善。

节点的存活时间更长,因此,消息投递率也得到了提升。EECDR 机制的投递率比 Epidemic 提高了 14%,比 PROPHET 提高了 7%。

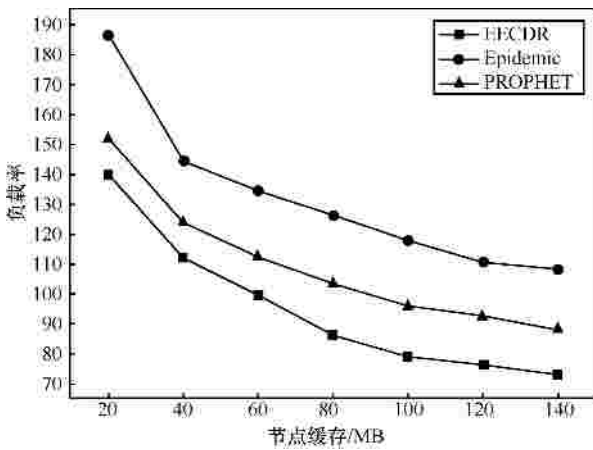


图 6 不同节点缓存下的负载率

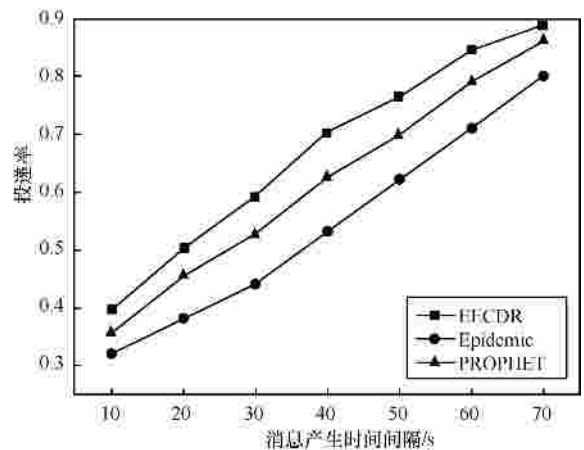


图 8 不同消息产生时间间隔下的投递率

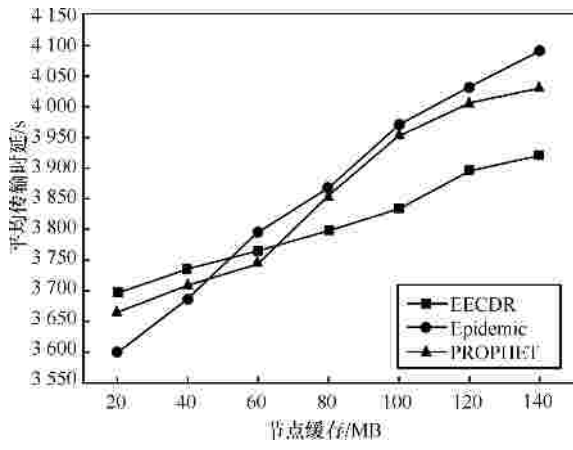


图 7 不同节点缓存下的平均传输时延

消息产生时间间隔对网络负载率的影响如图 9 所示。由于节点缓存资源有限,网络中的消息数越多,则消息在网络中可扩散的副本数就越少。通过控制消息的复制转发条件,EECDR 机制严格地限制了消息的副本数量。相比于 Epidemic 和 PROPHET,EECDR 机制的负载率分别降低了 31% 和 20%。

6.5 消息产生时间间隔对网络性能的影响

消息产生时间间隔对投递率的影响如图 8 所示。为验证所提路由机制在各种网络负载下的性能,本文由消息产生时间间隔的长短控制消息的产生频率,进而模拟各种网络负载状态下的路由机制性能。随着消息产生时间间隔的增大,单位时间内消息产生总数呈现出降低趋势,节点的能量消耗也逐渐减小,网络中由于能量耗尽而死亡的节点数也逐渐地降低,因此,消息的投递率呈上升趋势;另外,对于缓存有限的机会网络来说,消息数减少可使消息在网络中的生存时间增长,也必然带来投递率的上升。EECDR 机制采用节点相遇概率和能量衡量节点转发能力,能够更加合理地选择中继节点。相对于基于泛洪的 Epidemic 机制和只考虑相遇概率的 PROPHET 机制来说,

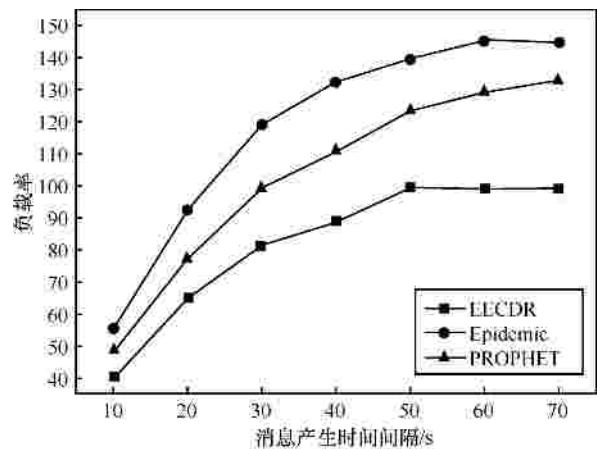


图 9 不同消息产生时间间隔下的负载率

消息产生时间间隔对消息平均传输时延的影响如图 10 所示。较少的消息数量使节点能量消耗下降,进而,使节点的生存时间增长,消息被中继节点辅助转发的机会也随之增加。当消息产生时间间隔较小时,网络中的消息数量较多,随着时间的推移,对于节点能量有限的机会网络来说,节点可能由于能量的耗尽而无法为其他节点转发消息,导

致消息可获得的辅助转发机会减少，EECDR 机制考虑了节点能量均衡，延长了节点生存时间，使消息的转发机会高于 Epidemic 和 PROPHET，其平均传输时延也相应地降低。当消息产生时间间隔较大时，网络中的消息数较少，节点的能量消耗也较慢，因此，EECDR 机制的时延要略大于 Epidemic 和 PROPHET。

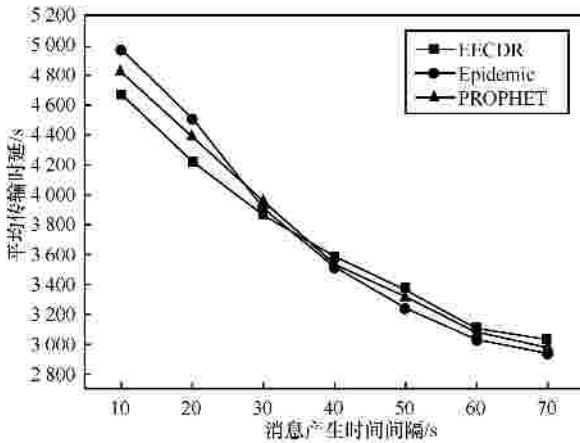


图 10 不同消息产生时间间隔下的平均传输时延

6.6 消息生存时间对网络性能的影响

消息生存时间(TTL, time to live)对消息投递率的影响如图 11 所示。当 TTL 增大到一定程度之后，由于消息的生存时间变长，节点能量消耗变快，导致网络中参与转发过程的节点数量下降，因此，单纯地增加消息生存时间将导致其投递率降低。从整体上看，EECDR 机制的投递率优于其他 2 种机制，比 Epidemic 和 PROPHET 分别提高了 23%和 9%。

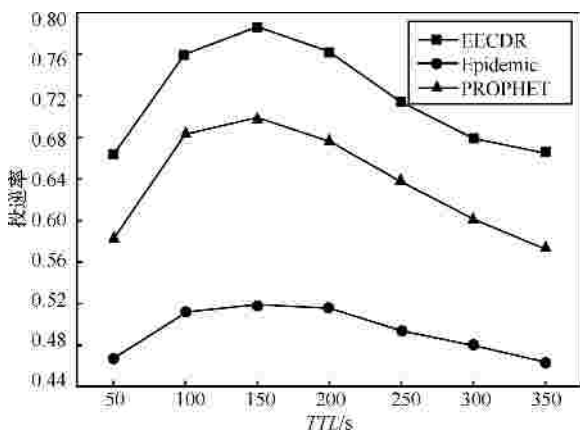


图 11 不同 TTL 下的投递率

TTL 对网络负载率的影响如图 12 所示，随着 TTL 的增大，消息在网络中的生存时间逐渐增长，使得网络负载越高。通过控制消息转发条件，

EECDR 机制有效地限制了消息的副本数，辅以合理的缓存管理方法，避免了已成功投递的消息在网络中继续传播，从而达到了提高网络资源利用率的目的，EECDR 机制的负载率比 Epidemic 和 PROPHET 分别降低了 46%和 23%。

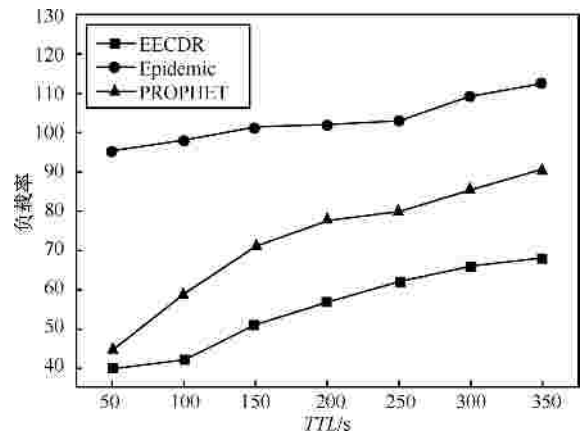


图 12 不同 TTL 下的负载率

TTL 对消息平均传输时延的影响如图 13 所示。显然，随着消息的 TTL 增大，消息生存时间变长，中继节点可以耗费较多的时间等待更加合适的中继节点，此种情况使消息平均传输时延和节点的能量消耗随 TTL 逐渐增加。由图中的结果可知，三者的时延性能总体较为接近。主要原因在于 EECDR 机制需要比较相遇节点的效用值来确定一下跳中继节点，而节点效用值的估算需要交换双方节点的相遇概率与能量信息，导致需要耗费一定的时间等待合适的中继节点，因此，EECDR 机制的时延性能增益有限。当 TTL 较小时，本文所提机制的时延要略高于其他 2 种机制；而当 TTL 较大时，时延要略低于其他 2 种机制。

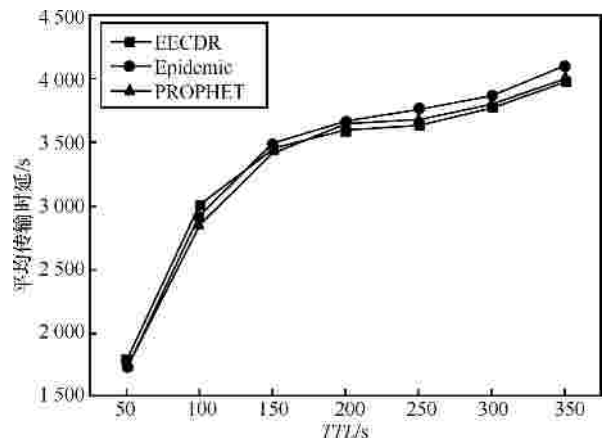


图 13 不同 TTL 下的平均传输时延

7 结束语

针对机会网络节点缓存和能量有限的特性，本文提出一种能量有效的副本分布状态感知路由机制，节点以分布式的方式估计消息的扩散程度，进而确定其重要程度，同时，综合考虑节点能量和节点相遇概率参数评估相遇节点的转发能力，并合理地选择下一跳中继节点。结果表明，与经典路由机制 Epidemic 和 PROPHET 相比，本文所提机制能够有效地提高消息投递率，降低负载率和消息平均传输时延。下一步工作计划是结合消息的历史投递概率评估消息的重要性。

参考文献：

- [1] DALY E M, HAAHR M. The challenges of disconnected delay-tolerant MANETs [J]. *Ad Hoc Networks*, 2010, 8(2):241-250.
- [2] 吴大鹏, 周建二, 王汝言等. 机会网络中消息冗余度动态估计的缓存管理策略[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(1):101-107.
WU D P, ZHOU J E, WANG R Y, *et al.* Message-redundancy estimating adaptive buffer management mechanism for opportunistic networks[J]. *Journal of Electronic and Information Technology*, 2012, 34(1):101-107.
- [3] LI Y, WANG Z, YOU X H, *et al.* NER-DRP: dissemination-based routing protocol with network-layer error control for intermittently connected mobile networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2012, 17(5):618-628.
- [4] 吴大鹏, 张普宁, 王汝言. 节点连接态势感知的低开销机会网络消息传输策略[J]. *通信学报*, 2013, 34(3):44-52.
WU D P, ZHANG P N, WANG R Y. Connection status aware cost efficient message transmission mechanism in opportunistic networks[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(3): 44-52.
- [5] 刘期烈, 潘英俊, 李云等. 延迟容忍网络中基于分离时间和副本控制的路由算法 [J]. *北京邮电大学学报*, 2011, 34(2):113-117.
LIU Q L, PAN Y J, LI Y, *et al.* A routing algorithm based on separation time and copy control in delay tolerant network[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2011, 34(2):113-117.
- [6] YOO J, CHOIS, KIM C. The capacity of epidemic routing in vehicular networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2009, 13(6): 459-461.
- [7] LINDGREN A, DORIA A, SCHELEN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing Communications Review*, 2003, 7(3):19-20.
- [8] SUGIHARA R, GUPTA R K. Speed control and scheduling of data mules in sensor networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2010, 7(1):1-29.
- [9] 蔡青松, 牛建伟, 刘燕. 机会网络中的消息传输路径特性研究[J]. *计算机研究与发展*, 2011, 48(5):793-801.
CAI Q S, NIU J W, LIU Y. Message delivery properties in opportunistic networks[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2011, 48(5):793-801.
- [10] ELMUROD T, HOJUNG C. Communication capacity-based message exchange mechanism for DTN[J]. *Computer Networks*, 2011, 55(15): 3408-3422.
- [11] SANDULESCU G, NADJM S. Opportunistic DTN routing with window-aware adaptive replication [A]. *Proceedings of 4th Asian Conference on Internet Engineering*[C]. New York, NY, USA, 2008. 103-112.
- [12] 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.
YE H, CHEN Z G, ZHAO M. ON-CRP: cache replacement policy for opportunistic networks[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(5): 98-107.
- [13] LIU Y, WANG J X, ZHANG S G, *et al.* A buffer management scheme based on message transmission status in delay tolerant networks[A]. *IEEE Globecom*[C]. Houston, USA, 2011. 1-5.
- [14] KRIFA A, BARAKAT C, SPYROPOULOS T. Optimal buffer management policies for delay tolerant networks[A]. *The 5th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*[C]. San Francisco, CA, USA, 2008. 260-268.
- [15] 周瑞涛, 曹元大, 胡晶晶等. 基于消息重要性的容迟网络缓存管理策略[J]. *通信学报*, 2011, 32(9A):128-132.
ZHOU R T, CAO Y D, HU J J, *et al.* Message significance based buffer management policy for DTN[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(9A):128-132.
- [16] DALY E M, HAAHR M. Social network analysis for routing in disconnected delay tolerant MANETs[A]. *Proceedings of 8th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing*[C]. New York, USA, 2007. 32-40.
- [17] BOLDRINI C, CONTI M, PASSARELLA A. Design and performance evaluation of ContentPlace, a social-aware data dissemination system for opportunistic networks[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(4): 589-604.
- [18] MTIBAA A, MAY M, DIOT C, *et al.* PeopleRank: social opportunistic forwarding[A]. *Proceedings of IEEE INFOCOM*[C]. San Diego, USA, 2010. 1-5.
- [19] HUI P, CROWCROFT J, YONEKI E. BUBBLE rap: social-based forwarding in delay tolerant networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 10(11):1536-1550.
- [20] SOARES V N, FARAHMAND F, RADRIGUES C. Impact of vehicle movement models on VDTN routing strategies for rural connectivity[J]. *International Journal of Mobile Network Design Innovation*, 2009, 3(2):103-111.
- [21] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Performance analysis of mobility-assisted routing[A]. *Proceedings of 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*[C]. Florence, Italy, 2006. 49-60.