

基于节点能力模型的容迟网络路由算法

聂旭云, 杨 炎, 刘梦娟, 秦志光

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731)

【摘要】针对容迟网络高延迟、间歇性连接、节点频繁移动、能量和缓存资源受限等本质特点,提出一种基于节点能力模型的容迟网络路由算法CM-RSD。该算法将基于节点活跃度和可用能量比的能力模型和多副本限额转发策略相结合,使消息副本向递交能力更强的节点扩散,从而提高消息递交的成功率,同时实现对资源开销的控制。此外,CM-RSD在选择中继节点时,还充分考虑了节点的能量状态,以避免消息副本向能量不足的节点扩散,从而有效保障网络节点的存活率。仿真实验表明,无论是节点密度、副本配额,还是节点移动模型的影响,CM-RSD算法在消息递交成功率、资源消耗、递交延时、能量消耗、扩展性等方面都表现出了良好的性能。

关键词 节点能力模型; 容迟网络路由; 能量状态; 配额策略

中图分类号 TP393.02

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.06.018

Capability Model Based Routing Strategy in DTN

NIE Xu-yun, YANG yan, LIU Meng-juan, and QIN Zhi-guang

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract Delay-tolerant networks (DTNs) are a type of emerging networks characterized by extraordinarily long delay paths and frequent network partitions. For the distinct characteristics of DTNs, routing becomes one of the most challenging open problems. This paper presents a routing strategy based on capability model in DTN, called CM-RSD. The CM-RSD combines capability model with quota-based routing strategy, and sprays more message copies to stronger nodes. Furthermore, this strategy can select relay nodes based on the energy states of nodes, thus protecting the survival of network nodes effectively. Our simulation results show that the CM-RSD can improve the message delivery ratio significantly while keeping the overhead ratio low in distinct scenarios with different node densities, quota of copies, and mobility models.

Key words capability model; DTN routing; energy state; quota-based strategy

容迟网络(delay tolerant networks, DTN)是近年广受关注的一类挑战性网络,主要应用于星际网络、无线车载自组织网络、生态环境监测网络、灾害恢复网络等极端环境。由于具有高延迟、间歇性连接、节点频繁移动、能量和存储资源受限等特点,DTN的通信节点之间几乎不存在端到端的完整路径。因此设计高效节能的容迟网络路由算法已经成为DTN研究的关键。目前已有的DTN路由算法主要分为两类^[1]:基于转发的路由算法^[2-5]和基于泛洪的路由算法^[6-8]。基于转发的路由算法是指消息被逐跳地从源节点向目的节点转发,在整个转发过程中网络仅存在一个消息副本。如以Message Ferrying^[2]为代表的基础设施辅助路由算法,以PRoPHETv2^[3]为代表的先验知识预测路由算法,以及以SSAR^[4]、SimBet^[5]为代表的社会网络路由算法都属于基于转发的单副

本路由算法。这类算法的共同特点是算法性能高度依赖于网络先验知识。然而在实际的DTN环境中,节点很难准确获得其他网络节点的运行规律和状态信息。为此,研究者提出了一类基于泛洪的路由算法,以减少对先验知识的依赖,同时保证高的消息递交成功率。

最早的泛洪路由算法是Epidemic^[6],其基本思想是每个DTN节点将自己缓存的所有消息发送给通信范围内的所有相邻节点,以获得高的消息递交成功率。由于每个节点都尽力扩散缓存消息,Epidemic会导致极大的网络资源开销,同时随着能量和缓存资源的消耗,Epidemic的性能会急剧下降,如图1-2所示。为此研究者提出了多种改进方案^[7-8],其中最具代表性的是消息副本数受限的SAW算法^[7]。该算法首先规定每个消息能够向网络中注入的最大副本

收稿日期: 2012-04-11; 修回日期: 2012-08-29

基金项目: 科技部重大专项(2011ZX03002-002-03); 中央高校基本科研业务专项资金(ZYGX2010J077)

作者简介: 聂旭云(1975-),男,博士,主要从事互联网新型应用、密码学等方面的研究。

配额, 然后按照二元喷射方式对消息副本进行随机扩散, 直到缓存消息的副本配额为1时, 进入等待状态, 此时节点只在与该消息目的节点相遇时, 才转发该消息。SAW能够有效控制网络资源开销, 但是随机扩散消息副本, 会降低消息递交成功率, 同时增加消息的平均递交延时。为此, 文献[8]进一步考虑能量、节点移动速度、社会关系等因素对路由算法性能的影响, 从而提出能量敏感的ESR算法。

本文提出一种基于节点能力模型的容迟网络路由算法CM-RSD(capability model based routing strategy in DTN)。该算法以SAW为基础, 在以下方面做了改进: 1) 提出基于节点活跃度和可用能量比的节点能力模型, 并以节点能力效用值作为消息中继节点的选择依据; 2) 改进消息的二元喷射方式, 采用按能力效用值比例分配消息副本配额的扩散方式; 3) 在等待阶段, 改进消息的直接递交模式, 采用基于节点能力效用值的贪婪转发模式。CM-RSD算法将节点能力模型和多副本限额转发策略相结合, 使消息副本向递交能力更强的节点扩散, 从而提高消息递交的成功率, 同时实现对网络资源开销的控制。此外, CM-RSD在选择中继节点时, 还充分考虑节点当前的可用能量, 以避免消息向能量不足的节点扩散, 从而保障网络节点的存活率。

本文通过大量仿真实验, 将CM-RSD算法和典型的Epidemic, 以及同样基于SAW算法改进的ESR算法进行比较。结果表明, 无论是节点密度、消息副本数、还是节点移动模型的影响, CM-RSD算法在消息递交成功率、平均资源开销、平均递交延时、节点能量消耗、扩展性等方面都表现出了良好的性能。

1 节点能力模型

CM-RSD算法是在SAW的基础上, 优化选择消息扩散的中继节点, 即将消息向最有可能成功递交该消息的中继节点扩散。由于CM-RSD算法主要面向节点随机移动的机会容迟网络, 因此分析影响消息递交的节点能力主要包括: 节点的可用能量、通信覆盖范围、传输带宽、缓存空间、移动速度等。在CM-RSD算法中, 着重考虑节点可用能量比和节点活跃度两个反映节点递交能力的指标。

定义 1 节点可用能量比为:

$$E_i(t) = \frac{P_i(t)}{P_i} \quad (1)$$

式中, $P_i(t)$ 表示节点 i 在时刻 t 的可用能量值, P_i 表示节点 i 的初始能量; $E_i(t)$ 用于评估节点是否有足

够的能量支持消息扩散。

定义 2 节点活跃度为:

$$F_i(t) = \varepsilon \frac{|n_i(t) \cup n_i(t-\tau)| - |n_i(t) \cap n_i(t-\tau)|}{|n_i(t) \cup n_i(t-\tau)|} + (1-\varepsilon) \frac{|n_i(t)|}{N} \quad (2)$$

式中, $n_i(t)$ 表示节点 i 在 t 时刻的邻居节点集合, $|n_i(t)|$ 表示该邻居节点集合的节点数量; τ 为节点活跃度的更新周期; N 表示系统中的节点总数。如果网络中存在孤立节点, 即节点 i 在 $[t-\tau, t]$ 未与任何节点处于通信范围内, $|n_i(t) \cup n_i(t-\tau)| = 0$, 则规定 $F_i(t) = 0$ 。CM-RSD算法中, $F_i(t)$ 的定义不仅反映了邻居节点数对节点活跃度的影响, 而且包含了邻居节点变化率对活跃度的影响, 其中参数 ε 用于反映邻居节点数与邻居节点变化率对节点活跃度的影响力。CM-RSD考虑活跃度越大的节点, 将消息递交到目的节点的概率也越大。在本文的实验方案中 $\varepsilon = 0.8$ 。

综合分析, CM-RSD算法的节点能力模型为:

$$U_i(t) = \Gamma(F_i(t), E_i(t)) \quad (3)$$

式中, $U_i(t)$ 表示节点 i 在 t 时刻的递交能力; $\Gamma(\cdot)$ 是节点能力函数。若采用效用函数来定义 $\Gamma(\cdot)$, 则节点能力模型可进一步表示为:

$$U_i(t) = \alpha F_i(t) + (1-\alpha) E_i(t) \quad (4)$$

其中参数 α 用于反映可用能量比与节点活跃度两个指标在能力模型中的权重。在本文方案中, 根据测试数据经验值选取 α 为0.8, τ 为120 s或者60 s。

2 基于节点能力模型的容迟网络路由算法CM-RSD

CM-RSD算法的基本思路如下: 首先规定每个消息能够向网络中注入的最大副本配额 L , 即任意时刻网络中该消息的所有副本携带的配额总和不超过 L ; 然后根据邻居节点的能力效用值, 向邻居节点扩散该消息的副本, 每个消息副本携带的配额由节点的能力效用值和可用能量比决定; 当该消息副本携带的配额减为1时, 节点不再扩散该消息, 而只向邻居节点集合中效用值最大的邻居节点(且该邻居节点的能力效用值大于缓存消息节点自身的能力效用值)转发, 或者在遇到该消息目的节点时, 直接向其转发。为了防止节点能量耗尽, 保证网络节点存活率, CM-RSD算法提出一个简单的基于可用能量的状态转移策略:

1) 当 $P_i(t) \geq \text{Threshold}_E$, 说明节点能量充足,

节点处于活跃状态, 该状态下节点能够发送和接收消息, 进行周期性的主动扫描, 以及时发现自己的邻居节点;

2) 当 $P_i(t) < \text{Threshold}_E$, 说明节点能量过低, 节点进入静默状态, 处于静默状态的节点不再向其邻居节点发送消息, 不再进行周期性主动扫描, 只接收以本节点作为目的节点的消息;

3) 当 $P_i(t) = 0$, 节点能量为0, 节点处于死亡状态, 不能进行任何操作。

综上所述, 本文提出的CM-RSD路由算法具体描述如下:

1) 节点首先根据当前的可用能量, 判断自己的状态: 如果处于活跃状态, 则更新自己的地理位置、可用能量比、能力效用值等信息, 并进行主动扫描以发现自己的邻居节点集合; 如果处于静默状态, 则只更新地理位置信息, 不进行主动扫描, 只接收以本节点作为目的节点的消息; 如果节点处于死亡状态, 则不做任何操作。

2) 处于活跃状态的节点, 首先判断是否缓存有以邻居节点为目的节点的消息, 若有, 则直接向其目的节点转发该消息; 对于非以邻居节点为目的节点的消息, 则根据该消息副本携带的配额, 依次向其邻居节点扩散或者转发消息副本。若该消息副本的配额大于1, 则进入扩散阶段; 若该消息副本的配额等于1, 则进入转发阶段。

① 扩散阶段: 节点首先将邻居节点集合 NS 按照能力效用值进行递减排序 NS', 然后根据本节点与其相邻节点的能力效用值比例依次向邻居节点扩散携带配额的消息副本, 具体副本配额分配策略的伪代码描述如下:

```

Begin
  if ( $M_Q(t) > 1$ ) {
     $NS' = \text{sort}(NS, U_i(t))$ 
    for each (node  $i$  in  $NS'$ ) {
       $M_i(t) = \left\lfloor M_Q(t) \frac{U_i(t)}{U_i(t) + U_Q(t)} \right\rfloor$ 
       $\text{send}(M, i, M_i(t))$ 
       $M_Q(t) = M_Q(t) - M_i(t)$ 
      if ( $M_Q(t) == 1$ ) return;
    }
  }
End

```

伪代码中涉及的参数和函数说明如表 1 所示。

表1 参数及函数说明

参数	说明
NS	节点 Q 的邻居节点集合
$M_Q(t)$	节点 Q 上缓存的消息 M 在时刻 t 的副本配额
$U_Q(t)$	节点 Q 在时刻 t 的能力效用值
$U_i(t)$	邻居节点 i 在时刻 t 的能力效用值, $i \in NS$
$M_i(t)$	消息 M 分配给邻居节点 i 的副本配额, $i \in NS$
$\text{sort}(NS, U_i(t))$	将邻居集合 NS 中的节点按照效用值进行递减排序, 排序后的节点集合为 NS'
$\text{send}(M, i, M_i(t))$	发送消息 M 的副本给邻居节点 i , 该消息副本携带的配额为 $M_i(t)$
$\text{send}(M, P, 1)$	发送消息 M 的副本给邻居节点 i , 该消息副本携带的配额为1

② 转发阶段: 节点首先判断邻居节点集合中效用值最大的邻居节点 P , 并将其效用值与自身效用值比较。若本节点的效用值比 P 的效用值大, 则继续缓存该消息, 不转发该消息副本; 否则选择邻居节点中效用值最大的邻居节点进行转发, 并在成功转发后将其从缓存中删除, 具体转发策略的伪代码描述如下:

```

Begin
  if ( $M_Q(t) == 1$ ) {
     $U_P(t) = \max\{U_i(t), U_Q(t)\} \quad i \in NS$ 
    if ( $U_P(t) > U_Q(t)$ ) {
       $\text{send}(M, P, 1)$ 
       $M_Q(t) = 0$ 
    }
  }
End

```

在CM-RSD算法中, 由于节点总是缓存接收的消息, 会导致消息缓冲区一直处于溢出状态, 为此CM-RSD采用最简单的first receive first delete策略对缓冲区队列进行管理, 即除了周期性删除缓存的TTL值超时的消息外, 在接收新消息时, 如果没有足够的空间用于接收消息, 会依次删除缓冲区中最早接收的消息, 直到有足够的空闲空间为止。此外, 在CM-RSD算法中, 当消息的目的节点成功接收消息后, 会将该消息的ACK应答报文向整个网络泛洪, 以尽快通知各节点停止不必要的消息传输, 以及释放缓冲区中无效消息占用的空间, 从而提高系统资源利用率。

3 实验与分析

3.1 仿真方案设计

本文利用ONE仿真软件对考虑能量消耗的

Epidemic、ESR、CM-RSD算法进行原型仿真，并从消息递交成功率、平均资源开销、平均递交延时、节点存活率等方面对3种路由算法的性能进行讨论。具体性能指标定义如下：

$$\text{消息递交成功率} = \frac{\text{成功递交的消息数}}{\text{系统创建的消息数}} \quad (5)$$

$$\text{平均资源开销} = \frac{\text{系统总消息数} - \text{成功递交的消息数}}{\text{成功递交的消息数}} \quad (6)$$

$$\text{平均递交延时} = \frac{\text{成功递交消息的延时总和}}{\text{成功递交的消息数}} \quad (7)$$

$$\text{节点存活率} = \frac{\text{存活的节点数}}{\text{系统总节点数}} \quad (8)$$

论文采用的仿真场景包括3类移动节点：普通低速移动节点(A类)、高性能低速移动节点(B类)、高性能高速移动节点(C类)；以及3种类型的无线端口：Bluetooth、WiFi和高速端口。主要参数设置如表2所示。

表2 仿真场景的参数设置

参数	数值
仿真面积/mm ²	4 500×3 400(赫尔辛基市地图)
运动模型	基于地图的最短路径移动
消息大小	500 KB~1 MB
消息产生间隔/s	25~35
3类端口的传输速率	250 Kbps、1 Mbps、10 Mbps
3类端口的覆盖范围/m	10、100、1 000
A类节点端口类型	Bluetooth
B类节点端口类型	Bluetooth、WiFi
C类节点端口类型	Bluetooth、WiFi、高速端口
C类节点移动速度/m·s ⁻¹	2.7~13.9
A、B类节点移动速度/m·s ⁻¹	0.5~1.5
A、B、C类节点初始能量	[200, 400, 800]

3.2 仿真结果分析

3.2.1 3种路由算法的基本性能比较

实验1 考察路由算法随仿真时间推移性能的变化情况。从图1中可以看出，Epidemic在7 200 s之前，消息递交成功率是最优的，但是随着仿真时间的增加，能量和缓存空间逐渐消耗，在9 000 s以后，其消息递交成功率开始大幅下降；CM-RSD的消息递交成功率略高于ESR，特别是在16 200 s之后，由于62%的节点能量耗尽，导致消息的平均递交率持续下降；由于引入了静默状态，CM-RSD算法的递交成功率则一直保持在70%的良好水平。图2给出了平均资源开销的变化情况，Epidemic的资源开销大约在85左右，即每成功递交1个消息，平均产生的中继消息数为85个；而ESR和CM-RSD由于采用了限额10的多副本路由策略，其平均产生的中继消息数一直保持在较低的水平。

实验1还考察了算法的平均递交延时，Epidemic的平均递交延时最低，说明Epidemic采用泛洪方式扩散消息，能够使递交消息沿最短延迟路径传递；在16 200 s之前ESR和CM-RSD的平均递交延时接近，但是随着能量消耗，CM-RSD的部分节点进入静默状态，导致部分消息选择了延迟更长的路径进行转发。此外，实验1也比较了3种路由算法的能耗，发现Epidemic对节点的能量消耗明显高于ESR和CM-RSD，在19 800 s时，全部Epidemic节点的能量都耗尽，66%的ESR节点能量耗尽，而CM-RSD由于引入静默状态，保持100%的节点存活率。这是因为ESR算法在进行副本配额分配时，虽然也考虑了剩余能量因素，但是随着更多的消息副本向剩余能量大的节点转移，导致这些节点的能量也很快耗尽。

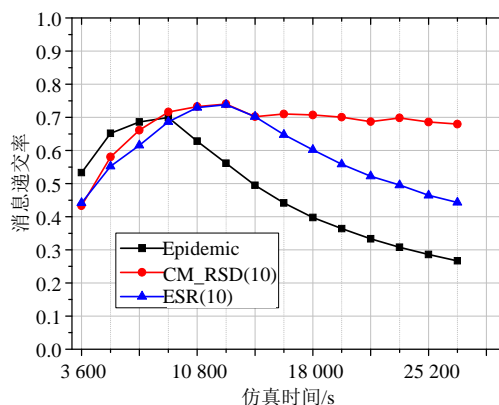


图1 实验1消息递交率的变化情况

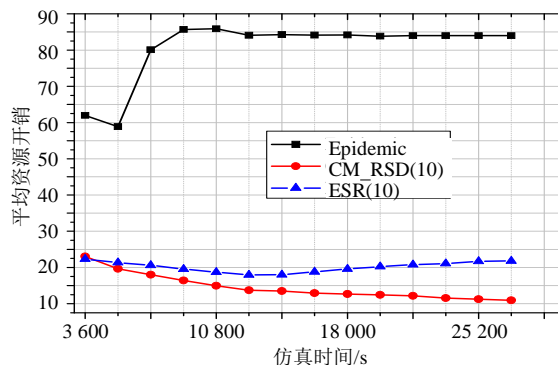


图2 实验1平均资源开销的变化情况

综上所述，CM-RSD在保持较高递交成功率、较低资源开销的情况下，对网络节点的能量消耗进行了有效控制，虽然在运行后期，平均递交延时有一定程度的增加，但是DTN本身的容迟特性，使得该性能的下降低对算法整体性能的影响相对有限。

3.2.2 节点密度变化对算法性能的影响

实验2 考察3种路由算法的性能随节点密度的变化情况。图3给出了消息递交率随节点密度增加的变化情况。在50个节点时，由于节点密度稀疏、通

信链路较少, 3种路由算法的递交率接近, Epidemic为53%、ESR为51%、CM-RSD为55%;但随着节点数增加, CM-RSD的递交率呈明显递增趋势, 在500个节点时, 递交率达到了89.01%。图4是平均资源开销的变化情况, 其中最差的是Epidemic, 其资源消耗呈线性递增趋势, 在500个节点时, 其平均资源消耗为662.74, 这是因为节点密度越大, 相互连通的链路也就越多, 泛洪方式产生的中继消息数也就越多;而ESR和CM-RSD是限额路由, 因此随着节点数增加, 产生的中继消息数只略微增加。

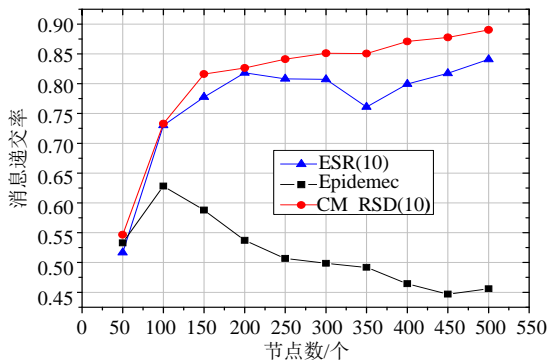


图3 实验2消息递交率的变化情况

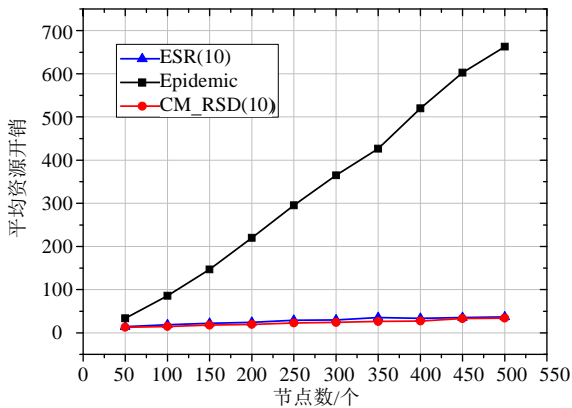


图4 实验2平均资源开销的变化情况

在实验2中还观察到, 随着节点密度增加, 3种路由算法的平均递交延时都呈现下降趋势, 这是因为连通链路越多, 消息递交经过的平均节点数就越少。在500个节点时, CM-RSD的平均递交延时为829.81 s, 平均传递节点数为2.83; ESR的平均递交延时为939.52 s, 平均传递节点数为2.62。此外, 通过实验2发现, 随着节点密度增加, Epidemic的存活节点呈递减趋势, 这是因为节点规模扩大, 泛洪方式产生的中继消息数越多, 消耗的能量也就越多;而ESR在500个节点运行10 800 s后, 还有87.8%的节点存活, 其中17.4%的节点还剩90%的能量; CM-RSD则没有节点能量耗尽。

综上所述, 随着节点密度增加, CM-RSD在递交率、平均递交延时和能量消耗方面都比Epidemic

和ESR表现出明显的优势, 随着节点规模的扩大, CM-RSD的性能变化相对稳定, 因此具有良好的扩展性。

3.2.3 移动场景变化对算法性能的影响

实验3 为了考察CM-RSD算法在不同移动场景下的性能, 在上述移动场景中增加D类移动节点, 该类节点沿着确定路径运行, 类似于公交车, 移动速度在[7,10](m/s)之间均匀分布。D类节点包括Bluetooth、WiFi和高速3种无线端口, 初始能量设置为1 000。图5是递交率的变化情况, 在5 400 s之前Epidemic的递交率最高, 这是因为在资源充足时, 泛洪方式能够遍历所有的递交路径, 因此消息递交率最高, 但是随着资源的消耗, 其递交率呈持续递减趋势;而CM-RSD则一直维持在70%左右的较高水平。图6是平均资源开销的情况, CM-RSD的平均资源开销性能最优, 递交每个消息所产生的中继副本数维持在15~25, 随着时间推移呈下降趋势, 在19 800 s时, 降为16。此外, 3种路由算法的平均递交延时都随时间推移呈递增趋势, 其中Epidemic最低, CM-RSD次之, ESR最高。在实验3中, CM-RSD在节点存活率指标上具有明显优势, 在整个仿真期间, 没有节点能量耗尽;而在16 200 s时, ESR有50.8%的节点能量耗尽, Epidemic全部节点死亡。

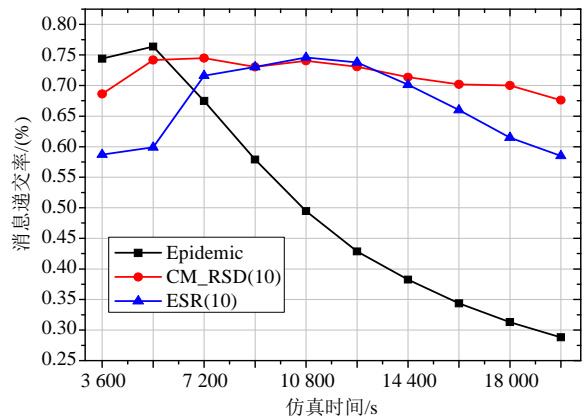


图5 实验3消息递交率的变化情况

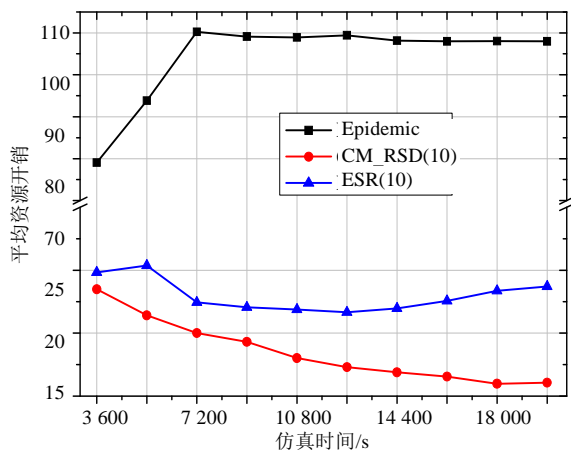


图6 实验3平均资源开销的变化情况

综上所述，在不同的移动场景下，CM-RSD在消息成功递交率、平均资源开销、平均递交延时、节点存活率等指标都优于ESR。

3.2.4 消息副本配额对算法性能的影响

实验4 考查消息副本配额对算法性能的影响，仿真启动200个节点，结果如图7所示。当副本配额较小时，随着配额的增加，消息成功递交率和平均递交延时都有明显的改善，在配额为10时这两项指标达到最优。随着副本配额的大幅增加，消息递交成功率反而持续下降。此外随着副本配额增加，CM-RSD的平均资源开销大幅上升，但是平均递交延时有所下降。综合上述考虑，本文中设置副本配额为10。

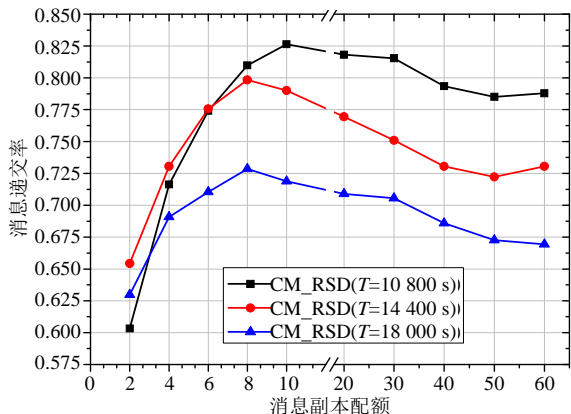


图7 实验4消息成功递交率的变化情况

递交的成功率，同时实现对资源开销的控制。此外，CM-RSD在选择中继节点时，还充分考虑了节点的能量状态，以避免消息副本向能量不足的节点扩散，从而有效保障网络节点的存活率。仿真实验表明，无论是节点密度、副本配额，还是节点移动模型的

4 结束语

本文在节点能力模型的基础上，结合多副本限额扩散策略和贪婪转发策略，提出了一种基于节点能力模型的容迟网络路由算法CM-RSD。该算法利用节点的活跃度和可用能量比作为能力指标，使消息副本向递交能力更强的节点扩散，从而提高消息

影响, CM-RSD算法在消息递交成功率、资源消耗、递交延时、能量消耗、扩展性等方面都表现出良好的性能。DTN路由算法的研究对于无线传感网络、车载网络的应用部署具有重大意义。本文提出的CM-RSD算法可广泛应用于大规模环境监测、城市交通流量监测等领域, 为监测信息的递交提供了一种有效方法。

参 考 文 献

- [1] LIU Meng-juan, YANG Yan, QIN Zhi-guang. A survey of routing protocols and simulations in delay-tolerant networks [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications (WASA 2011). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 243-253.
- [2] ZHAO W, AMMAR M, ZEGURA E. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile Ad hoc networks [C]//Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2004: 187-198.
- [3] GRASIC S, DAVIES E, LINDGREN A, et al. The evolution of a DTN routing protocol-PRoPHETv2[C]// Proceedings of the 6th ACM Workshop on Challenged Networks. New York: ACM, 2011: 27-30.
- [4] LI Qing-hua, ZHU Sen-cun, CAO Guo-hong. Routing in socially selfish delay tolerant networks[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM. [S.l]: IEEE, 2010: 1-9.
- [5] DALY E, HAAHR M. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs[C]//Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and computing. New York: ACM, 2007: 32-40.
- [6] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially connected Ad hoc networks[R]. Durham, NC, USA: Duke University, 2000.
- [7] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks[C]//Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking. New York: ACM, 2005: 252-259.
- [8] ZHANG Lin-juan, GAO Shuai. Energy-aware multi-replica routing in delay tolerant mobile sensor network[J]. China Communications, 2011(12): 87-97.

编 辑 张 俊