



基于预期延迟值的扩散转发路由算法

刘鑫, 金光, 江先亮, 钮俊
(宁波大学, 浙江 宁波 315211)

摘要:针对现有延迟容忍网络路由算法在消息传递过程中分发不灵活的问题,提出基于节点通话历史记录计算预期通断时长以及消息传递延迟值,并根据结果选择节点、分配副本数进行消息转发的路由算法(MDESF)。在算法不同阶段,根据节点的活跃度选择中继节点,再分配传递消息的副本数目,加快分发,降低延迟。同时为保证消息及时传递,在单副本阶段选择最优节点转发。本算法同时提出内存管理策略,提高消息转发成功率。仿真实验表明,该算法相对其他同类算法在投递率、交付时延和网络拥塞比率方面综合表现更优。

关键词:延迟容忍网络;扩散等待路由;内存管理策略

中图分类号:TP393

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016294

Meeting delay expect value in spray and forward routing algorithm

LIU Xin, JIN Guang, JIANG Xianliang, NIU Jun
Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: The existing DTN routing algorithms tend to make data transition inflexible and have a long delay in contact. To solve those problems, an algorithm was proposed which called meeting delay expect value in spray and forward routing algorithm for DTN (MDESF). This algorithm will use mobile node's contact history to conduct the expected average contact/disconnect time and message expected wait value (EWV). With those attributes the MDESF will proportionally distribute replicas of a message between two nodes in multiple replicas phase. A buffer management strategy was proposed in order to improve the success rate of information forwarded. The simulation results illustrate that the proposed MDESF protocol outperform other existing ones.

Key words: delay tolerant network, spray and wait routing, buffer management strategy

1 引言

延迟容忍网络(delay/disruption tolerant network,DTN)^[1]是一种不同于传统TCP/IP端到端的新网络类型,信息在传输过程中会由于连接的通断而产生时长不定的延迟。其

主要应用场景包括星际网络、战地网络、野生动物监测与追踪网络等。自2003年Fall^[2]提出延迟容忍网络概念伊始,该网络就进入了高速发展阶段。由于连接经常断开的特性,导致整个网络无法组成固定拓扑图。因此如何在无固定网络拓扑图的情况下提高信息交付率、各个移动节点

收稿日期:2016-08-18;修回日期:2016-11-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61601252);宁波市移动网络应用技术创新团队项目(No.2011B81002);宁波大学人才工程项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61601252), Ningbo Municipal Technology Innovation Team(No.2011B81002), NBU Research Project

资源消耗如何降低成为了该领域的热点问题。

延迟容忍网络的经典路由算法通常以增加网络中消息副本数量的方式来提高消息的成功投递率。虽然可以提高整体网络的成功投递率,但却忽略信息副本传输过程中实际带宽的限制以及消息队列缓存空间有限的情况。尤其是在现实的网络中出现拥塞时,上述问题会变得更加明显。

因此从限制网络中各消息副本数量着手限制转发的中继节点数量,在此基础上对消息队列管理算法进行优化。如图 1 所示,当移动节点 1 和节点 2 相遇时,两节点需要根据各自消息队列的情况考虑如何进行信息调度。节点 1、节点 2 需要根据策略选择哪条消息最先传递,节点 1 由于缓存空间用尽需要决定丢弃哪条消息以释放空间。由于现实网络中消息数据分组的大小各不相同,且消息的转发成功率不同,所以,为了能够更好地进行消息队列调度,本算法选择基于消息的效用值和大小进行调度。提出了一种通过节点通话记录信息计算节点预期值的延迟容忍网络路由算法(meeting delay expect value in spray and forward routing algorithm for delay tolerant network, MDES F)。通过延迟容忍网络专用仿真器 ONE 对其性能进行仿真实验。

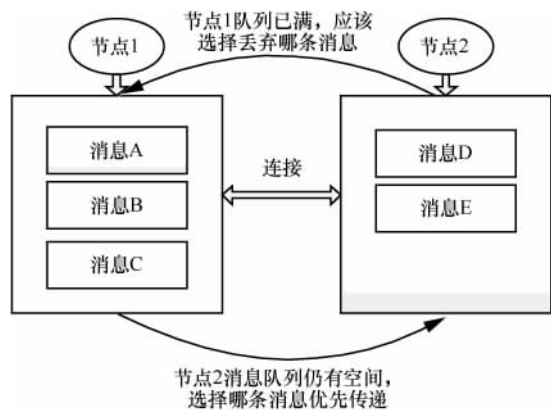


图 1 消息调度

2 相关工作

2.1 现有延迟容忍网络路由分析

延迟容忍网络路由算法分为两类^[3,4]:单消息副本路由算法和多消息副本路由算法。单消息副本转发路由算法要求节点携带消息在与其他节点相遇时依照条件选择是否将消息传递,删除自身存储的消息数据。优点在于资源开销小,但由于消息平均交付时延大,成功投递率较低、可靠性差,不推荐使用。

多消息副本路由算法相较更为常用,传统的传染路由(epidemic routing)^[5]协议是该类算法的代表,通过使用数据库复制技术在延迟容忍网络中无限制地传播消息副本给所有邻居节点。如果网络中所有节点能够充分移动,该类路由甚至能将所有的消息正确传递到目的节点上。但此类路由缺点也很明显,如果不限制传播消息副本数量,则会在连通时占用所有可能的传输路径,造成资源消耗严重、网络负载比率过高,且没有考虑到在实际网络资源、带宽缺乏的情况会导致路由算法性能严重降级。

因此为弥补以上不足,扩散等待路由(spray and wait routing, SAW)算法^[6]提出了限制副本复制数量的思想。该路由算法分为扩散分发和等待转发两阶段。在扩散阶段,算法首先限定了消息在网络中可复制最大数量为 L ,然后通过“复制一分发”的方式将消息传递给其他 $L-1$ 个中继节点或者在扩散的过程中将消息转发到了目的节点。当节点携带消息副本数为1时节点就进入等待阶段,在该阶段下,算法要求只有在遇到目的节点才会完成消息传递。尽管这样会降低消息成功投递率,但网络负载比率和节点的资源占用率同样也得到了降低。

2.2 消息队列管理算法分析

在延迟容忍网络路由算法中常使用简单的信息调度策略,例如:选择队首信息(DF),基于FIFO(先进先出)选择将消息队列首部的信息丢弃或分发;选择队尾消息(DL),将存放到消息队列内最新的消息副本优先丢弃或分发;选择消息生命周期(TTL)即将到期的消息(DO),遍历节点消息队列选择其中即将到期的消息优先丢弃或分发;选择最新的消息(DY),与DO策略相反,该策略选择最近产生的消息丢弃或分发。上述策略过于简单,对于消息投递和平均交付延迟的提升不明显。因此,为了降低对整个延迟容忍网络的影响,提高消息的投递率,研究者们提出了更加高效的消息选择方法。蒋庆丰等^[7]根据空闲缓存大小和接收消息速率提出双向拍卖模型来进行消息的分发管理;刘耀等人^[8]提出了一种分布式基于消息传播状态的缓存管理算法;还有基于节点携带消息数量推断对全网拥塞影响的队列管理算法^[9]等。

上述消息队列管理策略虽然具有启发式算法,但却依然不能适应延迟容忍网络不断变化的动态拓扑,且各消息之间不存在关联性对其调度缺乏合理性。为此 MDES F 算法选择引入对消息的分发概率和数据大小的考虑。

在延迟容忍网络路由算法中,由于节点的移动特性和



通信连接的时常通断性。为保证信息传输的准确性和可靠性,消息副本的分发以及中继节点的选择同样重要。因此本文通过要求各节点维护记录与其他节点相遇信息的数据结构。基于其中记录信息进行节点和消息副本数的选择。

3 基于相遇预期延迟的等待转发路由算法

本节详细说明基于相遇预期延迟的扩散转发路由算法(MDESf),该算法要求限制各消息的副本复制数量,整个路由算法过程基于消息副本数量分为两个阶段:多副本分发阶段和单副本转发阶段。后续会详细说明多副本分发阶段和单副本转发阶段的执行过程。本文也提出了消息队列管理策略来对缓存内的各消息进行调度。术语设置见表1。

表1 术语设置

符号	说明
N	网络中节点数
TTL_i	消息 i 的生存周期
L_k	消息副本数
C_{ij}	节点平均连接时间
D_{ij}	节点平均断开时间
E_{ij}	预期延迟值
M_i	消息大小
W_{ij}	节点 i, j 的连接带宽
ε_i	消息 i 成功分发率
U_i	消息 i 效用值
$EWV(v_i, v_d)$	v_i 到达 v_d 预期等待时间

3.1 多副本分发阶段

在MDESf算法中,移动节点产生的消息在创建分发之前会设定可复制副本数属性。因此在节点相互连接分发消息过程中,只需复制单消息副本给选中的中继节点,设定副本数为 L 即表示复制给该节点 L 个副本。当消息副本数值大于1时,该节点就处于多副本分发阶段。为了能够尽快将消息传递到目的节点,因此在该阶段需要节点将消息副本尽快分发到网络中的其他节点上^[10],所以当携带消息的移动节点与其他节点相遇时,会根据两节点的通话记录来计算比例值,分发给通话节点相应比例的消息副本。

3.1.1 预期值的计算

由于移动节点监测通话记录可以在后期计算预测的过程中获得较好的准确性^[11],所以如图2所示令每个节点维护一张二维链表,记录节点 v_i 在移动过程中与其他节点相遇通话情况。

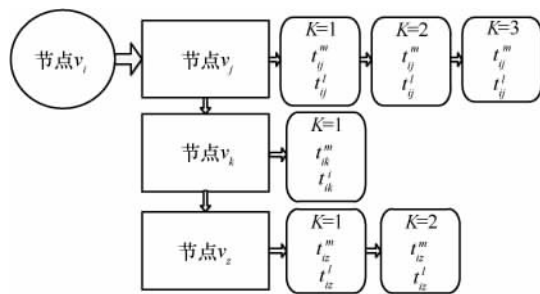


图2 节点记录链表

其中,各单链表记录各通话节点每次通话和断开连接的具体时刻。即当第 k 次 i, j 两节点相遇进行通话的时候,节点会主动查找维护的链表数据结构中对应节点链,并在该链表中增加此次相遇的连通、断开时刻 $t_{ij}^m(k)$ 、 $t_{ij}^l(k)$ 。基于上述数据结构中存储的通话记录信息可以计算得出节点间各次相互通话和断开连接的具体时长 c_{ij} 、 d_{ij} ,通过加权移动平均计算预测未来一段时间内节点平均连通、断开时长 C_{ij} 、 D_{ij} :

$$C_{ij} = \alpha_1 C_{ij} + \alpha_2 c_{ij}^k + \alpha_3 c_{ij}^{k-1} \quad (1)$$

$$D_{ij} = \beta_1 D_{ij} + \beta_2 d_{ij}^k + \beta_3 d_{ij}^{k-1} \quad (2)$$

其中, α, β 为加权移动计算的调优参数,当调优参数值设定较大则相应指标值随时间变动对于平均值的影响会较小,同时对于指标值异常变动的抗性更强。为区分上述两个参数作为连通和断开的时间调优参数,符号设定有所不同,但是在仿真实验当中根据Jones的实验结果^[12]设定式(1)、式(2)参数值分别为 $\alpha_1=\beta_1=0.85$; $\alpha_2=\beta_2=0.1$; $\alpha_3=\beta_3=0.05$,以保证实验结果对于仿真实验中异常通话记录波动具有较强的顽健性。

3.1.2 多副本分发

MDESf算法基于限制副本数量的扩散等待路由算法:在消息产生阶段设定初始副本数量为 L ,多副本分发阶段每次只会传输单副本给相遇节点。MDESf算法为保证信息投递率较高,所以要求节点尽快将各消息分发到其他 $L-1$ 个节点上,因此选择根据通话节点的预期平均通断时间比例来选择分配传递消息副本的数目。例如节点 v_i 携带信息 m_i 且副本数量为 $L_i(L_i>1)$ 与没有消息 m_i 的节点 v_j 相遇。当两节点交换更新路由信息结束后,节点 v_i 会传送

m_i 消息副本给节点 v_j ,副本属性赋值为 $\left\lfloor L_i \cdot \frac{C_{ij}}{(C_{ij} + D_{ij})} \right\rfloor$ 表

示传递该数值的信息给中继节点,节点 v_i 中 m_i 消息节点相应减少相同的副本数。同时,为防止出现自私节点和不

活跃节点等外因导致消息副本丢失或分发不及时的情况。在多副本分发阶段,当与多个邻居节点互联时,算法根据各邻居节点的通话记录历史计算节点活跃程度按降序排列。优先挑选活跃度高的邻接节点作为中继节点转发消息副本。

3.2 单副本转发阶段

在多副本分发阶段,节点的频繁相遇通话使消息的分发过程会很活跃,消息列表中的各消息副本数目也随着降低。当副本数 L 为 1 时,则进入单副本转发阶段。在转发阶段,各节点需要决定是保留消息副本还是传递最后的副本给相遇节点。不同于多副本分发阶段希望尽快将消息分发到网络中各节点以提高消息到目的节点的概率,单副本转发阶段考虑更多的是持有消息副本的节点与相遇节点在消息生存周期内到达目的节点概率的比较,选择更优节点来转发消息。

3.2.1 预期延迟值的计算

由于本路由算法希望能够尽快将消息副本传递到目的节点,并且考虑到消息存在生命周期(TTL)。所以不同于传统扩散等待路由算法中的单副本阶段,MDESF 要求携带单副本的节点与相遇节点对下次到目的节点的预期相遇时间进行比较,然后根据比较结果决定是否进行转发操作。

Jones 的文章^[12]中提出基于节点的通话记录信息可以较准确地预测一段移动期内两节点相遇延迟值。基于该思想提出式(3):假设节点相遇时间是等可能的,当节点相互连接时则等待时间归零,直到连接断开再重新开始计时。如图 3 所示,由于连接时间等可能,可以通过计算曲线下部分面积来表示相遇延迟值,面积大小为 $\frac{1}{2}D_i^2$ 。因此携带单消息副本的节点通过对比两节点到达目的节点的预期延迟值,决定是否转发消息副本给相遇节点。基于节点数据结构中存储的信息,由式(1)、式(2)计算得到节点通话的预期连接、断开的平均时长。再由式(3)可以计算得到节点 v_i 、 v_j 两节点的预期相遇延迟值 E_{ij} 。

$$E_{ij} = \frac{D_{ij}^2}{2(D_{ij} + C_{ij})} \quad (3)$$

3.2.2 单副本转发

在单副本转发阶段,节点持有消息 m_i 的副本数 L_i 为 1,且网络中存在的任一消息 m_i 的副本均没有被成功转发到目的节点上。为了尽最大可能在消息生命周期内把消息 m_i

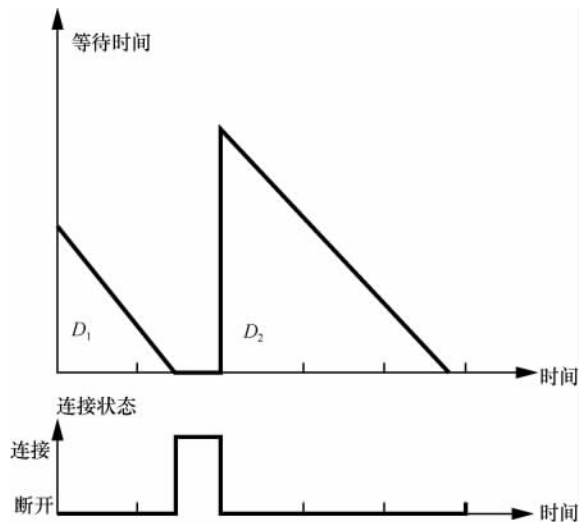


图 3 连接等待时间及状态示例

转发到目的节点,MDESF 选择首先基于式(2)、式(3)计算得两节点平均断开时长以及节点间消息成功传递的预期时间,求得总预期时长($D_{ij} + E_{ij}$)。再基于节点数据结构中存储的两节点前次通话断开时刻 t_{lea} 以及当前时刻 t_{cur} ,求已经历时间 $(t_{cur} - t_{lea})$ 。最后基于以上结果计算此时节点 v_i 与节点 v_j 相遇并成功传递消息的预期等待时长(expected wait value, EWV)。

$$EWV(v_i, v_j) = (D_{ij} + E_{ij}) - (t_{cur} - t_{lea}) \quad (4)$$

通过比较携带消息节点和相遇节点到目的节点的预期等待时长,选择等待较短节点继续在消息生存周期内携带副本进行转发操作或传递给目的节点。如果两节点到目的节点预期等待时间均大于消息剩余生存时间,则根据通话记录链表选择连通性较高节点继续进行转发。

3.3 算法说明

MDESF 算法流程如图 4 所示。具体代码如下。

- (1) let array $[m_1, m_2, \dots, m_k]$ be the messages in node's buffer
- (2) if v_f meets v_j at time t and node v_j has the highest activity then
- (3) node v_i and v_j update contact history list and calculate the C_{ij} and D_{ij}
- (4) for $k=1, 2, \dots, N$ do
- (5) if v_j doesn't hold message m_k then
- (6) $M_k \leftarrow m_k$, number of Replicas
- (7) if $M_k > 1$ then
- (8) v_j sends $\left\lfloor L_i \frac{C_{ei}}{(C_n + D_{il})} \right\rfloor$ replicas of m_k to v_j



- (9) else
- (10) $v_d \leftarrow m_k$ destination
- (11) if $EWV(v_i, v_d) > EWV(v_j, v_d)$ then
- (12) v_f forwards m_k to v_j
- (13) end if
- (14) end if
- (15) end if
- (16) end if

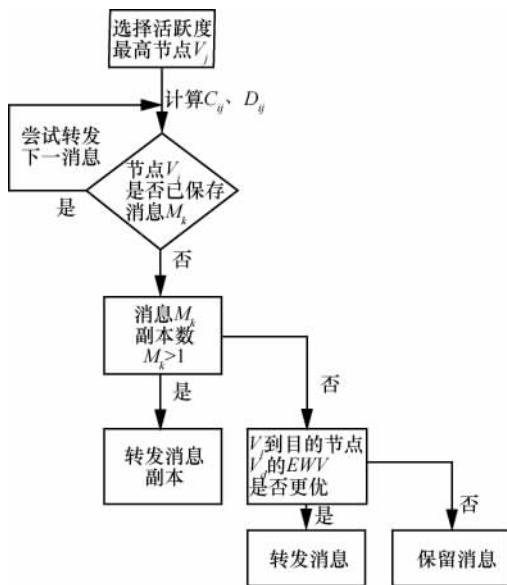


图4 路由算法过程

当多个移动节点相遇时,携带消息的源节点会如行(2)根据节点通信记录选择具有最高活跃度的节点进行消息转发。在转发过程中,节点会首先更新连接信息,然后源节点会根据持有消息副本数量 M_k 选择转发方法。多副本分发阶段则会如行(8)转发相应副本数量给连接节点;单副本转发阶段,会如算法行(11)对比到消息 m_k 目的节点 v_d 的预期等待时长,选择是否转发。算法复杂度为 $O(n)$,因此在实验过程中对节点数据处理能力要求不会过高。

3.4 内存管理策略

MDSEF 算法中允许每个消息在网络中存在多个副本,但由于节点的缓存空间有限,因此需要高效的消息队列管理策略来进行调度。MDSEF 依据消息的成功分发率作为消息调度的主要参考要素,且由于转发消息数据大小不同。因此本算法综合考虑消息的大小和成功分发率在节点有限的缓存空间内进行消息调度。

$$\varepsilon_i = e^{-\frac{1}{C_g} \left(\frac{M_i}{W_g} + E_g \right)} \quad (5)$$

由于延迟容忍网络中各节点的接触时刻和通话时间遵循指数分布^[13] $f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$, 参数 λ 可表示为 $\lambda = \frac{1}{c_{ij}}$ 。可知节点平均通话时长同样遵循指数分布。因此为将消息成功转发,本文提出式(5)计算消息转发概率。在消息传递最低时限基础上,考虑到达目的节点的预期转发延迟。可以更准确计算大小为 M_i 的消息 i 在带宽为 W_g 情况下的转发概率 ε_i , 然后根据消息的副本值属性 L_i 计算各消息的投递成功率作为消息效用值:

$$U_i = \begin{cases} \varepsilon_i, & L_i = 1 \\ 1 - (1 - \varepsilon_i)^{L_i}, & L_i > 1 \end{cases} \quad (6)$$

在真实网络环境中传递数据的大小对于转发成功率也有较大影响。因此基于各消息的效用值和大小计算得 $\frac{U_i}{M_i}$ 的值。然后在消息队列中根据计算得到值的降序排列。当消息队列缓存用尽时,优先选择 $\frac{U_i}{M_i}$ 值最小的消息丢弃以释放空间。同理,优先调度 $\frac{U_i}{M_i}$ 值大的消息进行转发。

4 仿真实验和性能评估

4.1 仿真环境设定

基于延迟容忍网络仿真器 ONE^[14], 在消息成功投递率、网络负载比率、平均延迟 3 方面对提出的 MDSEF 路由算法与当前流行的其他延迟容忍网络路由协议进行比较。如图 5 所示为某市区交通路线, 地图仿真场景大小为 $10 \text{ km} \times 16 \text{ km}$ 。仿真器会在路线图中按设定随机分布移动节点, 令其遵循设定的移动模型移动并在移动过程中进行消息传递。仿真时间为 30 h, 其中节点的速度及移动规则和消息属性的具体设置见表 2。



图5 仿真实验路线

表 2 仿真场景参数

参数名称	取值范围
节点数目/个	120~300
消息初始副本数	10
消息大小/MB	0.5~2
信息大小/MB	0.5~1
信息生存时间/s	5 000
消息产生时间/s	150~240
节点缓存队列大小/MB	20
节点传输距离/m	10
节点移动模型	地图最短路径

4.2 仿真结果及分析

为了评估本文提出的 MDSEF 路由算法的效率,将其与流行的 Bubble^[15]、CDR^[16]、MaxProp^[17]、SAW^[6] 4 种延迟容忍网络路由算法进行对比。会从消息生成速率和网络中移动节点数目两方面对上述路由算法的成功投递率、平均延迟和网络负载比率等方面进行对比分析。其中成功投递率大小用于体现算法在实验过程中能够按时发送到目的节点的成功率;平均延迟表示节点从得到消息到最终投递或丢弃的平均时间,平均延迟越低表示消息在生存时间到期之前到达目的节点的可能性越高,副本占用节点内存的时长越短;网络负载比率则表示各算法在消息分发过程中整个延迟容忍网络的负载压力大小,比率越小信息传播越通畅。

如图 6 所示为 MDSEF 与其他 4 种路由算法在节点数不同的情况下分别对成功投递率、网络负载比率、交付延迟等方面进行性能比较。其中有限制副本数要求的算法则设定其副本数为 10。其中,MaxProp 算法成功投递率最高并且遵循传染路由规则所以随着节点数的增加交付延迟时间会较快降低。但同样由于未限制消息副本分发数目,导致 MaxProp 和 Bubble 路由算法的网络负载比率较差;CDR 路由算法考虑到节点内存限制同样设定转发副本数,具有较优的网络负载比率。但由于节点选择策略需要考虑因素较多,导致成功投递率、交付延迟较差;SAW 算法由于在多、单副本阶段转发消息较被动,因此各方面性能相对 MDSEF 均较差。

总结 MDSEF 算法在网络节点数目变化的情况下,由于算法在限制副本分发数量基础上增加了基于节点通话记录数据对节点相遇延迟的预测计算,因此无论是对于消息转发率还是到目的节点的相遇时间都更加准确。在网络负载比率和消息投递延迟方面表现突出,成功投

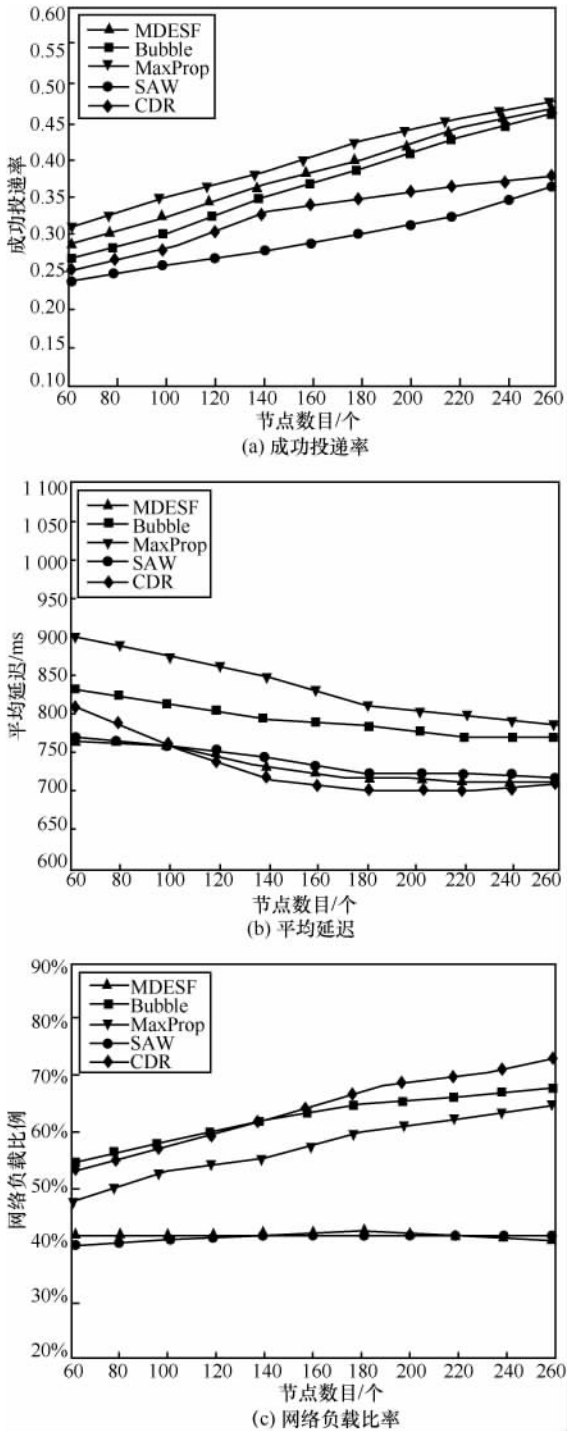


图 6 在节点数不同情况下性能对比

递率性能也较好,因此相对于其他 4 种路由算法整体效率更优。

除了在不同节点数目情况下对路由进行比较外,还在不同消息生成速率下对以上几种路由算法的性能进行了比较。如图 7 所示为消息生成间隔的不断加大对网络负载



和消息投递率等方面的影响。从图 7(a)中的数据分析得出在不同的消息生成速率下,MDESF 均保持较高的消息成功投递率。虽然在消息生成速率较快时成功投递率有所下降,但相比于多副本转发路由算法,由于限制了副本复制数量,所以产生的网络拥塞较小。图 7(b)、图 7(c)数据显示了由于消息产生速率快网络会产生拥塞,导致消息交

付延迟高。随着消息产生速率的下降 MDESF 算法的网络负载比率逐渐降低、网络拥塞减少明显。相比其他路由算法,MDESF 算法的整体效用更优。

5 结束语

提出了基于节点通话记录预测相遇延迟值的延迟容忍网络路由算法 MDESF, 首先根据节点的相遇历史记录计算未来一段时间内节点间的平均连接、断开时长。再基于计算结果,计算多副本阶段转发给中继节点的副本数量以及单副本阶段比较到达目的节点相遇等待时间,从中选择最优节点进行转发。由于缓存空间有限,因此基于缓存队列内消息的转发概率和消息大小计算效用值,根据效用值大小进行消息调度。最后两组实验结果表明,该路由算法与其他 4 种路由协议相比,提高了消息成功投递率,减小了网络负载比率和平均延迟,同时在一定程度上提高了投递效率。

参考文献:

- [1] KEVIN. A delay-tolerant network architecture for challenged internets[J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2003, 33(4): 27-34.
- [2] BURLEIGH S, HOOKE A, TORGERSON L, et al. Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary Internet [J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(6):128-136.
- [3] 熊永平, 孙利民, 牛建伟, 等. 机会网络 [J]. 软件学报. 2009, 20(1): 124-137.
- [4] XIONG Y P, SUN L M, NIU J W, et al. Opportunistic networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(1): 124-137.
- [5] CAO Y, SUN Z. Routing in delay/disruption tolerant networks: ataxonomy, survey and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(2): 654-677.
- [6] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially-connected Ad Hoc networks[J]. Master Thesis, 2000.
- [7] SPYROPOULOS, THRASYVOULOS, PSOUNIS, et al. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks[J]. ACM WDTN, 2015: 252-259.
- [8] 蒋庆丰, 门朝光, 贾美娟, 等. 基于双向拍卖的 DTN 拥塞感知激励策略[J]. 电信科学, 2015, 31(1): 15-22.
- [9] JIANG Q F, MEN C G, JIA M J, et al. Congestion-aware incentive scheme based on double auction for DTN [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(1): 15-22.
- [10] 刘耀, 王建新. 一种基于节点运动范围自感知的路由算法[J]. 华南理工大学学报, 2009, 37(10): 79-83.
- [11] LIU Y, WANG J X. A routing scheme based on awareness of

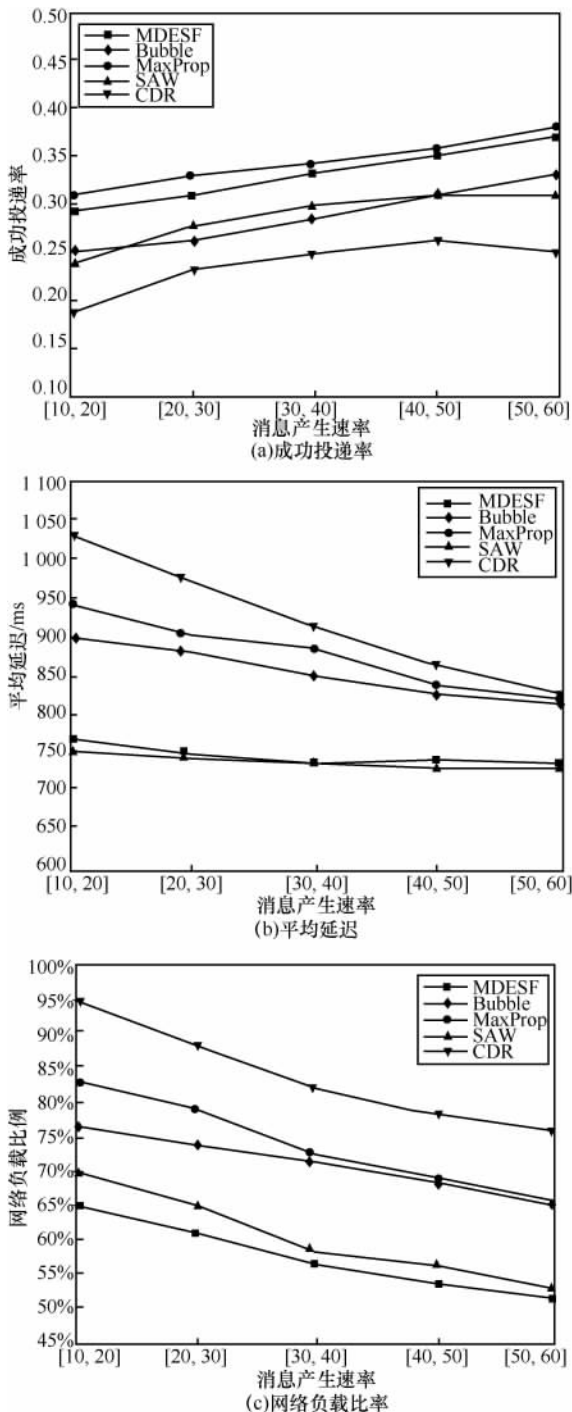


图 7 消息产生速率不同时性能对比

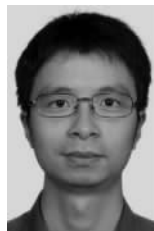
- node motion scope [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2009, 37(10): 79-83.
- [9] 王恩, 杨永健, 李莅. DTN 中基于生命游戏的拥塞控制策略[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(11): 2393-2470.
- WANG E, YANG Y J, LI L. Game of life based congestion control strategy in delay tolerant networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(11): 2393-2470.
- [10] ZHENG H, WANG Y, WU J. Optimizing multi-copy two-hop routing in mobile social networks [C]//11th IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking, June 9-12, 2014, Singapore. New Jersey: IEEE Press, 2014: 573-581.
- [11] GAO W, LI Q, CAO G. Forwarding redundancy in opportunistic mobile networks: Investigation and elimination [C]//IEEE Conference on Computer Communications, July 11-13, 2014, New York, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 2301-2309.
- [12] JONES E P C, LI L, WARD P A S. Practical routing in delay-tolerant networks [C]//ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking ACM, October 3-5, 2005, Philadelphia, USA. New Jersey: IEEE Press, 2005: 237-243.
- [13] WANG E, YANG Y, WU J. A knapsack-based message scheduling and drop strategy for delay-tolerant networks [J]. Wireless Sensor Networks, 2015: 120-134.
- [14] 王联, 王新华, 穗敬麒. 机会网络模拟器 ONE 及其扩展研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(1): 272-277.
- WANG L, WANG X H, SUI J L. Extending research for ONE simulator of opportunistic network [J]. Application Research of Computers, 2012, 29(1): 272-277.
- [15] HUI P, CROWCROFT J, YONEKI E. Bubble rap: social-based forwarding in delay tolerant networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(11): 1576-1589.
- [16] PAPANIKOS N. Coordinating replication decisions in multi-copy routing for opportunistic networks [C]//10th IEEE WiMob. April 23-29, 2014, Barcelona, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2014.
- [17] BURGESS J, GALLAGHER B, JENSEN D, et al. MaxProp: routing for vehicle-based disruption-tolerant networks [C]//25th

IEEE International Conference on Computer Communications, April 23-29, 2006, Barcelona, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2006:1-11.

[作者简介]



刘鑫(1991-),男,宁波大学硕士生,主要研究方向为无线传感网络、机会网络。



金光(1972-),男,宁波大学教授、硕士生导师,主要研究方向为无线网络、物联网、网络协议等。



江先亮(1986-),男,宁波大学讲师,主要研究方向为数据驱动网络协议、数据中心网络传输和调度、软件定义和虚拟化网络等。



钮俊(1976-),男,宁波大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为物联网、软件定义网络、模型检测等。